

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

**Université de TLEMCEM
Faculté de Technologie**

Département de Génie

Mécanique



Mémoire d'Obtention du Diplôme
de MASTER en Génie Mécanique
Option : Energétique.

Thème

**Évaluation des émissions NOx
pour différents carburants**

Présenté par:

- ***MOSTEFAOUI Abdelkader***
- ***BOUKLIKHA Mohamed Nadjib***

Devant le Jury:

- ***Pr. ROSTANE Brahim***
- ***Pr. MIMOUN Okacha***
- ***Pr. BENMANSOUR Abdelkrim***

Président

Examineur

Encadreur

Remerciement

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

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

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

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

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

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

Dédicace

*Ce travail est dédié
A nos chers parents
A nos chers frère et
sœurs*

*A tous ceux qui nous
sont chers*



Sommaire

Remerciement.....	2
Dédicace	3
Résumé	8
Abstract	9
Nomenclature	10
Liste des figures	12
Liste des Tableaux.....	14
Introduction Générale.....	15
1. Introduction:	16
1.1. Étude bibliographique:	16
1.2. Objectif du travail:.....	19
1.3. Contenu du mémoire:	19
Chapitre 1 Propriétés des carburants	20
1.1. Introduction:.....	21
1.2. Propriétés physiques et chimiques des carburants:	22
1.2.1. Essence:	22
1.2.1.1. Définition:.....	22
1.2.1.2. Propriété physique:	22
1.2.1.3. Propriété chimique:.....	23
1.2.1.4. Propriétés physico-chimiques:.....	24
1.2.2. Diesel:.....	25
1.2.2.1. Définition:.....	25
1.2.2.2. Propriété physique [30]:.....	25
1.2.2.3. Propriété chimique [30]:	26
1.2.2.4. Propriétés physico-chimiques:.....	27
1.2.3. Gaz de pétrole liquéfié (GPL):	27
1.2.3.1. Définition:.....	27
1.2.3.2. Propriété physique [31]:.....	28
1.2.3.3. Propriété chimique [30]:	29
1.2.3.4. Propriétés des carburants physico-chimiques:.....	30
1.3. Propriétés thermiques des carburants [32]:.....	30
Chapitre 2 Combustion.....	32

2.1.	Définition de la combustion:.....	33
2.2.	Déroulement d'une combustion [35]:	34
2.2.1.	Température d'inflammation:.....	34
2.2.2.	Explosion et flamme:.....	34
2.2.2.1.	Description:.....	34
2.2.2.2.	Vitesse de combustion:	34
2.2.2.3.	Limites d'inflammabilité:	35
2.2.2.4.	Vitesse de combustion maximale:	35
2.2.2.5.	Rapidité de propagation:.....	35
2.3.	Caractéristiques de combustion [34]:.....	35
2.3.1.	Combustion rapide:.....	35
2.3.2.	Combustion lente:.....	36
2.3.3.	Combustion complète ou stœchiométrique:	36
2.3.4.	Combustion turbulente:	36
2.3.5.	Combustion incomplète:.....	36
2.4.	Les moteurs automobiles [36]:.....	37
2.4.1.	Généralités sur les moteurs à combustion interne automobile:	37
2.4.2.	Phénomènes de combustion dans les moteurs thermique [36]:.....	38
2.4.2.1.	Allumage commandé / flamme de propagation:.....	38
2.4.2.2.	Diesel / flamme de diffusion:.....	40
2.4.2.3.	Turbine à gaz:	41
2.4.2.4.	La chaudière:.....	44
2.4.2.5.	Les bruleurs:	46
Chapitre 3 Pollution		49
3.1.	Définition de la pollution:.....	50
3.2.	Effet de la pollution sur l'environnement: Effet sur l'atmosphère [40]:	51
3.2.1.	L'accroissement de l'effet de serre:.....	51
3.2.2.	Effet sur le sol et sur les milieux aquatiques:	52
3.2.3.	Effet sur la santé humaine:	52
3.3.	Les principaux polluants [41]:	53
3.3.1.	Formation des polluants:	54
3.3.1.1.	Formation des oxydes d'azote (NOx) [42]:	55
3.3.1.2.	Formation du monoxyde de carbone (CO):	56

3.3.1.3.	Formation des hydrocarbures imbrulés (HC):	57
3.3.1.4.	Formation des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [44]:	58
3.3.1.5.	Formation des particules de suie [44]:.....	59
3.3.2.	Méthodes de réduction des polluants dans les moteurs automobiles [45]:.....	59
3.3.2.1.	Amélioration de la combustion dans les moteurs:	60
3.3.2.2.	Systèmes de post-traitement:	62
3.3.2.3.	Reformulation des carburants: (Les carburants alternatifs):.....	64
Chapitre 4	Modélisation de la combustion.....	65
4.1.	Introduction:.....	66
4.2.	Domaine d'étude:.....	66
4.2.1.	Code de calcul Fluent:	67
4.2.2.	Formulations mathématique:	67
4.2.2.1.	Equation de continuité:	67
4.2.2.2.	Equation de conservation de l'espèce chimique:.....	67
4.2.2.3.	Equation de conservation de la quantité de mouvement:	67
4.2.2.4.	Equation de conservation d'énergie totale:.....	68
4.2.3.	La turbulence:	68
4.2.3.1.	Modélisation de la turbulence RANS k-ε STANDARD:	68
4.2.3.2.	Modélisation de la combustion EDM (Eddy Dissipation Model):	69
4.3.	Les mécanismes de formation des NO _x [46]:.....	70
4.3.1.	NO _x thermique:	71
4.3.1.1.	Cinétique de formation de NO _x thermique:	71
4.3.1.2.	L'hypothèse d'état quasi-stationnaire pour [N •]:	72
4.3.2.	NO _x prompt:.....	72
4.3.3.	Processus de formation de NO _x prompt:.....	73
4.4.	Calcul de la richesse:	73
4.4.1.	Calcul de No (ppm):	74
4.4.2.	Capacité thermique:.....	74
Chapitre 5	Résultats et Discussion	76
5.1.	Introduction:.....	77
5.2.	Description du problème:.....	77
5.2.1.	Maillage et conditions aux limites:.....	78
5.2.1.1.	Condition aux limites:.....	78

5.2.1.2. Maillage:	78
5.2.2. Modèle utilisés pour la simulation:	79
5.3. Validation des modèles utilisés:.....	80
5.3.1. Validation des profils de Temperature:	80
5.3.2. Validation de profile de NO thermique:	80
5.4. Contour de température et de vitesse avec et sans combustion pour méthane-air: 81	
5.5. Les Oxydes d'azote:.....	84
5.5.1. Contours de la fraction massique de NO _x :	84
5.5.2. La variation des émissions de NO _x pour différent carburants:	84
5.6. La distribution de température pour différent carburant:.....	85
Conclusion Générale	87
Références	88

Résumé

Ce travail présente une étude numérique, réalisée en utilisant le logiciel Fluent, d'une flamme de diffusion turbulente produite par la combustion de méthane/air ainsi que d'autres carburants (essences, diesel, kérosène et GPL) confinés dans un brûleur cylindrique expérimental. Les modèles utilisés sont **EDM** pour la combustion et **k-ε** pour la turbulence. Les paramètres tels que la température, la vitesse, la distribution de CH₄ et d'autres carburants, la formation de NO_x thermique seront analysés en détail. Les résultats sont confrontés aux données expérimentales, En outre l'influence de la température sur les émissions polluantes de NO_x pour différents carburants.

Abstract

This work presents a numerical study, carried out using the fluent CFD software, of a turbulent diffusion flame produced by the combustion of methane / air and other fuels (gasoline, diesel, kerosene and GPL) confined in a cylindrical experimental burner. The models used are EDM for combustion and k- ϵ for turbulence. Parameters such as temperature, speed, distribution of CH₄ and other fuels, occurrence of thermal NO_x will be analysed in detail. The results are compared and validated with experimental data. In addition, the effects of different fuels, as well as the influence of temperature on polluting NOx emissions are studied.

Nomenclature

Lettres latines

u	Vecteur de vitesse, (m/s)
x	Composantes de direction axiale, (m)
Y_k	La fraction massique de l'espèce, Y_k
D_k	Coefficient de diffusion de l'espèce k .
\dot{w}_k	Le taux de production de l'espèce chimique k .
f_k	Force massique, (N).
P	Pression thermodynamique, (Pa).
h_s	L'enthalpie sensible, (J/Kg).
\dot{W}_T	Le dégagement chaleur dû à la réaction chimique, (J/Kg).
\dot{Q}	Source de chaleur radiative, (J/m^3s).
T	Température, (K).
$V_{k,i}$	La vitesse de diffusion de l'espace k dans la direction i , (m/s).
C_p	La chaleur spécifique, (J/Kgk).
Re	Nombre de Reynolds.
v	La vitesse de convection globale de l'écoulement, (m/s)
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$	Constante de modèle $k-\varepsilon$.
G_k	La production d'énergie cinétique turbulente.
G_b	La génération de l'énergie cinétique de la turbulence due à gravitation.
Y_m	La contribution de la dilatation fluctuante.
R_{stoe}	Le rapport stœchiométrique.
\dot{m}_a	Le débit d'air de combustion, (Kg/s)
\dot{m}_c	Le débit de carburant, (Kg/s)
$m_{a,1}$	La quantité d'air strictement nécessaire à la combustion stœchiométrique d'un kg de combustible, (Kg)
L_f	La longueur de la chambre, (m).
D	Diamètre de la chambre, (m).
i, j	Axes de directions.
t	Temps, (s)

Lettre grecques

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

Abréviations

<i>RANS</i>	Reynolds average Navier –Stokes
<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics
<i>EDM</i>	Eddy dissipation model
<i>NOx</i>	Oxyde d'azote

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1: Raffinage du pétrole.

Figure 2: Exemple de composition d'une essence européenne.

Figure 3: L'Isooctane.

Figure 4: n-heptane.

Figure 5: Exemple de composition d'un gazole européenne.

Figure 6 : Le hexa décane.

Figure 7: α -méthyl-naphtalène.

Figure 8: Origine du GPL.

Chapitre 2

Figure 1: Triangle du feu.

Figure 2: Front de flamme.

Figure 3: Combustion complète du butane.

Figure 4: Combustion incomplète du butane.

Figure 5: Moteur quatre temps.

Figure 6: Allumage commandé et propagation de flamme dans une chambre à volume constant.

Figure 7: Flamme de diffusion stabilisée pour la combustion Diesel.

Figure 8: Turbine à gaz.

Figure 9: Schéma de Chambre de combustion.

Figure 10: L'enveloppe de combustion.

Figure 11: Chaudière industrielle.

Figure 12: brûleur pour chaudière fioul.

Chapitre 3

Figure 1: pollution de l'air.

Figure 2: pollution de l'eau.

Figure 3: pollution à l'ozone.

Figure 4: Schéma des trois principales voies de formation du NO en combustion.

Figure 5: Tête de cylindre montrant les sources possibles de HC imbrulés.

Figure 6: Schéma du mécanisme HACA.

Figure 7: Mécanisme de formation des particules de suie dans les flammes.

Figure 8: Principe de fonctionnement d'un Turbo Compresseur.

Figure 9: Injection classique.

Figure 10: Un système Common rail.

Figure 11: Recirculation des gaz d'échappement dans un moteur.

Figure 12: L'emplacement des filtres à particules dans un moteur.

Figure 13: Un catalyseur.

Chapitre 4

Figure 1. Vue schématique de la chambre de combustion.

Figure 2: La géométrie du modèle sur fluent en 2D.

Figure3: Structure de maillage.

Chapitre 5

Figure 1:Validation des Profil de températures en fonction de la position axiale.

Figure 2:Comparaison de NO thermique de la présente étude et ceux de zhou et al [63] en fonction de la position radial.

Figure 3:Contours de vitesse (a) sans combustion et (b) avec combustion pour un écoulement thermique turbulent de méthane-air.

Figure 4: (a) Contours de température vitesse (a) sans combustion et (b) avec combustion pour un écoulement thermique turbulent de méthane-air.

Figure 5:Contour de la fraction massique de NOx.

Figure 6:Evolution de la concentration de NOx dans les gaz d'échappement pour différent carburant.

Figure 7: La distribution de température pour différent carburant (a) diesel, (b) essence, (c) kérosène et (d) GPL en fonction de la position axial.

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau 1: Propriétés physico-chimiques des essences.

Tableau 2: Propriétés physico-chimiques des gazoles.

Tableau 3: Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures composants le GPL.

Chapitre 3

Tableau 1: exemple de répartition des classes d'hydrocarbures dans les gaz d'échappement.

Chapitre 4

Tableau 1: Constante de modèle k-ε.

Introduction Générale

1. Introduction:

Depuis l'antiquité l'homme n'a cessé d'utiliser la combustion. Il utilisa le feu pour se nourrir, pour se réchauffer et pour se défendre. Aujourd'hui, la vie humaine est basée sur la combustion comme sur l'air et l'eau. Nos progrès dépendent de plus en plus sur la combustion qui occupe une place importante pour la production d'énergie à partir des combustibles fossiles dont les ressources sont limitées. Cependant, la combustion de ces hydrocarbures tels que le méthane entraîne la Production d'espèces polluantes pour l'environnement, et la sévérité des normes antipollution qui deviennent de plus en plus exigeantes poussent les industriels du secteur de l'énergie à entreprendre des recherches pour perfectionner les procédés de combustion et de réduction de consommation en combustible et de limiter les émissions polluantes, en particulier les NO_x .

Les différentes applications technologiques modernes de la combustion turbulente nécessitent une meilleure connaissance de la structure de l'écoulement, des phénomènes de stabilisation de la flamme et leurs critères d'extinction. L'amélioration de chaque élément passe donc par une bonne compréhension des phénomènes relatifs à la combustion. De ce fait, il est nécessaire de comprendre les processus physiques et chimiques prépondérants au sein du système de combustion tel que la stabilité des flammes, l'interaction entre la turbulence et les réactions chimiques et le comportement dynamique. Si l'on se place dans une perspective plus récente, on constate depuis une vingtaine d'années le domaine de la combustion turbulente en général et celui de la combustion turbulente dans les systèmes réactifs pré mélangés en particulier, se sont considérablement développés, sous l'influence conjuguée de l'avènement des techniques expérimentales utilisant les lasers et l'informatique et du développement des méthodes d'analyse mathématiques et numériques avancées.

Les combustibles sont les matières réductrices susceptibles d'entrer en réaction vive avec l'oxygène en dégageant une grande quantité de chaleur. Ces matériaux ont pour origine la matière organique formée grâce à l'énergie solaire par la synthèse chlorophyllienne. Celle-ci associe les éléments C , H et O pour former les composés de la famille des *hydrates de carbone* dont dérivent les végétaux supérieurs terrestres et le phytoplancton marin. Les éléments nécessaires à l'élaboration de cette matière organique proviennent du *dioxyde de carbone* atmosphérique et de l'eau des océans.

1.1. Étude bibliographique:

Les écoulements de réaction turbulents ont une large gamme d'applications dans différents domaines tels que les utilisations domestiques, militaires et industrielles. [1]. En général, la

prédiction précise des champs scalaires et vectoriels dans la combustion turbulente est très difficile et nécessite la résolution d'un champ d'écoulement de réaction turbulent instationnaire tridimensionnel. Compte tenu de l'utilisation répandue de la combustion turbulente, de nombreuses recherches ont été menées, des investigations expérimentales et numériques. L'utilisation de méthodes de réduction de la pollution et de contrôle de la flamme [2, 3], le flux de turbulence [4], ainsi que l'utilisation de jets stabilisateurs [5] sont des exemples d'études de recherche concernant ces flux de réaction. Dans la plupart des simulations numériques, la modélisation des écoulements turbulents a été réalisée à l'aide des équations de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Fang et coll. [6] ont étudié l'effet de la fluctuation sur la production de NO dans une chambre de combustion à turbulence. Ils ont examiné des modèles de second ordre pour des phrases multiples des fluctuations de vitesse de réaction et ont validé les résultats obtenus pour la température et les oxydes d'azote en utilisant les résultats expérimentaux disponibles [7]. Amini et al. [8] ont été réalisées des études numériques de différents modèles de turbulence pour optimiser les performances d'une chambre de combustion. Leurs résultats montrent que le modèle non linéaire de turbulence $k-\epsilon$ du troisième ordre montre un accord favorable avec les résultats expérimentaux.

Dans certaines études récentes, des méthodes de simulation numérique directe (DNS) [6,9] et (LES) [10] ont été utilisées pour modéliser la combustion turbulente air-carburant. En raison du coût de calcul élevé requis pour l'approche DNS et LES, le modèle RANS est largement utilisé dans les applications d'ingénierie. Les vecteurs scalaires des écoulements turbulents sont créés en calculant la moyenne de l'équation d'énergie dans un écoulement turbulent, compte tenu l'importance de la propriété de température dans les flux de combustion, les flux de chaleur turbulents auraient un effet significatif sur la prévision des caractéristiques de combustion. Spalding [11] a présenté une nouvelle expression pour le taux de réaction moyen dans une flamme turbulente, pour un rapport (air/combustible) uniforme ou non. Cette expression est basée sur l'idée que des paquets de gaz cohérents frais et brûlés, exposés à un processus d'étirement, s'entremêlent donnant lieu à un mélange et donc à la réaction. Abdelgayed et al [12] ont présenté une théorie relative à la combustion turbulente, celle des « Deux tourbillons », lors de leur étude sur la propagation des flammes turbulentes. Ils ont montré théoriquement et expérimentalement, que le taux de combustion dans les petites structures (petits tourbillons) peut être quelquefois plus grand que celui dans les grosses structures (grands tourbillons). Des expressions théoriques pour le rapport des vitesses de propagation laminaire et turbulente des flammes ont été proposées en fonction du nombre de Reynolds et le rapport de la vitesse laminaire et l'écart type des fluctuations de vitesses. Ces

valeurs théoriques ne sont pas en bon accord avec celles obtenues par l'expérience. L'effet de la turbulence sur les limites d'inflammabilité n'est pas correctement capté. Ces limites sont réduites toutefois que la turbulence augmente en intensité. L'augmentation de l'énergie d'allumage et l'établissement de la flamme initiale dans une région où l'intensité de la turbulence est réduite peut engendrer le cas contraire. Bray [13] a étudié l'interaction entre la turbulence et la combustion d'un point de vue modélisation. Les effets de la combustion sur la structure de turbulence et ceux de la turbulence sur les taux de réactions chimiques ont été discutés. Bell et al [14] ont étudié le comportement d'une flamme turbulente de méthane-air. La simulation a été effectuée en utilisant une algorithmique adaptative dépendante du temps à faible nombre de Mach pour la combustion, basée sur une formulation du type (S.O.P) (Second Order Projection). Le mécanisme cinétique complet pour le méthane a été modélisé en utilisant un schéma (D.R.M19) : 20 espèces, 84 réactions dérivées de celui du GRFM Mech1-2. Leurs résultats ont indiqué que le plissement dans la flamme est le facteur déterminant menant à l'augmentation de la turbulence de la flamme.

Plusieurs modèles avancés ont été proposés pour modéliser l'écoulement thermique turbulent. Ces modèles incluent les modèles à deux équations [15] algébriques explicites [16, 17, 18] et implicites [19]. Daly et Harlow [16] ont présenté un modèle explicite algébrique simple appelé Hypothèse de diffusion de gradient généralisée (GGDH) pour l'écoulement turbulent qui a été défini en fonction du tenseur de contrainte de Reynolds, du gradient de température et de l'énergie cinétique de la turbulence. Suga et Abie proposent un modèle du second ordre comme modèle de diffusion généralisée de gradient d'ordre élevé (HOGGDH) [18, 20]. Le modèle HOGGDH a plus de temps de calcul et de précision que ceux de GGDH.

Wikstrom et coll. [17] ont fourni un modèle algébrique et explicite complet pour la turbulence du flux thermique qui se compose de quatre phrases principales comprenant la production, la distribution moléculaire et la turbulence, la pression et le taux de dissipation du flux thermique.

Dans des études antérieures, divers modèles algébriques (SED, GGDH, HOGGDH) ont été réalisés pour modéliser les flux de chaleur de turbulence dans des flux tels que le transfert de chaleur du jet incident [21], les flux de refroidissement de film [22-24] et les flux de tuyaux [25]. Les résultats d'études précédentes montrent que l'utilisation de modèles algébriques d'ordre supérieur conduit à une augmentation de la précision de la prédiction de la distribution de la température, en particulier dans les zones avec des gradients sévères (élevés). Dans les simulations numériques d'écoulements de combustion turbulents basés sur RANS, le modèle simple de SED avec l'hypothèse d'un nombre de Prandtl turbulent constant a été utilisé. Des

études montrent que le modèle SED avec un nombre de Prandtl turbulent constant, en particulier dans les zones à gradient de température élevé, est inefficace. Par conséquent, l'utilisation de modèles d'ordre élevé de flux thermique turbulent peut conduire à une augmentation de la précision de prédiction des caractéristiques de température et de combustion.

1.2. Objectif du travail:

Le présent travail aborde un nouvel effort pour améliorer des émissions de NO_x dans la combustion non pré mélangée de différents carburants. Une chambre de combustion axisymétrique dans une condition stœchiométrique est simulée numériquement en utilisant les équations de Navier-Stokes **RANS** (*Reynolds Averaged Navier Stokes equations*). Le modèle k-ε réalisable est appliqué pour modéliser la turbulence et le modèle de dissipation des tourbillons est adopté pour prédire la vitesse de réaction chimique turbulente. Le mécanisme de Zeldovich est appliqué pour estimer l'émission de NO.

1.3. Contenu du mémoire:

En plus de cette introduction qui constitue une recherche bibliographique du mémoire, ce dernier contient quatre chapitres principaux:

Le premier chapitre présente un rappel sur les propriétés physiques et chimiques des carburants. Essence, Diesel et Gaz de pétrole liquéfié (GPL), ainsi le pouvoir calorifique.

Le deuxième chapitre comportera une présentation générale sur la combustion et les flammes laminaires et turbulentes. Ainsi les caractéristiques de combustion sur les moteurs automobiles.

Le troisième chapitre contient l'effet de la pollution sur l'environnement, sur le sol et sur les milieux aquatiques et sur la santé humaine. Ainsi la formation de ces polluants et la méthode de réduction des polluants dans les moteurs automobiles.

Le quatrième chapitre comportera une présentation générale du code de calcul fluent utilisé comme outil pour la modélisation de la combustion. Une formulation mathématique des équations de l'aérothermochimie des écoulements réactifs turbulents et d'une présentation du problème étudié.

Enfin, le cinquième chapitre présente l'application du modèle mathématique sur un banc d'essai expérimental en utilisant un code de calcul CFD, ainsi que l'ensemble des résultats obtenus et de leur discussion.

Chapitre 1 Propriétés des carburants

1.1. Introduction:

Un carburant est un combustible qui alimente un moteur thermique, celui-ci transforme l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique. Comme son nom l'indique, un carburant contient du carbone, dans le cas de l'hydrogène par exemple on parlera de combustible, le carburant est souvent un liquide et parfois un gaz, il est stocké dans le réservoir des véhicules (environ 50L).

Les carburants peuvent être classés de différentes manières, on peut par exemple distinguer les carburants fossiles et des biocarburants.

Les carburants fossiles sont ceux qui proviennent de la transformation des matières organiques mortes mélangées à divers minéraux à de grandes profondeurs, cette transformation nécessite plus d'un million d'années et se déroule à des températures et pressions très élevées, les carburants fossiles sont en quantité limitée sur terre, les carburants issus du pétrole sont aussi appelés hydrocarbures.

Les biocarburants eux, proviennent de plantes ou animaux (non fossilisés), parmi les produits développés commercialement, citons le bioéthanol et le biodiesel. La principale voie d'obtention des carburants les plus courants est le raffinage du pétrole on appelle « raffinage » l'ensemble des opérations visant à transformer le pétrole brut extrait du gisement en produits utilisables : combustibles, carburants, produits de base de l'industrie chimique [26].

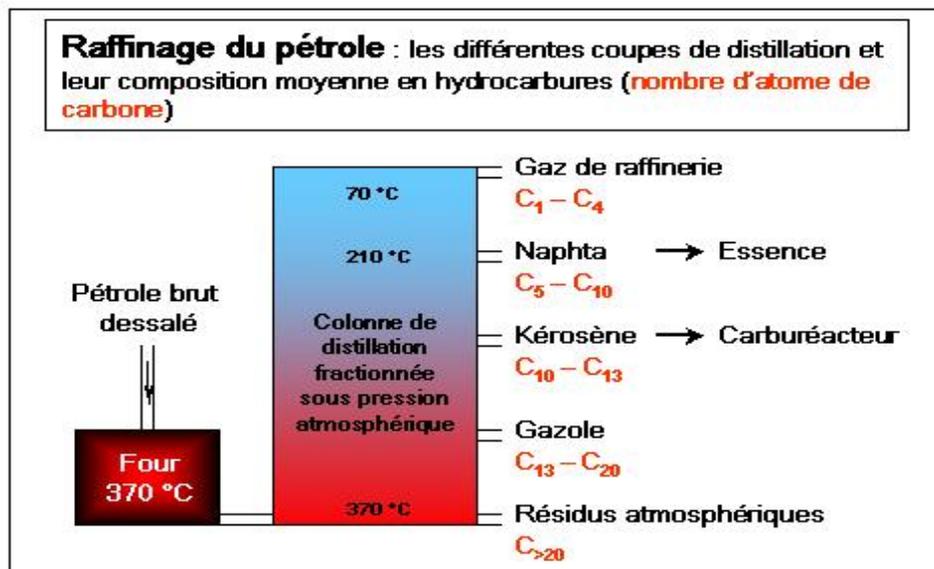


Figure 1: Raffinage du pétrole [27].

Le schéma donne une vision simplifiée de la chaîne de raffinage. Le pétrole brut contient toujours une certaine quantité d'eau salée, elle est extraite au cours de l'étape de dessalage, il subit ensuite une séparation de ses constituants par distillation fractionnée sous pression

atmosphérique, les colonnes utilisées peuvent atteindre soixante mètres de haut le long desquels la température varie entre 370 et 70 °C, elles sont conçues pour que les produits puissent être retirés à différentes hauteurs, on parle des «coupes de distillation» [27].

1.2. Propriétés physiques et chimiques des carburants:

1.2.1. Essence:

1.2.1.1. Définition:

L'essence utilisée comme carburant dans le moteur thermique ou moteur à explosion à un mélange d'hydrocarbures auxquels sont parfois ajoutés d'autres produits combustibles. Les essences contiennent généralement environ 230 hydrocarbures différents qui comprennent entre 4 et 10 atomes de carbone. Les essences sont composées de 5 classes principales d'hydrocarbure : Les n-alcanes, les iso alcanes, les, les alcènes et les aromatiques. Les aromatiques sont majoritairement présents.

L'essence contient aussi des composés oxygénés (des éthers ou des alcools) en proportion significative. Ces composés permettent d'améliorer certaines caractéristiques de l'essence comme l'augmentation de l'indice d'octane. L'essence se présente sous une couleur jaune très pale voire transparente. Elle est par ailleurs fortement odorante, facilement inflammable et très volatile [28].

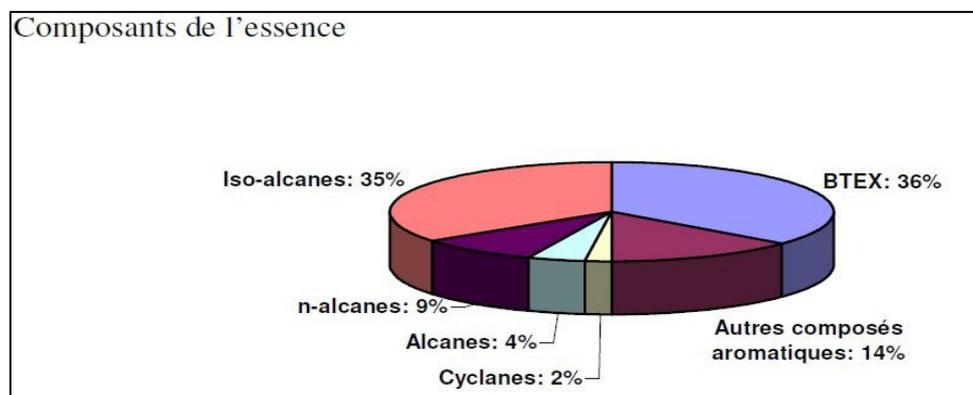


Figure 2: Exemple de composition d'une essence européenne [29].

1.2.1.2. Propriété physique:

La masse volumique et la volatilité exprimée par la courbe de distillation et la pression de vapeur constituent les caractéristiques physiques des carburants les plus importantes pour obtenir un fonctionnement satisfaisant du véhicule en toutes circonstances.

- **Masse volumique des essences**

Elle est généralement mesurée à 15 °c, au moyen d'un aréomètre ; elle s'exprime en kg/l avec une précision de 0.0002 à 0.0006 selon la catégorie d'aréomètres utilisés. Cependant, en pratique, on ne conserve fréquemment que trois décimales.

La masse volumique varie avec la température selon la relation :

$$\rho_T = \rho_{15} - k(T - 15)$$

Où T représente la température en °c, ρ_T et ρ_{15} la masse volumique respectivement à T °c et à 15 °c : k est un coefficient numérique qui, pour les essences est proche de 0.00085 ainsi, lorsque la température s'est élevée de 15°C à 25 °c par exemple. Diminue de 0.008 soit environ 1%. Ces fluctuations bien que faibles en valeur absolue, doivent évidemment être prises en compte dans les diverses transactions commerciales liées au stockage et à la distribution des essences.

- **Volatilité des essences**

Méthodes de caractérisation : La volatilité des carburants s'exprime par une ou plusieurs caractéristiques : courbe de distillation, pression de vapeur, plus rarement, rapport V/L. Nous décrirons brièvement ici la méthode de détermination et la signification de ces grandeurs

- **Courbe de distillation.**

La courbe de distillation représente l'évolution de la fraction distillée en volume, à pression atmosphérique, en fonction de la température, dans un appareillage approprié. Cette technique s'appelle fréquemment « distillation ASTM ».

- **pression de vapeur**

La pression de vapeur d'un mélange complexe, à une température donnée, est la pression pour laquelle s'établit l'équilibre liquide-vapeur. Un liquide est d'autant plus volatil que sa pression de vapeur est forte [28].

1.2.1.3. Propriété chimique:

❖ Indice d'octane

L'indice d'octane caractérise la résistance à l'auto-inflammation des carburants. Cette caractéristique est étudiée sur un moteur expérimental au laboratoire conçu spécialement pour cet usage. Appelé moteur CFR (Coopérative Fuel Research), il s'agit de mesures comparatives où le comportement du carburant s'exprime par un nombre sans dimension compris entre 0 et 100, avec une possibilité jusqu'à 120. Dans le cas d'un cliquetis, il s'agit d'une auto-inflammation instantanée et en masse d'une partie de la charge non encore brûlée et portée à température et pression élevées par le mouvement du piston et par dégagement d'énergie de la propagation du front de flamme. Il en résulte une augmentation

locale très forte de la pression suivie de vibration de la masse gazeuse brûlée. Deux hydrocarbures sont donc pris :

- **Isooctane:** Très résistant à l'auto-inflammation. On lui attribue l'indice 100.

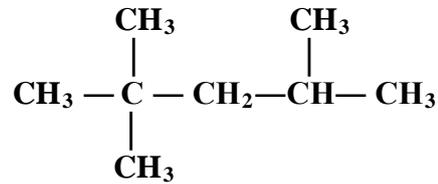


Figure 3: L'Isooctane.

- **n-heptane:** Auto-inflamant facilement, qui reçoit l'indice 0.



Figure 4: n-heptane.

Le carburant testé présente un indice d'octane de X s'il se comporte comme un mélange de X% d'isooctane et de (100 - X) % de n-heptane. Ces tests sont effectués dans un moteur de référence appelé Moteur CFR (Coopérative Fuel Research).

$$\text{Indice d'octane} = 100 + \frac{28.28 T}{1 + 0.736 T + (1.0 + 1.472 T - 0.435216 T^2)}$$

T désigne la teneur en PTE en millilitres par gallon (1 gal = 3.785 L).

Exemple: une addition de 0.40 g pb /litre dans l'isooctane, on obtient par définition un indice d'octane de 110,8 [30]. Normes algériennes pour l'indice d'octane:

- Essence Normal : entre 89 et 92
- Essence Super : entre 97 et 99
- Essence sans plomb : 95

1.2.1.4. Propriétés physico-chimiques:

Les propriétés physiques et chimiques des essences sont répertoriées dans le tableau suivant:

Tableau 1: Propriétés physico-chimiques des essences [29]

Température De vaporisation	Solubilité Dans l'eau	Masse volumique à 15 c	Température d'auto-inflammation	Limites d'explosivité dans l'air	Pression de vapeur saturante
25 à 220 °c	De 100 à 250 mg/l	De 680 à 790 kg/m ³	450°c	Inferieur : 1.4%vol Supérieur : 7.6 %vol	De 350 à 900 hpa

1.2.2. Diesel:

1.2.2.1. Définition:

Le diesel ou gazole, est très largement utilisé comme carburant automobile dans les moteurs à allumage par compression. Le gazole est un liquide incolore ou légèrement jaune qui présente une odeur de pétrole. Les gazoles contiennent 2000 à 4000 hydrocarbures différents, dont le nombre d'atomes de carbone varie entre 11 et 25. Les gazoles sont donc plus lourds que l'essence et sont composés de produits moins volatils. Ils ne contiennent pas d'alcane et sont majoritairement constitués de n-alcane et cyclo alcane. Contrairement au moteur à essence, le carburant diesel doit s'enflammer facilement pour que le moteur fonctionne de manière optimale. Cette aptitude à allumage est définie par l'indice de cétane [30].

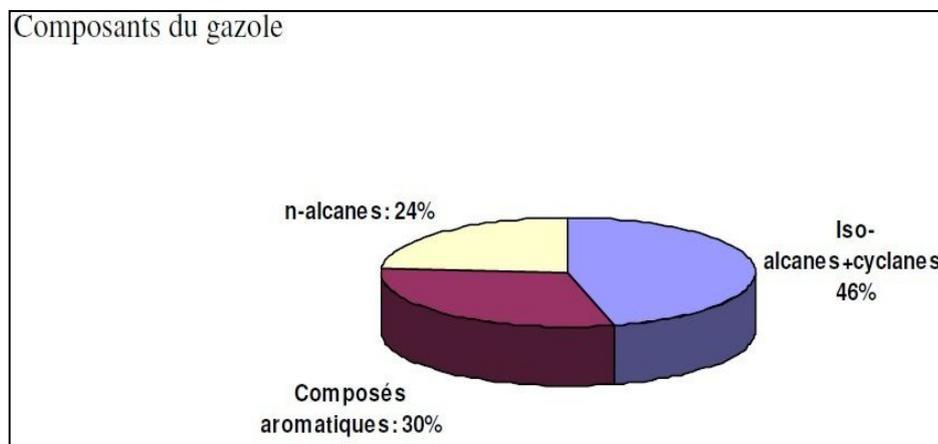


Figure 5: Exemple de composition d'un gazole européenne [29].

1.2.2.2. Propriété physique [30]:

- **Masse volumique**

La masse volumique doit être comprise, selon les spécifications européennes (EN590), entre 0.820 et 0.860 kg/l. L'imposition d'une valeur minimale de masse volumique se justifie par le souci d'obtenir d'une puissance maximale suffisante pour le moteur, au moyen d'une pompe d'injection dont le réglage du débit s'effectue en volume. Par ailleurs, on fixe une limite maximale à la masse volumique afin d'éviter la formation de fumées à pleine charge qui seraient dues à un accroissement de richesse moyenne dans la chambre de combustion.

- **Courbe de distillation**

La nécessité de réaliser une injection sous haute pression et une pulvérisation de fines gouttelettes au moyen d'un injecteur impose, pour le gazole, des caractéristiques de volatilité bien précises. Les spécifications françaises et européennes fixent deux critères délimitant une volatilité minimale et maximale. Ainsi la fraction distillée (% volume) doit être:

- Inférieure à 65 % pour une température de 250 °C,

- Supérieure à 85 % pour une température de 350 °C,
- Supérieure à 95 % pour une température de 370 °C,

Le point initial et le point final de distillation ne font pas l'objet de spécification car leur détermination n'est généralement pas très précise : les valeurs mesurées sur les produits commerciaux se situent entre 160 et 180 °C pour le premier, entre 350 et 385 °C pour le second.

- **Viscosité**

Elle doit être comprise entre les limites précises, si un carburant trop visqueux augmenterait les pertes de charge dans la pompe et les injecteurs, ce qui tendrait à réduire la pression d'injection, à détériorer la finesse de pulvérisation et finalement à affecter le processus de combustion. A l'inverse, une viscosité insuffisante pourrait provoquer le grippage de la pompe d'injection. Les spécifications officielles du gazole ne fixaient qu'une viscosité maximale (9.5 mm²/s) à une température de 20°C. Désormais, on définit une fourchette (2.5 mm²/s minimum – 4.5 mm²/s maximum) à 40 °C, ce qui semble plus représentatif du fonctionnement d'une pompe d'injection.

1.2.2.3. Propriété chimique [30]:

- ❖ **Indice de cétane**

C'est une mesure qui représente le délai d'allumage du gazole, c'est à dire le temps que met le combustible à s'enflammer à partir du moment où il est injecté. Dans un moteur Diesel, contrairement à celui à explosion, il est nécessaire que le gazole présente une structure chimique favorable à l'auto-inflammation. Cette qualité s'exprime par l'indice de cétane.

Le comportement du gazole est comparé à celui de deux hydrocarbures purs, choisis comme référence :

- **Le n-cétane ou hexa décane:** Auquel on attribue l'indice 100



Figure 6: Le hexa décane.

- **L'α-méthyl-naphtalène:** Qui reçoit l'indice 0

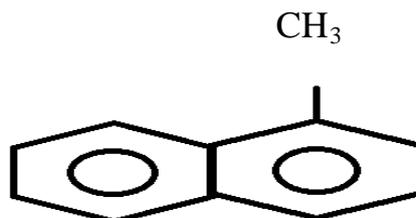


Figure 7: α-méthyl-naphtalène

Un gazole présentera un indice de cétane X, s'il se comporte comme un mélange binaire de n-cétane et de (100 - X) % d' α - méthyle-naphtalène. En réalité, en préfère à ce dernier le HMN (heptane-méthyl-nonane), qui présente un indice de cétane de 15.

$$IC=Y+0.15(100 - Y)$$

Y : %den-cétane.

La mesure se fera dans un moteur CFR équipé d'une chambre de combustion Diesel. L'indice de cétane n'a pas d'effet direct sur le moteur et son rendement, par contre il permet d'éviter les démarrages difficiles à froid, limiter les fumées et les bruits ainsi que la pollution. Pour les zones à climat « tempéré », les normes demandent un indice de cétane minimal de 49, et les constructeurs de 50. Généralement, il se situe entre 50 et 55. Pour les zones très froides dites « arctique », les normes se situent dans une fourchette comprise entre 45 et 50.

1.2.2.4. *Propriétés physico-chimiques:*

Les propriétés physiques et chimiques des gazoles sont répertoriées dans le tableau 2.

Tableau 2: Propriétés physico-chimiques des gazoles [29].

Température d'ébullition	Solubilité dans l'eau	Masse volumique à 15°C	Limites d'explosivité dans l'air	Pression De vapeur saturante
170 –390 °c	Très peu soluble	0.82–0.89 g/cm ³ à 15 °c	Inférieure : 1%vol Supérieure : 6%vol	1hpa à 20 °c

1.2.3. *Gaz de pétrole liquéfié (GPL):*

1.2.3.1. *Définition:*

Le gaz pétrole liquéfié est un mélange d'hydrocarbures légers stocke a l'état liquide, et issu du raffinage du pétrole pour 40% et du traitement du gaz naturel pour 60%. Les hydrocarbures constituant le GPL, sont essentiellement le propane (C₃H₈) et butane (C₄H₁₀), le mélange peut contenir jusqu'à 0,5% d'autres hydrocarbures légers tels que le butadiène.

Le GPL était autrefois considéré comme un résidu de l'extraction du pétrole et directement brule au sommet de torchères. Il est dorénavant récupéré par distillation, les fractions les plus nobles et le reste servent généralement de carburant, mais pour des appareils différents. Le GPL est utilisé comme carburant pour les véhicules. Le GPL est un gaz incolore et inodore. C'est un composé extrêmement inflammable et volatil et plus lourd que l'air. Pour déceler d'éventuelles fuites, un additif est ajouté au mélange de gaz pour permettre une détection

olfactive. Les GPL sont des hydrocarbures saturés dont les molécules sont composées d'atomes d'hydrogène et de carbone, majoritairement composés de coupes en C₃ et C₄.

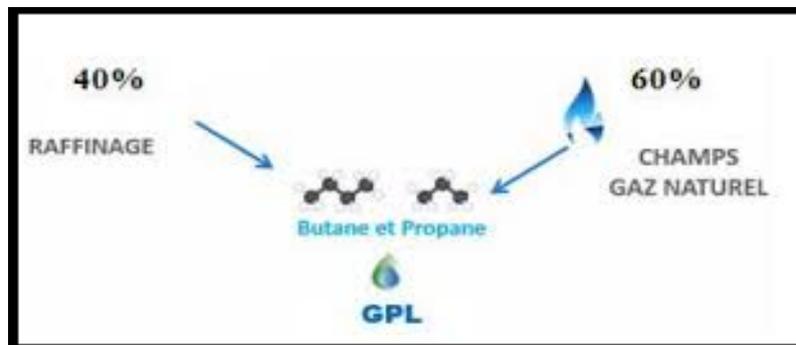


Figure 8: Origine du GPL [31].

1.2.3.2. Propriété physique [31]:

Le GPL a la particularité de pouvoir être liquéfié à température ambiante, sous une faible pression (3 bars). À pression atmosphérique, il se liquéfie à une température de l'ordre de 30°C.

- **Tension de vapeur**

C'est la pression à laquelle est maintenu un gaz à l'intérieur d'un récipient pour qu'il reste à l'état liquide. Le GPL soumis à des températures supérieures aux points d'ébullition du propane et du butane qui ne peuvent être amenés à l'état liquide que sous pression ou par réfrigération. Le GPL à une tension de vapeur à 20 °C égale à :

- Pour le butane = 2 bars.
- Pour le propane = 8 bars.

À noter que plus la température est élevée plus la pression augmente.

- **Densité**

À l'état gazeux, le GPL est plus lourd que l'air .

- **Expansion (Dilatation)**

À l'état liquide, le GPL a un coefficient de dilatation important dont il faut tenir compte lors de son stockage, car les sphères ne doivent jamais être remplies complètement.

- La dilatation du GPL est d'environ 0.25% par degré Celsius.

- **Température d'ébullition**

À la pression atmosphérique, la température d'ébullition du butane est de -1°C et celle du propane est de -40°C. À toute température inférieure à celle-ci, le butane et le propane sont à l'état liquide.

1.2.3.3. Propriété chimique [30]:

	Propriétés Chimiques	Conséquences Pratiques
Toxicité	Le Butane et le Propane ne sont pas toxique	
Couleur et odeur	Le GPL est incolore, soit à l'état vapeur ou liquide. À l'état naturel, le GPL est inodore. Il peut donner, au contact de l'air, des mélanges explosifs, pour des raisons de sécurité un odorant doit être ajouté. Cet odorant est à base de sulfures appelés Mercaptans. Le GPL que l'on trouve dans le commerce contient un additif odorant à base de soufre, afin de faciliter la détection des fuites.	L'odeur permet de signaler l'existence d'une fuite qui est recherchée avec un produit moussant, jamais avec une flamme.
Etat gazeux	Le GPL - aux conditions normales de pression et température est un gaz plus lourd que l'air.	En cas de fuite, il a tendance à s'accumuler dans les points bas.
Etat liquide	Le GPL liquide est plus léger que l'eau.	Les réservoirs sur les terrains inondables (instables) doivent être ancrés parce qu'ils risqueraient de flotter en cas d'inondation.
Action sur les composés organiques	Le GPL dissout les graisses, les huiles et les vernis.	Les joints et les triangles doivent être en caoutchouc synthétique de qualité appropriée.
Solubilité	Il est insoluble dans l'eau.	
Fluidité	Très fluide à l'état liquide et gazeux.	Le choix et la réalisation des circuits d'alimentation doivent se faire soigneusement.

Impuretés	<p>Le GPL produit au niveau des différents champs doit répondre aux spécifications suivantes:</p> <p>-Teneur en gaz sec inférieure ou égale à 3 % mol.</p> <p>-Teneur en condensât inférieure ou égale à 0.4 % mol.</p>	
-----------	---	--

1.2.3.4. Propriétés des carburants physico-chimiques:

Les propriétés physiques et chimiques du GPL sont répertoriées dans le tableau suivant:

Tableau 3: Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures composants le GPL [29].

	Masse volumique	Température d'ébullition	Limites d'explosivité dans l'air	Température d'auto-inflammation
Butane	A l'état liquide : 0.59 kg/dm ³ A l'état gazeux : 2.44 kg/m ³	0°C	Inférieure : 1.8 %vol Supérieure : 9 %vol	525°C
Propane	A l'état liquide : 0.56 kg/dm ³ A l'état gazeux : 1.87 kg/m ³	-44°C	Inférieure : 2.2 %vol Supérieure : 10 %vol	535°C

1.3. Propriétés thermiques des carburants [32]:

Le Pouvoir calorifique d'un combustible (ou d'un carburant) est l'énergie libérée par sa combustion, à pression constante et dans les conditions normales de température et de pression (c'est -ç-dire à 0 °c et sous une pression 1013 mbar). Cette donnée permet de comparer différents combustible (ou carburant).

La combustion d'un hydrocarbure génère, entre autre, de l'eau de vapeur. Certaines techniques permettent de récupérer une quantité d'énergie supplémentaire contenue dans cette donnée permet de comparer différents combustion en la condensant (chaudière à condensation).

On distingue donc deux pouvoirs calorifiques :

- **Pouvoir calorifique inférieur (PCI) :** C'est l'énergie (par unité de masse) libérée par la combustion d'un combustible, les fumées contenant de l'eau vapeur :

$$Q = m_{\text{combustible}} P_i$$

- Q désigne l'énergie fournie sous forme de chaleur par la combustion [J]
- $m_{\text{combustible}}$ désigne la masse de combustible (ou carburant) consommé [kg]

- P_i désigne le Pouvoir calorifique inférieur
- **Pouvoir calorifique supérieur (PCS) :** C'est l'énergie (par unité de masse) libérée par la combustion d'un combustible à laquelle vient s'ajouter l'énergie libérée par la condensation de la vapeur d'eau des fumées

$$Q' = m_{\text{combustible}} P_s$$

- Q' désigne l'énergie totale récupérée sous forme de chaleur [J]
- P_s désigne le Pouvoir calorifique supérieur

La thermodynamique permet de calculer quelle énergie peut être récupérée lors de la condensation de l'eau présente dans les fumées. On obtient ainsi l'expression suivante :

$$Q' = Q + m_{\text{eau}} L_v$$

m_{eau} désigne la massed'eau produite lors de la combustion [kg]

$L_v = 2.26.10^6 \text{ J.kg}^{-1}$:chaleur latente de vaporisation de l'eau [J.kg⁻¹]

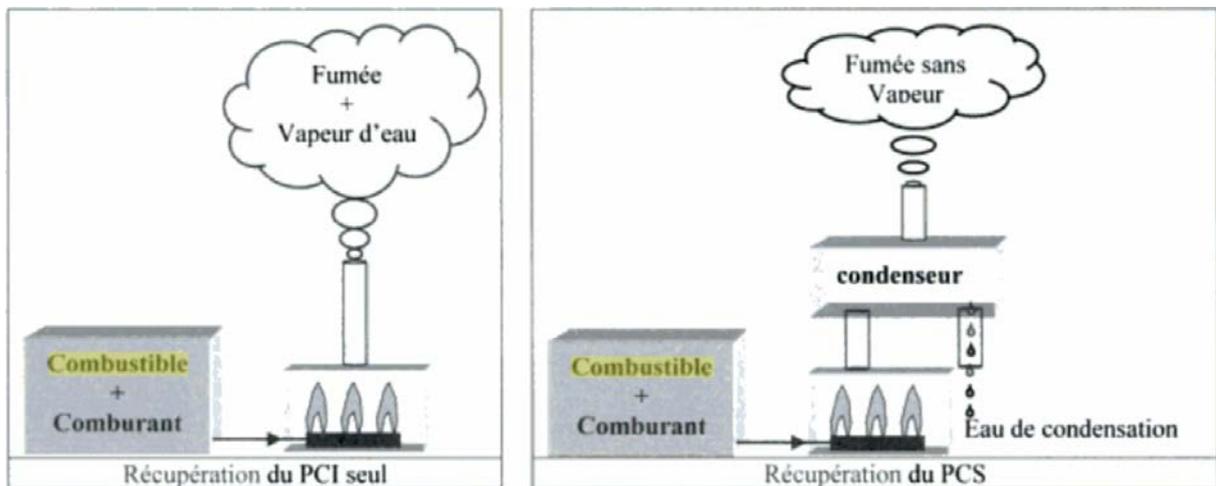


Figure : Pouvoir calorifique inférieur et supérieur

Exemple de PCI :

Tableau : Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

substance	Masse volumique	PCI
CH ₄	0.72 kg.m ⁻³	50 MJ.kg ⁻¹
GPL	2.25 kg.m ⁻³	46.1 MJ.kg ⁻¹
Essence super	780 kg.m ⁻³	43.5 MJ.kg ⁻¹
Carburant diesel	850 kg.m ⁻³	42.5 MJ.kg ⁻¹
kérosène	800 kg.m ⁻³	43 MJ.kg ⁻¹

Chapitre 2

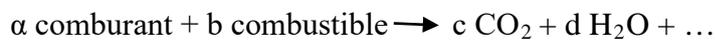
Combustion

2.

2.1. Définition de la combustion:

La Combustion est une science pluridisciplinaire (chimie, mécanique des fluides, thermodynamique, modélisation informatique, physique des systèmes dynamiques...), et est une réaction chimique, exothermique au début lente mais pouvant devenir en suite rapide et même violente, avec émission de rayonnement et élévations de température avec un dégagement de chaleur.

La réaction de combustion est globalement une réaction d'oxydoréduction ou l'oxydant est appelé comburant (oxygène pur ou dilué, ozone, chlore, nitrates, etc.) et le réducteur combustible (H_2 , CO, hydrocarbure, etc.) se déroulant suivant un mécanisme complexe, si cette réaction oxydait de façon maximale le combustible, on pourrait écrire globalement:



• Les Applications industrielles de la combustion

- Moteurs à combustion interne (essence, Diesel).
- Turbine à gaz.
- Chaudières industrielles et domestiques.
- Statoréacteur, turboréacteur.

En pratique la combustion peut avoir lieu de manière incontrôlée dans les incendies et dans les explosions ou de manière contrôlée, sur les brûleurs, dans les moteurs fusés, dans les moteurs à combustion interne...

La combustion est aujourd'hui un des principaux moyens de conversion de l'énergie. Elle est utilisée dans de nombreux systèmes comme la production de l'énergie thermique (chaudières ou fours domestiques et industriels) ou de l'électricité (centrales thermiques), que pour le transport (moteurs automobiles et aéronautiques, moteurs fusée, ...) ou encore la destruction de déchets [33].

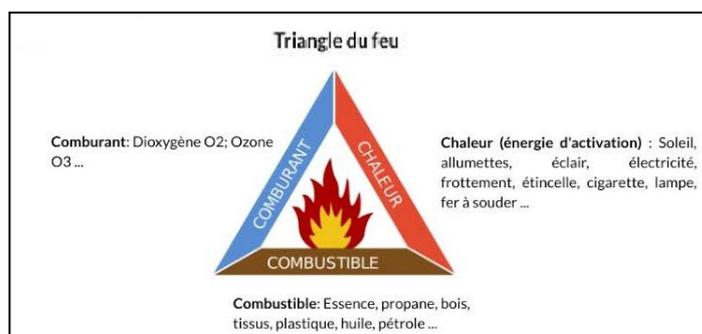


Figure 1: Triangle du feu [34].

2.2. Déroulement d'une combustion [35]:

2.2.1. Température d'inflammation:

L'expérience montre que pour déclencher le phénomène de combustion, il faut porter le mélange à une certaine température appelée température d'inflammation (ou d'allumage). En effet, pour que la réaction chimique s'amorce, il faut que les effets suivants interviennent :

- **Effet de dissociation:** les molécules de combustible et d'oxygène O_2 sont décomposées en radicaux ou en atomes, ou encore en groupes d'atomes.
- **Effet d'activation:** les mêmes molécules sont portées à un niveau d'énergie plus élevé.

Ces deux effets augmentent avec l'agitation moléculaire, c'est-à-dire avec la température. En pratique, il suffit d'augmenter localement la température du mélange soit par une flamme, soit par une étincelle électrique (allumage). La combustion peut ensuite se propager sous différentes formes, à savoir explosion, flamme, détonation ou déflagration.

2.2.2. Explosion et flamme:

2.2.2.1. Description:

Une explosion est un phénomène dont le déroulement s'explique à l'aide des mécanismes de la conduction thermique et de la diffusion. Pour qu'une combustion se propage par explosion, il faut que l'énergie mise en jeu par la réaction chimique suffise à porter à la température d'inflammation les zones voisines de la zone allumée, et ainsi de proche en proche. Lorsque la vitesse de combustion est faible et qu'il y a émission de lumière, on parle plus volontiers de flamme que d'explosion.

2.2.2.2. Vitesse de combustion:

Le front de la combustion se propage à une vitesse, appelée vitesse de combustion, qui dépend des propriétés physique et chimique du mélange et des parois, figure 2 montre front de flamme, La Vitesse de combustion est d'autant plus élevée:

- que le pouvoir énergétique du combustible est grand.
- que le coefficient de conduction du mélange est grand
- que la vitesse de diffusion des particules dissociées et activées est élevée.

Elle est d'autant plus faible :

- que les chaleurs spécifiques du mélange son grandes.
- que la température d'inflammation du mélange est élevée.

Enfin, elle dépend de la température et de la géométrie des parois.

En pratique, on exploite le fait que la vitesse de combustion dépend de la température et de la géométrie des parois pour faire varier. En générale, les parois sont à une température inférieure à la température de combustion, de sorte que leur présence diminue la vitesse de combustion. Inversement, il est possible d'augmenter la vitesse de combustion par des actions catalytiques.

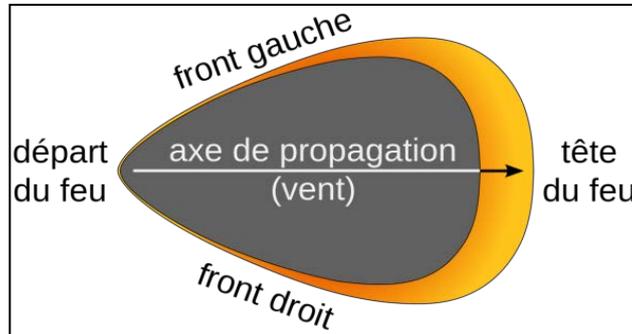


Figure 2: Front de flamme [34].

2.2.2.3. Limites d'inflammabilité:

Examinons maintenant le fait que la vitesse de combustion dépend de la composition du mélange.

- Si l'on diminue le facteur d'air λ au-dessous de la valeur 1, la combustion est de moins en moins complète et la vitesse de combustion diminue
- Si l'on augmente le facteur d'air λ au-dessus de la valeur 1, la combustion est certes complète, mais elle est de moins en moins active par suite du phénomène de dilution du à l'air en excès, et la vitesse de combustion diminue.

2.2.2.4. Vitesse de combustion maximale:

L'expérience montre que la Vitesse de combustion maximale n'a pas lieu avec le mélange stœchiométrique, mais avec mélange caractérisé par un excès d'air, c'est-à-dire par une valeur de λ supérieure à 1.

2.2.2.5. Rapidité de propagation:

La rapidité avec laquelle la combustion se propage dépend non seulement de la vitesse de combustion, mais aussi du mouvement de convection du mélange, elle est fortement augmentée par la turbulence.

2.3. Caractéristiques de combustion [34]:

2.3.1. 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.

2.3.2. *Combustion lente:*

La combustion lente est une réaction se réalisant à des températures peu élevées. On peut citer le cas de la respiration cellulaire : cette lenteur est due à des enzymes spécifiques permettant d'augmenter les réactions d'oxydoréduction et ainsi d'obtenir un très bon rendement par récupération d'une grande partie de l'énergie.

2.3.3. *Combustion complète ou stœchiométrique:*

Lors d'une combustion complète, le réactif réagira avec le comburant jusqu'à former des produits qui ne pourront plus être oxydés, c'est-à-dire que ces produits ne peuvent plus réagir avec le comburant. Dans le cas d'un hydrocarbure réagissant avec le dioxygène, les produits de combustion sont le dioxyde de carbone et l'eau. Une combustion complète permet d'obtenir la quantité maximale d'énergie disponible par une substance et cette énergie est définie comme étant le pouvoir calorifique.

2.3.4. *Combustion turbulente:*

La combustion turbulente est une combustion caractérisée par des flux de chaleur. Elle est souvent utilisée dans l'industrie (par exemple, les turbines à gaz et les moteurs à allumage commandé) car la chaleur facilite l'opération de mélange entre le combustible et l'oxydant.

2.3.5. *Combustion incomplète:*

La combustion incomplète a lieu quand la quantité de comburant est insuffisante 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 des résidus de combustion, sous forme de cendres qui émettent des fumées.



Figure 3: Combustion complète du butane.



Figure 4: Combustion incomplète du butane.

2.4. Les moteurs automobiles [36]:

2.4.1. Généralités sur les moteurs à combustion interne automobile:

Dans un moteur thermique, une réaction exothermique (combustion) augmente la pression des gaz, dont on extrait un travail mécanique. Cela est fait par réaction chimique entre un carburant, généralement majoritairement constitué de molécules réactives, et un oxydant, souvent l'air constitué à 21% de molécules d'oxygène (O_2). La richesse ϕ désigne le ratio entre la proportion de carburant et la proportion d'oxydant, normalisée par le facteur adéquat pour que la richesse 1 représente une réaction stœchiométrique. Un mélange à $\phi < 1$ (excès d'oxydant) est dit pauvre, à $\phi > 1$ (excès de carburant) riche. Dans les moteurs automobiles, la combustion a lieu dans une chambre de combustion délimitée par une culasse, une chemise et un piston. Le piston a un mouvement de va-et-vient entre le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB); la différence de ces volumes est la cylindrée unitaire. Ce mouvement dans le cylindre est converti en un mouvement de rotation du vilebrequin qui est ensuite transmis aux roues. Le rapport entre le volume au PMB et le volume au PMH (ce dernier étant également appelé volume mort) est le rapport volumétrique de compression (RVC). Un point de fonctionnement moteur est souvent caractérisé par le régime, c'est-à-dire la vitesse de rotation du vilebrequin, et la charge qui désigne la quantité de carburant brûlée.

La majorité des moteurs thermiques automobiles fonctionne selon un cycle quatre temps présenté sur la figure 5. Un système de soupapes permet de faire entrer (admission) ou sortir (échappement) des gaz de la chambre; comme l'admission se termine près du PMB, les gaz sont comprimés par le mouvement du piston (phase de compression) ce qui permet d'atteindre des conditions thermodynamiques favorables à la combustion près du PMH. On distingue plusieurs types de moteurs selon la façon dont le carburant est brûlé dans la chambre, et le mode de combustion, on adoptera ici les termes suivants:

- **Allumage commandé:** une bougie crée une étincelle électrique dans un mélange oxydant-carburant, ce qui cause la propagation d'un front de flamme qui se propage dans la chambre en consommant les gaz frais.
- **Diesel:** seul l'oxydant est présent dans la chambre pendant la phase de compression; le carburant est ensuite injecté sous haute pression et brûle sous la forme d'une flamme de diffusion.

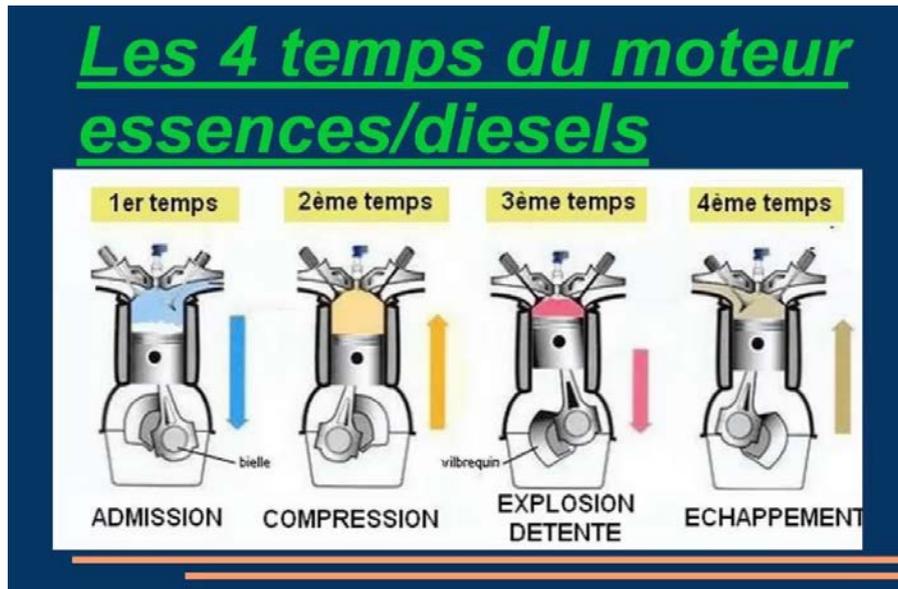


Figure 5: Moteur quatre temps.

2.4.2. Phénomènes de combustion dans les moteurs thermique [36]:

2.4.2.1. Allumage commandé / flamme de propagation:

Un mélange gazeux oxydant-carburant est enflammé à l'aide d'une décharge électrique dans la chambre de combustion, en genre par une bougie. Le timing de l'allumage est contrôlé par l'instant de cette décharge, d'où le terme d'allumage commandé (AC). La combustion se développe par propagation d'un front de flamme qui consomme les gaz frais, figure 6. Ce front de flamme se propage en échauffant les gaz frais situés juste devant lui par diffusion thermique, ce qui déclenche les réactions chimiques de combustion, tandis que l'arrière du front de flamme cesse de brûler après consommation totale des réactifs. La propagation de flamme est un phénomène complexe impliquant des interactions entre la thermique, la chimie et l'aérodynamique des gaz.

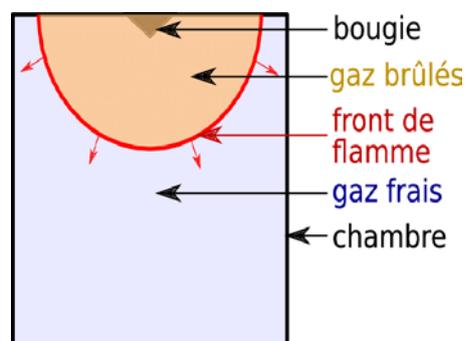


Figure 6: Allumage commandé et propagation de flamme dans une chambre à volume constant [36].

- Sources de transfert thermique pariétal:

Lors de la combustion, la chaleur engendrée par les réactions thermiques est absorbée dans les gaz frais et augmente leur température. Lorsque le front de flamme s'approche de la paroi, une partie de cette chaleur est transférée à celle-ci, ce qui refroidit d'autant les gaz ; ce transfert est d'autant plus important que le front de flamme soit proche. Dans une certaine distance, il se produit un phénomène d'extinction par coincement de flamme: la température des gaz est trop faible pour soutenir la flamme (en raison des pertes aux parois), et la combustion s'arrête. En termes d'échanges thermiques, comme le front de flamme est une zone de température très élevée (plus grande que la température moyenne des gaz brûlés, même dans l'hypothèse d'une combustion dans une enceinte adiabatique), des gradients thermiques importants (donc des flux intenses) sont créés lors de l'interaction flamme-paroi.

- **Cliquetis:**

L'une des limites de ce mode de combustion est le phénomène de cliquetis. Sous certaines conditions thermodynamiques, une partie des gaz frais peut s'auto-enflammer rêvant d'être atteinte par le front de flamme. Cette auto inflammation entraîne la propagation d'onde acoustiques qui peuvent endommager le moteur et qui sont caractérisées expérimentalement par des oscillations de pression dans la chambre à des fréquences de plusieurs kilohertz. Dans les cas extrêmes, cette auto-inflammation peut arriver avant même que l'allumage par la bougie n'ait été déclenché, on parle alors de pré-allumage.

Le cliquetis est relié au délai d'auto-inflammation du mélange oxydant-carburant, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que (à une certaine température et pression) le mélange oxydant-carburant brûle sans qu'il ait été allumé. Ce délai décroît généralement lorsque la température augmente (en raison de l'accélération des cinétiques chimiques) et lorsque la pression augmente (en raison de la réactivité chimique accrue). Ce phénomène est une limite importante pour l'allumage commandé à forte charge.

- **Point de fonctionnement typique:**

La propagation de flamme a été étudiée pour des richesses très variées. Cependant, pour le contexte industriel automobile, les différents polluants en sortie de moteur (oxydes d'azote, hydrocarbures imbrûlés, monoxyde de carbone) sont traités par un catalyseur trois voies, la dépollution n'est effective que si la richesse est extrêmement proche de 1. Les moteurs AC fonctionnent donc généralement à cette richesse. Un rapport de compression volumétrique plus grand permet en général d'obtenir une meilleure efficacité thermodynamique. Cependant, cela accroît également le risque de cliquetis.

2.4.2.2. Diesel / flamme de diffusion:

Seul le mélange oxydant est présent dans la chambre de combustion pendant la phase de compression. Le carburant est injecté près du PMH sous haute pression et forme un jet. Dans une première phase transitoire, le carburant s'évapore et s'auto-allume après un certain temps, appelé délai d'auto-inflammation. Une fois la combustion démarrée, la morphologie du jet se stabilise comme décrit sur la figure 7. Passé quelques millimètres après la sortie de l'injecteur, le carburant liquide s'évapore. Un gradient de richesse s'établit entre le centre du jet (quasiment entièrement du carburant) et les zones périphériques (quasiment entièrement du mélange oxydant). La zone réactive s'établit sur une zone de richesse intermédiaire, et se stabilise quand l'apport de carburant par diffusion depuis le cœur riche compense la consommation par réactions chimiques.

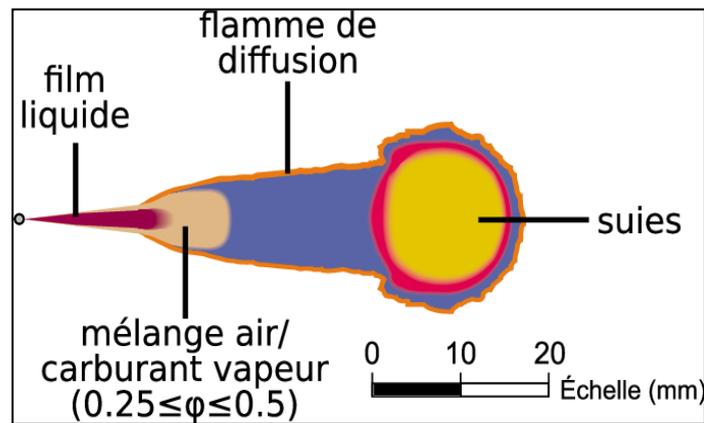


Figure 7: Flamme de diffusion stabilisée pour la combustion Diesel.

Supposons que la cinétique chimique soit infiniment rapide et complète. La zone de réaction est alors peu épaisse par rapport aux dimensions géométriques du jet, et la diffusion thermique est négligeable pendant la durée de la réaction. La température dans la zone de réaction se calcule alors par le bilan enthalpie: l'énergie chimique de réaction Q est entièrement convertie en chaleur. Cette température de flamme adiabatique est maximale pour $\phi = 1$, à richesse plus haute, une partie du carburant ne réagit pas, mais absorbe une partie de la chaleur de réaction. Cette température représente alors une borne supérieure des températures réellement atteignables dans la flamme. Selon le carburant, elle est généralement 1000 à 2000 K plus élevée que la température des gaz avant l'injection.

- **Sources de transfert thermique pariétal:**

Le jet Diesel a deux effets sur le transfert thermique, mi se évidence dans d'une part, le jet liquide entraîne des gaz et crée donc une intense turbulence locale ; cette turbulence intensifie les échanges thermiques gaz-paroi (convection) .Cet effet peut être mis en évidence indépendamment de la combustion par des expériences de jets non réactifs. D'autre part, la

combustion crée des zones réactives chaudes dans les gaz ; ceci augmente les gradients thermiques, donc les transferts thermiques.

- **Distance de lift-off:**

Une caractéristique importante de la combustion Diesel est la distance de lift-off du spray, c'est-à-dire la distance moyenne entre l'injecteur et la base de la flamme stabilisée. Cette distance détermine les échelles géométriques du jet. La distance de lift-off dépend de nombreux phénomènes (évaporation du jet, cinétique chimique, etc.).

- **Point de fonctionnement typique:**

Il est possible de définir une richesse globale de la combustion Diesel en comparant la quantité de carburant injectée à la quantité d'oxygène présent dans la chambre, mais la richesse est hautement inhomogène dans ce mode de combustion ; la combustion elle-même se produira à l'endroit où la richesse est la plus favorable. En général la zone réactive est proche de la ligne stœchiométrique (zone à richesse 1).

En Diesel, si la distance de lift-off est trop importante, divers effets peuvent survenir: en cas de mouillage des parois (impact du jet liquide sur la paroi), on observe une augmentation considérable des émissions de polluants.

2.4.2.3. Turbine à gaz:

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne, dont le rôle est la reconversion de l'énergie thermique due à la combustion d'un hydrocarbure en énergie mécanique (couple mécanique sur l'arbre de la turbine). Dans sa forme la plus simple et la plus répandue (figure 8). Cette machine est composée de trois éléments:

Un compresseur, généralement centrifuge ou axial, qui sert à comprimer l'air ambiant à une pression comprise dans les machines entre 10 et 30 bar environ.

Une chambre de combustion, dans laquelle un combustible injecté sous pression est brûlé avec l'air préalablement comprimé (ce dernier en fort excès afin de limiter la température des gaz brûlés en entrée de la turbine).

Une turbine, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz à haute température sortant de la chambre de combustion.

Une partie significative (60 à 70 %) du travail récupéré sur l'arbre de la turbine sert à entraîner le compresseur.

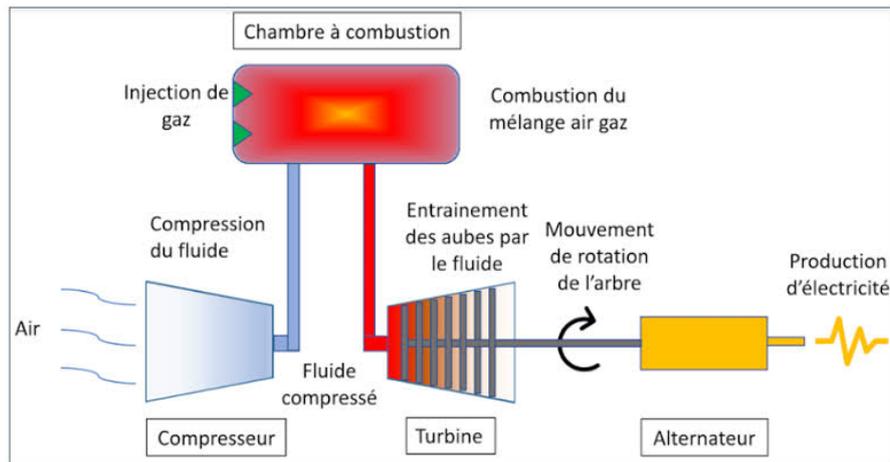


Figure 8: Turbine à gaz.

La turbine à gaz prend l'air atmosphérique et le comprime dans son propre compresseur, augmente la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion et convertie cette puissance en énergie mécanique utile pendant le processus de détente qui a lieu dans la section turbine. L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement en puissance utile à une machine réceptrice (alternateurs, pompes centrifuges, compresseurs de gaz...).

- **Section combustion:**

Informations générales: La section combustion de la turbine à gaz se compose du carter de combustion, de douze carters extérieurs de combustion, de douze ensembles coiffes et chemises de combustion, de douze ensembles de pièce de transition, de douze injecteurs de carburant, de deux allumeurs, de deux transformateurs d'allumage, de quatre détecteurs de flammes, de douze tubes d'interconnexion et de divers matériels de fixation et joints.

Le carburant est délivré à chaque chemise de chambre de combustion par injecteur monté sur la coiffe de la chambre de combustion et se prolongeant dans la chemise. La combustion du mélange carburant-air est amorcée par les allumeurs. Lorsque l'allumage se produit dans l'une des chambres, les gaz de combustion chauds circulent par les tubes d'interconnexion pour enflammer le mélange carburant-air dans les autres chambres.

Carter de combustion: L'enceinte de combustion assure le support des douze carters de combustion et renferme les douze pièces de transition. Il s'agit d'un carter soudé qui reçoit l'air en refoulement du compresseur à flux axial et le transfère aux chambres de combustion.

Chambre de combustion: Les douze chambres de combustion (manchons de débit, coiffes et chemises) sont montées à l'intérieur de l'enceinte de combustion, avec chaque coiffe et chemise reliées par tubes d'interconnexion.

Les injecteurs de carburant, montés sur les couvercles des chambres de combustion, se prolongent à l'intérieur des chambres et délivrent le carburant nécessaire pour la combustion. En cours de fonctionnement, l'air en provenance du compresseur circule dans l'enceinte de combustion et dans l'espace annulaire entre chemise de chambre et manchons de débit. Cet air haut pression circule dans la chemise, se mélange au carburant et s'enflamme. Les gaz chauds résultants descendent dans la chemise et la pièce de transition qui est bridée sur l'ensemble de la tuyère de premier étage. Les détecteurs de flammes installés au niveau de quatre chambres transmettent un signal au système de commande pour indiquer que l'inflammation s'est produite. (Voir les figures 9 et 10).

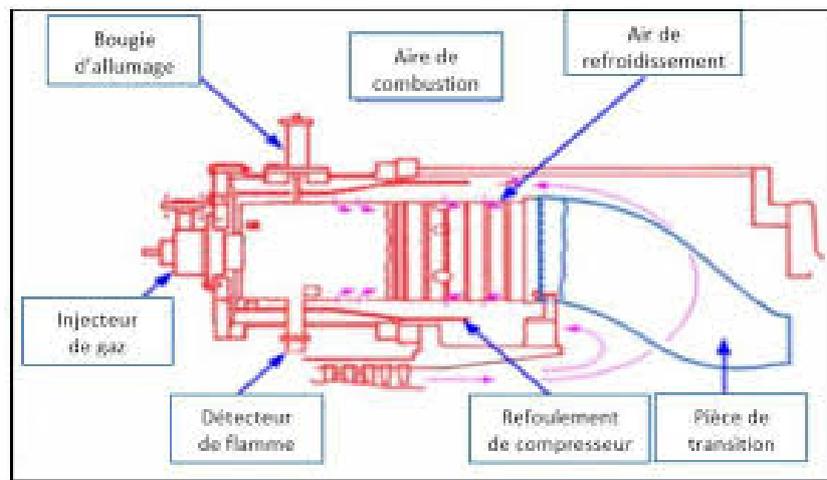


Figure 9: Schéma de Chambre de combustion.



Figure 10: L'enveloppe de combustion.

Allumeurs: La combustion du mélange carburant-air est amorcée par les allumeurs avec des électrodes rétractables. Deux allumeurs sont prévus au niveau de deux chambres de combustion (N° 9 N°10) et sont alimentés par des transformateurs d'allumage. Les autres chambres, sans allumeur, sont mises à feu avec la flamme provenant des chambres équipées d'un allumeur via des tubes d'interconnexion.

Détecteurs de flamme à ultraviolets: Au cours de la phase de démarrage, il est essentiel qu'un signal de présence de flamme soit transmis au système de commande. Pour cette raison, un système de surveillance de flamme est prévu. Il consiste en quatre capteurs installés sur quatre chambres de combustion adjacentes et en un amplificateur électronique monté sur le tableau de commande de la turbine.

Injecteurs de gaz: Chaque chambre de combustion est pourvue d'un injecteur qui délivre une quantité définie de carburant dans la chemise de combustion. Le combustible gazeux est admis directement dans chaque chambre par des orifices calibrés au niveau du bord extérieur de la pointe de l'injecteur. L'effet de la coiffe de la chemise induit un tourbillon dans l'air de combustion, en permettant ainsi une combustion plus complète et un fonctionnement essentiellement sans fumées de l'unité.

Tubes d'interconnexion: Les douze chambres de combustion sont reliées par l'intermédiaire de tubes d'interconnexion. Ces tubes permettent à la flamme provenant des chambres mises à feu et comportant des allumeurs de se propager aux autres chambres.

Le rôle de la chambre de combustion: Le rôle de la chambre de combustion est de fournir la quantité de chaleur nécessaire pour la turbine à gaz. Les formes des chambres de combustions sont étudiées pour remplir les conditions suivantes:

- La durée de vie la plus longue possible.
- Avoir un encombrement minimal.
- Garantir un bon allumage et la stabilité de la flamme.
- Assurer la combustion la plus complète possible.
- Eviter le dépôt de carbone sur les brûleurs et les parois ainsi que des fumées.
- Réduire les pertes de charge

2.4.2.4. La chaudière:

Le rôle d'une chaudière est de transmettre la chaleur produite par la combustion au fluide caloporteur (eau, vapeur, air, huile thermique...), voir la figure 11. Cette transmission, appelée "échange de chaleur" doit se réaliser de la meilleure façon possible afin d'éviter de gaspiller l'énergie fournie par le combustible. La transmission de chaleur s'effectue de 3

manière rayonnement, convection et par conduction. Le rôle d'une chaudière est essentiellement de transmettre de l'énergie apparaissant sous forme de chaleur (avec ou sans combustion) à de l'eau sous pression pour obtenir soit de l'eau surchauffée sous pression, soit de la vapeur ou un fluide à l'état supercritique devenant de la vapeur par détente. De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en générale associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique. Par contre, les sources de chaleur envisagées proviennent soit de la combustion de produits fossiles tels que charbon, pétrole, gaz naturel, soit de la combustion de sous-produits tels que fuel, gaz de raffinerie. Généralement une chaudière fonctionne en circuit fermé, le fluide chaud sort par une tuyauterie fixée sur sa partie haute et revient par une autre tuyauterie fixée sur sa partie basse après avoir circulé et s'être refroidi [37].

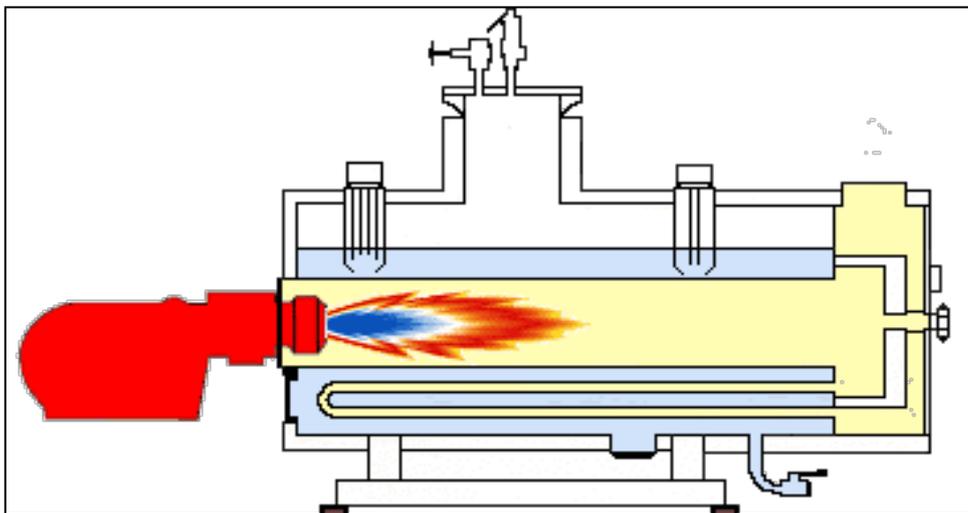


Figure 11: Chaudière industrielle.

- **Principaux composants d'une chaudière:**

Une Chaudière est constituée principalement de 3 composants:

Le Foyer (Chambre de Combustion): La flamme sera développée dans celle-ci. Le dimensionnement du foyer est déterminé selon la forme géométrique de la flamme. Il est évident que la flamme ne peut jamais entrer en contact avec les parois d'un foyer sous peine de provoquer une surchauffe localisée et d'endommager les parois de la chaudière. Cette chambre de combustion est conçue pour obtenir, à partir des gaz issus de la combustion, un travail ou une force, avant qu'il ne soient évacués. La Température de la flamme est entre 1000°C et 1200°C.

Le Brûleur: Le Brûleur a un rôle primordial dans la conception, la construction et le fonctionnement d'une chaudière:

- Il fournit l'énergie thermique à la chaudière et à la charge.
- Prépare la mise en contact du combustible et du comburant.

- Provoque la circulation des gaz brûlés favorisant l'égalisation des températures dans l'enceinte.

Echangeur tubulaire [37]: A l'intérieure d'un tube de diamètre suffisamment grand se trouve placé plusieurs tube de petit diamètre maintenue écarté par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.

2.4.2.5. Les brûleurs:

Le rôle du brûleur est de chauffer l'eau présente dans la chaudière avant que celle-ci ne soit injectée dans les émetteurs de chaleur. Fonctionnant aussi bien avec une chaudière fioul qu'avec une chaudière gaz, le brûleur est équipé d'un ventilateur chargé d'alimenter l'élément mécanique en air. Ce principe de fonctionnement lui vaut d'ailleurs le nom de brûleur pulsé. Ce ventilateur a un double rôle: d'une part, il permet à l'air nécessaire pour la combustion d'entrer dans l'appareil, d'autre part, il assure l'évacuation des fumées liées à la combustion. Le fioul ou le gaz nécessaires à la combustion arrivent au sein du brûleur depuis leur lieu de stockage: une cuve pour le fioul ou un raccordement au gaz de ville.

- **Système de sécurisée la combustion:**

Le brûleur d'une chaudière fioul ou d'une chaudière gaz est une solution sécurisée et sécurisante pour contenir un phénomène de combustion. La flamme du brûleur se règle de manière autonome grâce à un système de sécurité pouvant fonctionner sous deux principes: une cellule photorésistante réagissant à la lumière produite par la flamme, ou une cellule photoélectrique réagissant au rayonnement lumineux du spectre de la lumière blanche. Ces systèmes de contrôle de la flamme du brûleur permettent d'éviter les imbrûlés, dont l'accumulation réduit le rendement d'une chaudière.

- **La composition d'un brûleur pour chaudière fioul:**

La pompe à fioul: La pompe à fioul du brûleur d'une chaudière a pour rôle d'alimenter l'appareil en fioul. Cette pompe bénéficie d'un raccordement allant de la cuve de stockage du fioul jusqu'au brûleur. Pour éviter un manque d'approvisionnement ou un surplus, un régulateur de pression permet d'adapter l'alimentation en fioul du brûleur et assurer le bon rendement de la combustion.

L'électrovanne: Le principe de fonctionnement de l'électrovanne d'un brûleur est automatique. Il s'agit d'une vanne qui gère l'alimentation en fioul du gicleur afin qu'il dispose de la quantité de combustible suffisante pour assurer la combustion.

Le ventilateur: Le phénomène de combustion est également alimenté par un apport d'air fourni par le ventilateur. Le système de ventilation a pour objectif de faciliter l'accès de l'air à

la flamme du brûleur. Grâce au système de ventilation, l'air rencontre moins d'éléments de résistance pour atteindre la chambre de combustion du brûleur.

Le gicleur: Le gicleur est l'élément essentiel au bon fonctionnement du brûleur d'une chaudière fioul. C'est cette partie de l'appareil qui envoie, de manière éparse, le fioul. Ainsi dispersé sous la forme de gouttelettes, le fioul se mélange plus facilement à l'air pour alimenter une combustion au rendement élevé.

Les électrodes: Le rôle des électrodes consiste essentiellement à allumer la flamme du brûleur lorsque vous mettez en route votre système de chauffage.

Le réchauffeur de fioul: La viscosité du fioul est en partie causée par sa température dans la cuve de stockage, en partie à sa composition propre. Le rôle du réchauffeur de fioul est donc de chauffer le fioul et ainsi de le rendre plus liquide afin d'en faciliter la combustion.

La tête de combustion: Une tête de combustion se compose d'un embout et d'un déflecteur. Le rôle de l'embout est de guider la flamme du brûleur alors que le rôle du déflecteur est de s'assurer que la flamme ne s'éteigne pas et qu'elle continue à brûler.

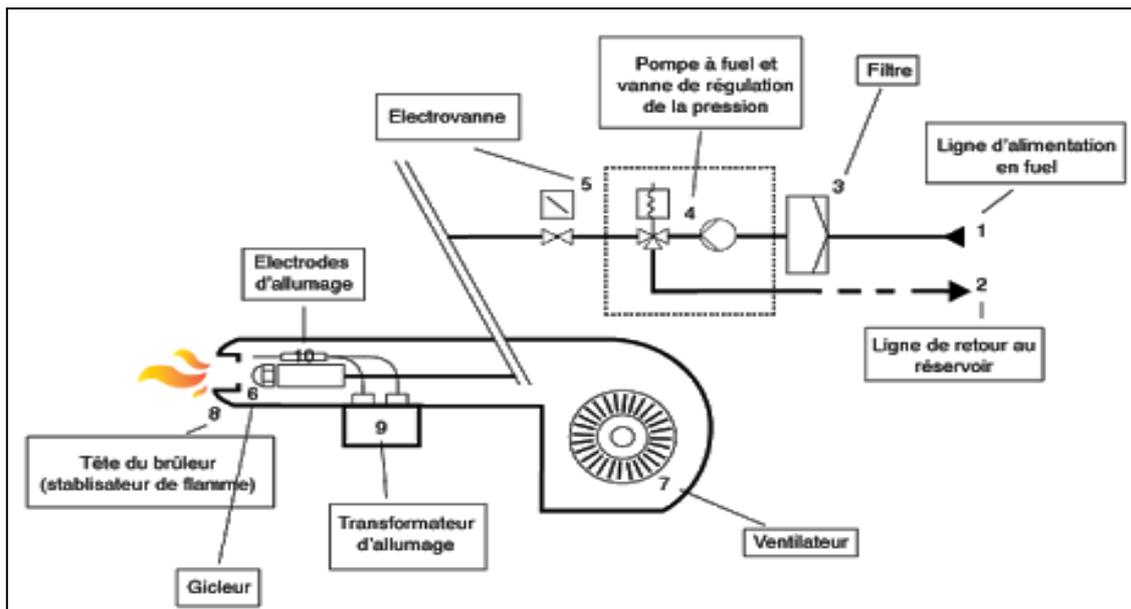


Figure 12: brûleur pour chaudière fioul.

- **La composition d'un brûleur pour chaudière gaz:**

Pour les chaudières gaz, si le principe de fonctionnement reste similaire, la composition du brûleur connaît certaines différences. Ainsi, il est possible de différencier 4 types de brûleurs pour une chaudière gaz : les brûleurs atmosphériques, les brûleurs à air pulsé, les brûleurs à pré-mélange et les brûleurs low-NOx (Nitrons Oxide).

Les brûleurs atmosphériques: Les brûleurs atmosphériques ne disposent pas d'un ventilateur. Le principe de fonctionnement se base sur un jet de gaz au niveau des injecteurs

pour assurer l'entraînement de l'air. Une dépression causée par le rétrécissement du tube mélangeur permet l'aspiration naturelle de l'air comburant, également appelé air primaire. Un phénomène de convection naturelle permet l'aspiration de l'air secondaire au niveau de la flamme.

Les brûleurs à air pulsé: Dans un brûleur à air pulsé, le gaz et l'air comburant se mélangent dans la tête de combustion. Contrairement au principe de fonctionnement du brûleur atmosphérique, le brûleur à air pulsé est équipé d'un ventilateur dont le rôle est d'attirer l'air ambiant de la chaufferie à l'intérieur du brûleur afin de fournir une quantité suffisante d'air comburant pour permettre la combustion.

Les brûleurs à pré-mélange: Le fonctionnement du brûleur à pré mélange est différent du brûleur à air pulsé, malgré un mélange de l'air et du gaz en amont de la combustion pour ce dernier. Veuillez tout d'abord noter qu'il existe deux types de modèles:

- les brûleurs à pré mélange avec ventilateur.
- les brûleurs à pré-mélange sans ventilateur.
- Les brûleurs à pré-mélange avec ou sans ventilateur sont des brûleurs limitant considérablement la production de NO_x lors de la combustion.

Les brûleurs low-NO_x: Les dernières évolutions technologiques se concentrent sur la réduction des émissions polluantes liées à l'accumulation des imbrûlés. Les NO_x se forment lorsque l'azote lié à la réaction de la combustion se mélange avec l'oxygène [38].

Chapitre 3 Pollution

3.

3.1. Définition de la pollution:

La pollution est une dégradation de l'environnement par l'introduction dans l'air, l'eau ou le sol de matières n'étant pas présentes naturellement dans le milieu. Elle entraîne une perturbation de l'écosystème dont les conséquences peuvent aller jusqu'à la migration ou l'extinction de certaines espèces incapables de s'adapter au changement. Souvent anthropique, c'est à dire due directement ou indirectement à l'activité humaine, la pollution peut cependant résulter de phénomènes naturels tels qu'une éruption volcanique ou solaire.

On distingue plusieurs types de pollutions:

- La pollution de l'air, provoquée par des polluants dits atmosphériques : rejet de pots d'échappement, des usines..., (voir figure 1).
- La pollution du sol souvent d'origine industrielle ou agricole : utilisation d'engrais, de pesticides ...
- La pollution de l'eau qui peut résulter de la contamination des eaux usées, des rejets de produits, (les produits phytosanitaires, ceux présents dans les engrais, les hydrocarbures...), voir la figure 2.
- La pollution par type ou agents polluants : pollution industrielle, radioactive, électromagnétique, thermique, lumineuse, spatiale, etc.

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, l'homme prend peu à peu conscience de l'impact de ses actions polluantes et, de plus en plus, les gouvernements adoptent des mesures pour essayer de limiter l'empreinte écologique des activités humaines. Les industries sont particulièrement touchées par ces mesures. Pour limiter la pollution dont elles sont responsables, elles tentent de réduire leurs émanations toxiques, d'utiliser des moyens de transports moins polluants et des fournisseurs moins éloignés.



Figure 1: pollution de l'air [39].



Figure 2: pollution de l'eau [39].

3.2. Effet de la pollution sur l'environnement: Effet sur l'atmosphère [40]:

Les effets des polluants sur l'atmosphère sont de plus en plus évident et se matérialisent essentiellement par:

3.2.1. L'accroissement de l'effet de serre:

Commençons par définir et présenter l'effet de serre. Il s'agit d'un effet naturel, à l'origine, bénéfique à la vie humaine puisqu'il permettait à l'eau de rester dans l'état liquide et minimisait le risque de glaciation. Il s'agit des gaz contenus à l'état de trace dans l'atmosphère (vapeur d'eau, CO₂, méthane, composés sulfurés et composés azotés). L'augmentation de la concentration en Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère, due à l'activité humaine conduit à la présence d'effet de serre ADDITIONNEL. Pour évaluer à croissance rapide des (GES). L'effet de serre additionnel a pour effet un réchauffement global de la planète. Depuis 1990, la planète a connu une hausse globale de sa température, passant de 0,3 à 0,7°C en 20 ans. Le groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat GIEC (IPCC, en anglais) nous annonce une augmentation moyenne de la température allant de 1,4 à 5,8°C de la température moyenne du globe. Cette augmentation n'est pas uniforme bien au contraire, on va assister à des événements extrêmes (tempête, cyclone, canicule, sécheresse, coup de froid, etc). Le cycle de l'eau va être modifié ce qui conduira à une sécheresse accrue dans certaines zones . Ils préconisent certains déséquilibres si la température augmente de 2,5° d'ici la fin de ces 21 siècles:

- Augmentation moyenne de 65cm des niveaux marins (inondation et disparition de certaines zones côtières.
- Fonte de 50% des glaciers mondiaux.
- Changement dans les débits des rivières et les niveaux des lacs.
- Augmentation générale des températures et des précipitations, favorisant le développement des maladies et des parasites.
- **L'affaiblissement de la couche d'ozone stratosphérique:** Se trouvant à près de 90% dans la stratosphère, la couche d'ozone se trouve entre 15 et 40 km d'altitude. Il s'agit d'un dérivé de l'oxygène qui joue un rôle important pour la biosphère en absorbant une partie du rayonnement solaire ultra-violet et en éliminant les courtes longueurs d'onde comprises entre 240 et 300 nanomètres. Ces rayonnements et ces ondes sont reconnu à l'origine de maladies cancérigènes et mutagènes, susceptible de détruire les cellules vivantes,(voir figure 3).

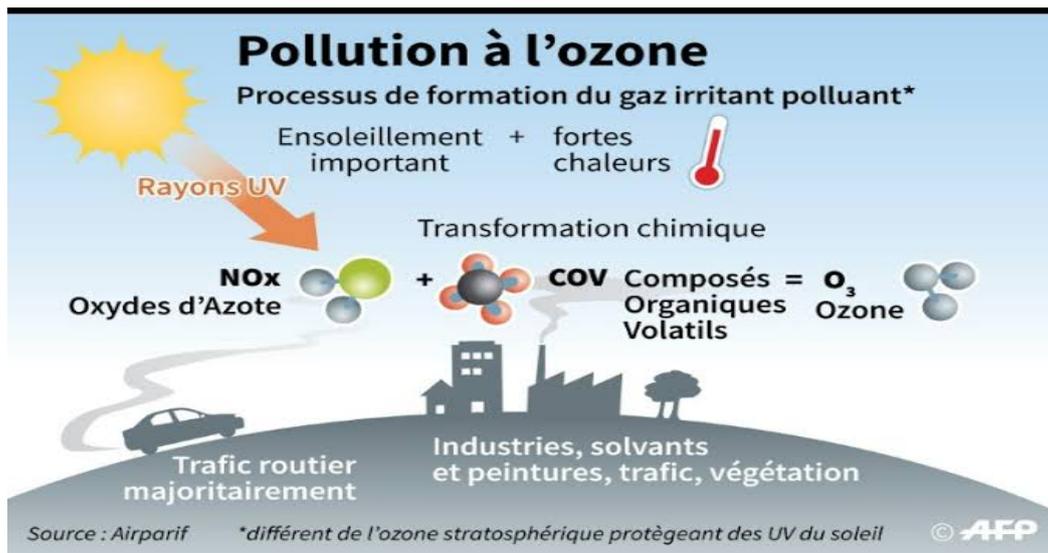


Figure 3: pollution à l'ozone.

3.2.2. Effet sur le sol et sur les milieux aquatiques:

L'homme, par ses fonctions biologiques, rejette des déchets organiques qui seront éliminés dans les milieux récepteurs. Ces déchets plus ou moins naturels, peuvent être toxiques dans le cas d'une grande population et d'un manque de traitements appropriés.

Les activités industrielles sont beaucoup plus polluantes à cause de la consommation et de la production de produits chimiques. Les déchets évacués sont de plus en plus toxiques, leur stockage dans le milieu récepteur est nocif aussi bien pour l'environnement que pour l'homme. On peut aussi citer les Polluants Organiques Persistants (POP) à qui on lie généralement le phénomène de bioconcentration. Ces substances se lient généralement à la graisse des tissus animaux et donc plus ils vieillissent plus ils sont contaminés.

3.2.3. Effet sur la santé humaine:

Les premières préoccupations environnementales sont relatives aux atteintes à la santé humaine, bien plus qu'à la destruction des milieux ou la réduction de la biodiversité. Une morbidité importante (la fumée des usines, l'émission des tanneries, etc.) générée par certains processus de production est apparue avant même la révolution industrielle. De même, les déchets des villes et les égouts furent rapidement identifiés comme une source de maladies. Grâce au progrès de la médecine, la santé humaine s'est beaucoup améliorée et l'espérance de vie a augmenté. Il faut reconnaître toutefois, que plusieurs maladies infectieuses ont apparu ainsi que la propagation du cancer sous ses différentes formes. L'activité industrielle, l'émission des gaz toxiques, des déchets liquides et solides dans l'environnement expliquent l'apparition de plusieurs maladies et cancers. La recherche médicale a permis de vaincre certaines de ces maladies, d'en réduire l'effet d'autres et

elle demeure incapable de résoudre d'autres cas plus compliqués. L'effet le plus tangible de la pollution sur la santé humaine est celui de l'apparition de plusieurs formes d'allergies chroniques.

3.3. Les principaux polluants [41]:

- **NO_x (Oxydes d'azote):**

Les émissions d'oxydes d'azote (monoxyde d'azote plus dioxyde d'azote) apparaissent dans toutes les combustions, à haute température, de combustibles fossiles (charbon, fuel, pétrole...).

Le monoxyde d'azote (NO) n'est pas toxique pour l'homme aux concentrations auxquelles on le rencontre dans l'environnement mais le dioxyde d'azote (NO₂) est un gaz irritant pour les bronches. Le secteur du trafic routier est responsable de plus de la moitié des émissions de NO_x et le chauffage de près de 20%.

Le dioxyde d'azote provient quant à lui de l'oxydation du monoxyde d'azote rejeté dans l'atmosphère par l'ozone. Mais une partie du dioxyde d'azote est également émise telle quelle dans l'atmosphère.

- **PM (Particules en suspension):**

Les microparticules, de la taille du micromètre (µm, un million de fois plus petit qu'un mètre) ne sont pas visibles à l'œil nu. Ce sont celles qui sont mesurées dans l'air à travers:

- **Les particules PM₁₀**, de taille inférieure à 10 µm et qui pénètrent dans l'appareil respiratoire.
- **Les particules fines ou PM_{2.5}**, inférieures ou égales à 2,5 µm (comme les bactéries) et qui peuvent se loger dans les ramifications les plus profondes des voies respiratoires.

- **O₃ (Ozone):**

A très haute altitude, dans la haute atmosphère, l'ozone protège les organismes vivants en absorbant une partie des rayons UV. Mais à basse altitude, là où nous vivons et respirons, c'est un polluant qui irrite les yeux et l'appareil respiratoire, et qui a des effets sur la végétation.

L'ozone est un polluant, qui pose problème essentiellement en été, car pour produire beaucoup d'ozone la chaleur et un ensoleillement suffisant sont nécessaires. En effet, ce polluant n'est pas directement émis dans l'atmosphère mais se forme par réaction chimique à partir d'autres polluants, en particulier les oxydes d'azote et des hydrocarbures, sous l'action des rayons UV du soleil.

- **SO₂ (Dioxyde de soufre):**

Les émissions de dioxyde de soufre dépendent de la teneur en soufre des combustibles (gazole, fuel, charbon...). Ce gaz irrite les muqueuses de la peau et des voies respiratoires supérieures.

A plus de 50% il est rejeté dans l'atmosphère par les activités industrielles, dont celles liées à la production d'énergie comme les centrales thermiques. Mais il est également émis par le chauffage résidentiel, commercial ou des entreprises.

- **COV (Composés Organiques Volatils):**

Les composés organiques volatils sont libérés lors de l'évaporation des carburants, par exemple lors du remplissage des réservoirs, ou par les gaz d'échappement. Ils provoquent des irritations et une diminution de la capacité respiratoire.

Les COV sont émis par le trafic automobile, par les processus industriels, par le secteur résidentiel, par l'usage domestique de solvants, mais également par la végétation.

- **CO (Monoxyde de carbone):**

Les émissions de monoxyde de carbone sont liées à des combustions incomplètes (gaz, charbon, fioul ou bois), elles proviennent majoritairement des gaz d'échappement des véhicules. A fortes teneurs, le monoxyde de carbone peut provoquer des intoxications.

- **Les métaux lourds:**

Cette famille comprend le plomb (Pb), le mercure (Hg), l'arsenic (As), le cadmium (Cd) et le nickel (Ni). Les métaux proviennent de la combustion des charbons, pétroles, ordures ménagères mais aussi de certains procédés industriels. Le plomb pour sa part était principalement émis par le trafic routier jusqu'à l'interdiction totale de l'essence plombée en 2000, mais avec la suppression de l'essence plombée, il ne pose plus problème dans l'air francilien. Ces polluants peuvent s'accumuler dans l'organisme, avec des effets toxiques à plus ou moins long terme.

3.3.1. Formation des polluants:

Parmi les différents produits polluants qui peuvent être élaborés par la combustion, on traitera ici que les plus importants, à savoir les oxydes d'azote les oxydes de carbone, les hydrocarbures imbrulés ou partiellement brulés, les hydrocarbures aromatiques polycycliques et des particules de suie [42].

3.3.1.1. Formation des oxydes d'azote (NOx) [42]:

L'oxyde nitrique NO et le dioxyde d'azote NO₂ sont généralement groupés sous l'ensemble NO_x dans lequel NO prédomine largement. La principale source de NO est l'azote moléculaire de l'air, utilisé comme comburant alimentant le moteur.

Les carburants essences et diesel contiennent trop peu d'azote pour que leur contribution moteur à allumage commandé ; mais dans le cas du diesel, on peut trouver jusqu'à 30% des Nox sous forme de NO₂. Lors de la combustion d'un mélange d'hydrocarbures, des oxydes d'azote peuvent être formés via plusieurs mécanismes (voir figure 4) dont les principaux sont :

- le mécanisme de Zeldovich (ou NO thermique),
- le mécanisme par l'intermédiaire de N₂O,
- le mécanisme de Fenimore (ou NO précoce),
- le mécanisme de Fuel-NO.

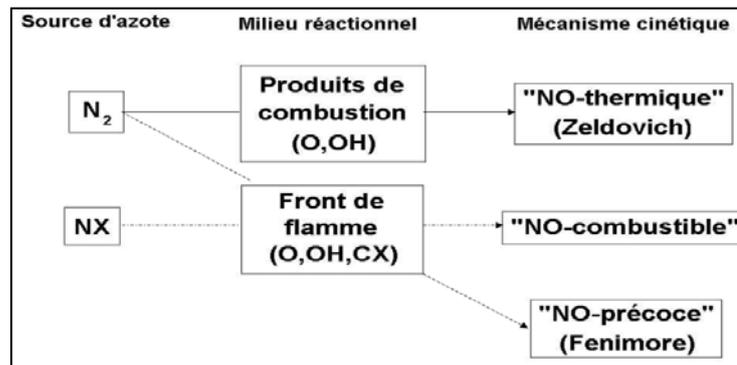


Figure 4: Schéma des trois principales voies de formation du NO en combustion [43].

• Le mécanisme de Zeldovich:

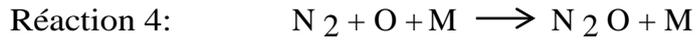
Le mécanisme de formation de NO thermique est composé de trois réactions principales:



Ce processus de formation du NO fait intervenir l'azote et l'oxygène de l'air, réagissant dans la zone des gaz brûlés en aval du front de flamme. Ce mécanisme est alors couplé au mécanisme de combustion du carburant. Cependant, il faut noter que l'énergie d'activation de la première réaction (Réaction 2) est relativement élevée (75,5 kcal/mol) et par conséquent cette réaction a une très forte dépendance en température. Le mécanisme de NO thermique devient efficace à partir de 1800K [43].

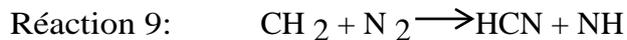
• Le mécanisme de formation du NO par l'intermédiaire de N₂O [43]:

Lors d'une combustion pauvre à haute pression et à basse température, ce mécanisme devient important car il contribue alors à la formation de NO. Il comporte trois réactions:



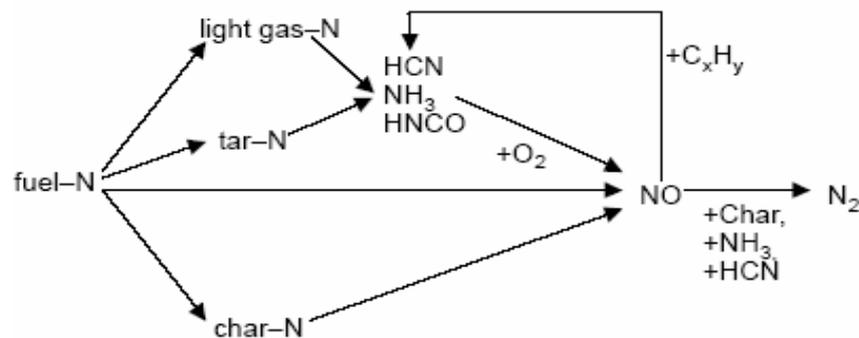
- **Le mécanisme de Fenimore [43]:**

Ce mécanisme est essentiellement lié à la combustion des hydrocarbures dans l'air. Une partie de la production de NO est produite dans les zones actives, là où le NO thermique n'a pas eu le temps de se former. C'est de là que vient le nom "NO-précoce". Le mécanisme de Fenimore commence par l'attaque de N_2 par les radicaux CH, C et CH_2 :



- **Le mécanisme de Fuel-NO [43]:**

Le mécanisme de « Fuel-NO » est essentiellement lié à la présence d'atomes d'azote dans certains combustibles et notamment dans les additifs. Ce mécanisme est peu dépendant de la température, il fait appel à plusieurs réactions en chaîne (Mécanisme 1).



Mécanisme 1: Mécanisme de conversion du Fuel-N en NO.

3.3.1.2. Formation du monoxyde de carbone (CO):

La formation de CO intervient comme une étape intermédiaire essentielle du processus d'oxydation des hydrocarbures conduisant au produit final CO_2 :



Où R représente le radical hydrocarbure.

Le CO formé est ensuite oxydé à vitesse plus faible en CO_2 par la réaction:



La vitesse d'oxydation du combustible dépend de la concentration disponible en oxygène, de la température des gaz et du temps disponible laissé aux réactions pour s'accomplir, donc du

régime moteur. Le paramètre principal gouvernant les émissions de CO est la richesse du mélange carburé.

En mélange riche, les concentrations en CO augmentent régulièrement avec la richesse, le défaut d'oxygène entraîne une combustion incomplète.

En mélange pauvre, les concentrations en CO sont faibles et varient peu avec la richesse, mais elles sont toutefois plus élevées que celles prédictibles par les modèles cinétiques. Les moteurs à allumage commandé fonctionnent à charge partielle près de la richesse 1 et en mélange riche à pleine charge et au démarrage lors de l'utilisation du starter ; dans ces conditions, les émissions de CO sont significatives. Comme le moteur diesel fonctionne toujours en mélange globalement pauvre, les émissions de CO sont nettement plus faibles que celles du moteur à essence.

3.3.1.3. Formation des hydrocarbures imbrulés (HC):

L'émission d'hydrocarbures imbrulés, ou plus généralement de produits organiques provient de la combustion incomplète des hydrocarbures. Contrairement au CO et aux Nox, qui se forment en phase homogène à haute température au sein du fluide, les hydrocarbures proviennent plutôt d'effets hétérogènes dans le mélange et au voisinage des parois, donc température plus basse, Ils sont exprimés sous forme d'hydrocarbures totaux en ppm de carbone.

Les hydrocarbures imbrulés comprennent une grande variété d'hydrocarbures (tableau 1) qui sont plus ou moins nocifs du point de vue santé ou ont des réactivités différentes dans les transformations chimiques troposphériques.

Tableau 1: exemple de répartition des classes d'hydrocarbures dans les gaz d'échappement.

Pourcentage en carbone des HC totaux			
Paraffiniques	Oléfiniques	Acétyléniques	Aromatiques
33	27	8	32

- **Influence des interstices:**

Ils sont considérés comme la principale source d'HC imbrulés, les principaux volumes interstitiels (voir figure 5) se trouvent entre le piston, les segments et la paroi du cylindre. D'autre volumes sont dans les filets du pas de vis des bougies, dans l'espace autour de l'électrode centrale de la bougie, au tour des têtes de soupapes d'admission et d'échappement, et près du joint de culasse.

Au moment de l'augmentation de pression lors de la phase de compression, le mélange carburé se trouve forcé dans les interstices.

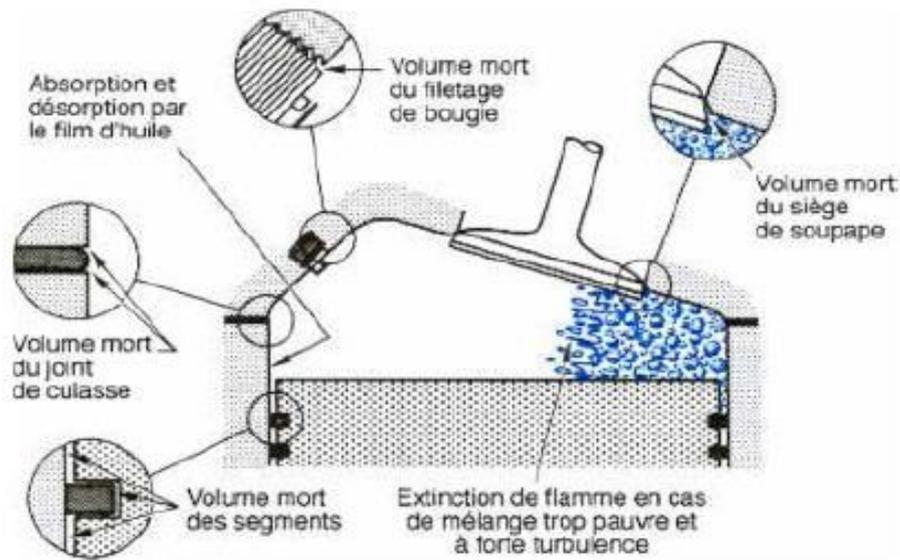


Figure 5: Tête de cylindre montrant les sources possibles de HC imbrulés.

3.3.1.4. Formation des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [44]:

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques forment un sous-groupe des hydrocarbures aromatiques. C'est une vaste famille composée de plusieurs centaines de molécules différentes, constituées uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène, structurées sous forme de cycles benzéniques accolés et pouvant posséder également des ramifications de chaînes alkyles. Ces espèces sont formées lors de la combustion incomplète d'hydrocarbure lorsque le mélange gazeux est en excès de carburant. Elles se présentent sous forme gazeuse dans les flammes en quantité et composition variables suivant la nature du combustible et le type de combustion.

- **Croissance des HAP par le mécanisme HACA:**

Le mécanisme HACA, acronyme d'H-Abstraction C_2H_2 . Addition, qui a été introduit par Freundlich et Wang est généralement admis comme étant la principale voie de formation des HAP. Ce mécanisme est une séquence répétitive de deux processus chimiques : l'abstraction d'un atome d'hydrogène sur une espèce aromatique par un atome d'hydrogène puis addition d'une molécule d'acétylène sur le radical formé. Cette addition forme une espèce chimiquement instable qui se stabilise par cyclisation après rupture d'une autre liaison C-H libérant un autre atome d'hydrogène. Après cette séquence il y a donc formation d'un nouveau cycle aromatique, la répétition de celle-ci conduit donc à la formation d'hydrocarbures aromatiques ayant un poids moléculaire de plus en plus important. Un

3.3.2.1. Amélioration de la combustion dans les moteurs:

L'effort de recherche des motoristes pour l'amélioration de la combustion dans les moteurs a principalement porté sur quatre axes:

- la réduction de cylindrée (Downsizing).
- Le système d'injection.
- Utilisation d'EGR.
- Refroidissement de l'air admis.

- **Réduction de cylindre (downsizing):**

Le downsizing repose sur le principe de réduction de la consommation en carburant par diminution de la taille du moteur avec suralimentation (Turbo Compresseur) en carburant pour une performance équivalente.

Turbo Compresseur: Emplacement sur le moteur, dans le collecteur admission et échappement: turbine -admission sur l'admission, turbine échappement sur l'échappement.

Rôle: Augmenter le rendement du moteur par une meilleure admission d'air dans les cylindres et une combustion plus importante de carburant.

Principe de fonctionnement: Quand le moteur fonctionne, il émet une certaine quantité de gaz sous pression (gaz D'échappement). La pression de ces gaz varie avec la vitesse du moteur. C'est ce flux de gaz d'échappement qui entraîne la première turbine. La deuxième turbine, entraînée par la première par l'intermédiaire de l'arbre de liaison, comprime l'air dans la pipe d'admission. Il y a donc un meilleur remplissage des cylindres, (voir figure 8).

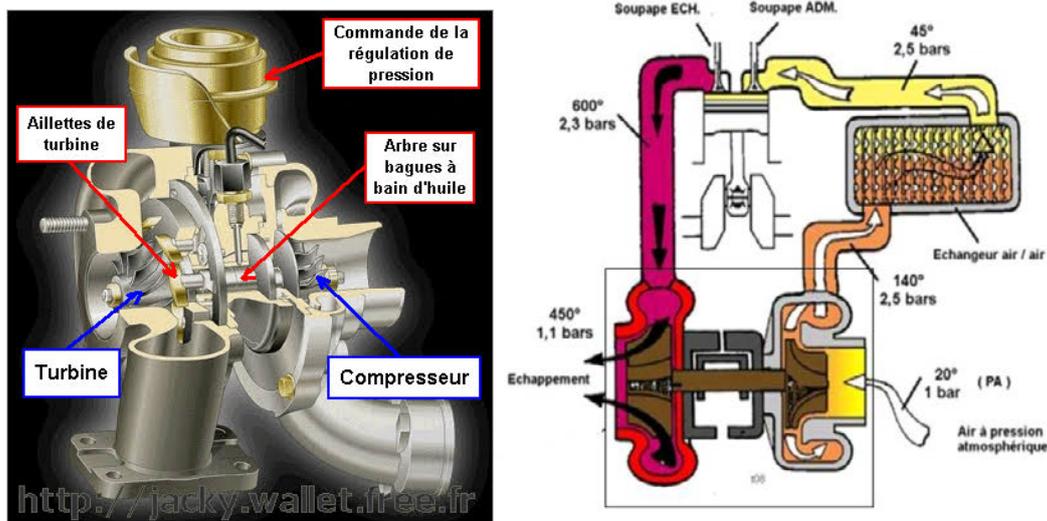


Figure 8: Principe de fonctionnement d'un Turbo Compresseur

- **Système d'injection:** Le mode d'injection des carburants dans la chambre de combustion a fait l'objet de nombreux changements au cours de la dernière décennie aussi pour les nouveaux moteurs Diesel.

Le terme d'injection peut-être associé à différentes notions : mécanique, électrique, directe, indirecte, à rampe commune ... Il est important que vous soyez alerte sur la différence entre certains éléments, notamment entre l'injection classique et l'injecteur à rampe commune ou Common rail.

Différence entre rampe commune (Common rail) et injection classique: Une Injection classique se compose d'une pompe à injection qui est elle-même reliée à chaque injecteur. Cette pompe s'occupe donc d'envoyer sous pression le carburant aux injecteurs figure (9). Un système de rampe commune est très ressemblant, sauf qu'entre la pompe à injection et les injecteurs il y a une rampe commune figure (10). Il s'agit d'une sorte de chambre où l'on envoie le carburant qui s'accumule sous pression (grâce à la pompe).

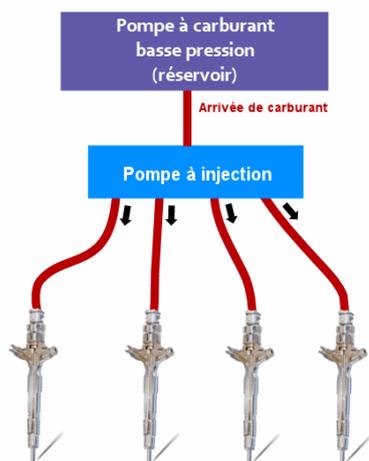


Figure 9: Injection classique.

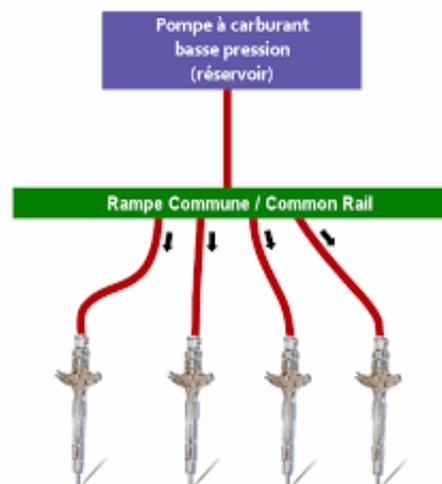


Figure 10: Un système Common rail.

Avantages du système d'injection

- L'augmentation des performances du moteur (couple, puissance,...).
- Economie de carburant grâce au dosage très précis.
- Diminution des émissions toxiques (meilleure combustion).
- Meilleur remplissage en air des cylindres donc souplesse accrue.

- **Recirculation des gaz d'échappement « EGR »:**

Ce procédé est souvent appelé EGR (Exhaust Gases Recirculation) voir la figure 11.

L'objectif principal de l'EGR est de réduire la formation des (NOx) par réduction simultanée de la température maximale atteinte lors de la combustion et de la concentration en oxygène. En effet, dans ce procédé, une partie des gaz d'échappement est recirculée et

mélangée à l'air lors de l'admission. Cette quantité de gaz d'échappement recirculée, remplace une quantité égale l'air frais. La température de la combustion diminue, les (NOx) aussi. De fort taux de recirculation de gaz d'échappement permettent d'obtenir des émissions de (NOx), très faibles. Dans ce cas, en l'absence de modifications du système de suralimentation, la réduction de la quantité d'oxygène disponible accroît considérablement les émissions de fumées du moteur. Il faut alors utiliser un filtre à particules pour ramener les émissions à des niveaux acceptable.

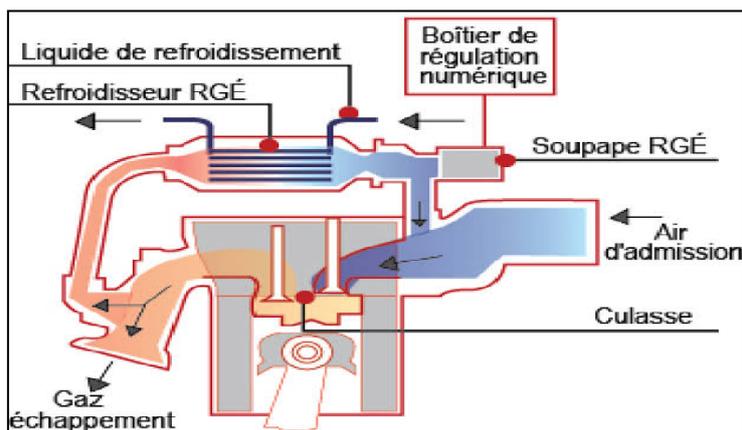


Figure 11: Recirculation des gaz d'échappement dans un moteur.

- **Refroidissement de l'air admis:**

Le refroidissement intermédiaire de l'air admis, pour les moteurs suralimentés, entre la sortie du compresseur et l'admission du moteur, permet d'obtenir des températures de combustion faibles ; et de réduire ainsi les émissions d'oxydes d'azote. Cependant pour les points de fonctionnement à faible charge ou il y a arrosage des parois, il est préférable de fonctionner avec des températures d'admission plus élevées pour réduire ces arrosages, ainsi que les émissions d'hydrocarbures et de particules résultantes. Dans ces cas, le refroidisseur intermédiaire est directement néfaste.

3.3.2.2. *Systèmes de post-traitement:*

- **Filtres à particules:**

Les suies qui n'ont pas pu être brûlées dans la chambre de combustion peuvent être détruites par un filtre à particules (voir figure 12). Celui-ci n'agit que sur les particules qui sont captable à la Température où les gaz d'échappement les traversent. Il faudra prévoir les modes de Fonctionnement suivantes:

- Filtration et combustion quasi simultanée des particules lorsque la température des gaz d'échappement le permet.

- Rétention et accumulation des particules de suies dans le filtre lorsque la température des gaz d'échappement est trop faible.
- Régénération du filtre avant que les pertes de charge dues à l'accumulation de suies deviennent inacceptables.

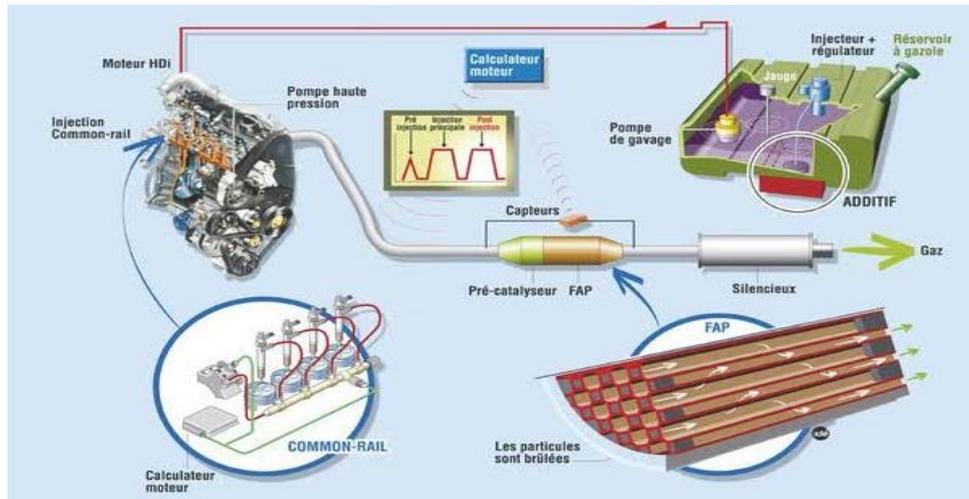


Figure 12: L'emplacement des filtres à particules dans un moteur.

Les suies qui n'ont pas pu être brûlées dans la chambre de combustion peuvent être détruites par un filtre à particules. Celui-ci n'agit que sur les particules qui sont captées à la température où les gaz d'échappement les traversent. Il faudra prévoir les modes de fonctionnement suivants:

- Filtration et combustion quasi simultanée des particules lorsque la température des gaz d'échappement le permet.
- Rétention et accumulation des particules de suies dans le filtre lorsque la température des gaz d'échappement est trop faible.
- Régénération du filtre avant que les pertes de charge dues à l'accumulation de suies deviennent inacceptables.
- **Catalyseurs:**

Les catalyseurs d'oxydation permettent de transformer en aval des soupapes d'échappement les hydrocarbures HC imbrûlés en produits moins toxiques tels que le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O). Contrairement aux filtres à particules, les catalyseurs d'oxydations ne posent pas le problème de colmatage par accumulation d'un produit solide retenu voir figure13).

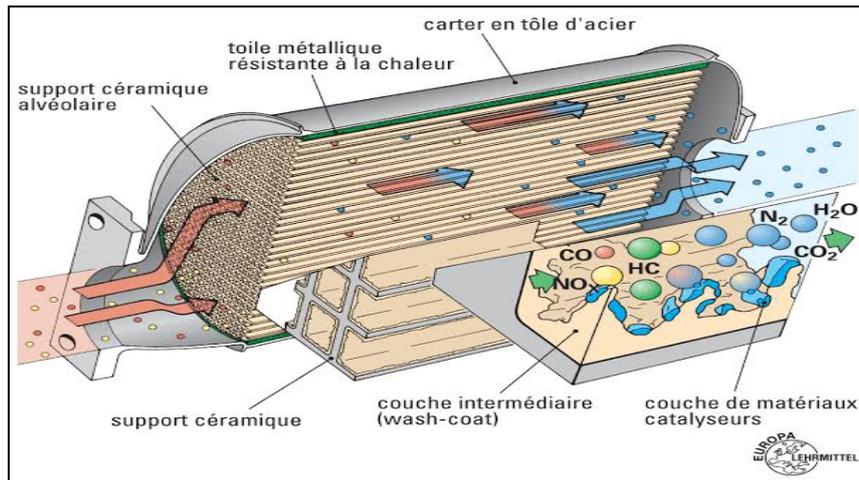


Figure 13: Un catalyseur.

Un catalyseur est constitué d'un support céramique ou acier recouvert d'alumine poreuse (washcoat) pour augmenter la surface de traitement des gaz. Dans les cellules du bloc, sont parsemés des microcristaux de métaux précieux :

- Platine
- Palladium
- Rhodium

En présence de ces métaux, les gaz d'échappement subissent une réaction chimique et sont rendus inoffensifs.

3.3.2.3. Reformulation des carburants: (Les carburants alternatifs):

La pénurie et l'épuisement des ressources conventionnelles (carburants d'origine pétrolière) sont également un des soucis majeur des pays occidentaux, ce qui a incité les scientifiques à développer des carburants alternatif à savoir les biocarburants, le gaz de pétrole liquéfié GPL, le gaz naturel véhicule GNV et enfin carburants liquides de synthèse.

Chapitre 4
Modélisation de la
combustion

4.

4.1. *Introduction:*

L'aérothermochimie est représentée par des équations de transport ainsi que des hypothèses considérées pour la fermeture du système correspondant. L'hypothèse de continuité permet d'établir les équations fondamentales décrivant les lois de conservation des différentes grandeurs considérées. Cette hypothèse est satisfaite si le rapport du libre parcours moyen des molécules sur la dimension caractéristique de la particule de fluide étudié, peut être considéré comme petit. Les volumes élémentaires sont alors suffisamment grands pour faire abstraction de la structure moléculaire discontinue et considérer que les propriétés du fluide sont homogènes. On considère un mélange gazeux homogène composé de N espèces. Le fluide associé à chaque espèce est un milieu continu et nous pouvons y appliquer les lois de la mécanique et de la thermodynamique. L'hypothèse de milieu continu permet aussi l'adoption d'un certain nombre de grandeurs qui définissent le fluide. Ces quantités pouvant être liées aux espèces chimiques aussi bien qu'au mélange de N espèces. Dans ce dernier cas, le mouvement des molécules individuelles n'est pas considéré. Dans le cadre de la mécanique des fluides classique, les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie totale constituent le système des équations de Navier-Stokes. Les équations de conservation pour les quantités nécessaires à la description des écoulements réactifs laminaires sont explicitées dans une première partie. Dans une seconde partie, les équations sont moyennées pour obtenir un système d'équations pour la description du mouvement statistique de l'écoulement turbulent. L'application de cet opérateur de moyenne introduit de nouveaux termes de corrélation dont la fermeture dépend du modèle de turbulence retenu. Dans le cadre des écoulements réactifs ou compressibles, la décomposition de Favre est généralement utilisée. La turbulence est représentée par le biais d'un modèle du premier ordre (dans le cas le plus simple). Il s'agit d'un modèle à deux équations, la première pour l'énergie cinétique turbulente, la seconde pour le taux de dissipation de cette énergie.

4.2. *Domaine d'étude:*

Cette étude s'inscrit dans le domaine de la simulation numérique d'un écoulement réactif dans le but d'analyser l'effet du mélange méthane-air non-pré mélanges turbulente. La simulation numérique a été réalisée avec le code de calcul commercial **Fluent**. Lors de cette étude, on a utilisé les modèles que propose le package **RANS STANDARD k- ϵ , EDM** et **modèle NO**.

Ces combinaisons ont été adoptées dans le but d'analyser les méthodes pour diminuer les émissions polluantes de NOx.

4.2.1. Code de calcul *Fluent*:

Fluent est l'outil de logiciel dynamique des fluides informatiques (CFD) le plus puissant disponible, vous permettant d'aller plus loin en optimisant les performances de votre produit. Fluent comprend des capacités de modélisation physique bien validées pour fournir des résultats rapides et précis sur la plus large gamme d'applications CFD et multiphasique.

4.2.2. Formulations mathématique:

4.2.2.1. Equation de continuité:

Le bilan de conservation de la masse se traduit en utilisant une densité par unité de masse unitaire $g = 1$, un flux de masse et un terme source nuls.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Où ρ désigne la masse volumique du mélange fluide et u_i la i ième composante du vecteur de vitesse \mathbf{u} .

4.2.2.2. Equation de conservation de l'espèce chimique:

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho Y_k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \rho \dot{w}_k \quad k = 1, N \quad (2)$$

Où \dot{w} est le taux de production de l'espèce chimique k en unité de masse par unité de volume et de temps. La diffusion moléculaire des espèces chimiques résulte de trois effets: le gradient des fractions massiques (effet direct), le gradient de température (effet Soret) et le gradient de pression (effet baro-diffusif).

4.2.2.3. Equation de conservation de la quantité de mouvement:

Cette equation de bilan repose sur la définition de la quantité de mouvement $\mathbf{G} = \rho \mathbf{v}$ ou \mathbf{v} est la vitesse de convection globale de l'écoulement. Le flux ψ_G est associé au tenseur des contraintes $\boldsymbol{\sigma}$ et le terme source est une fonction de la force massique f_k agissant sur l'espèce k :

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \psi_{ij}}{\partial x_j} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,i} \quad (i = 1,2,3) \quad (3)$$

Le tenseur des pressions ψ_G se décompose en une partie isotrope exprimée en fonction de la pression thermodynamique P et en un déviateur $\boldsymbol{\sigma}$ appelé tenseur des contraintes visqueuses:

$$\psi_G = \sigma_{ij} - P \delta_{ij} \quad (3.1)$$

Où σ_{ij} est le tenseur dit de Kronecker.

4.2.2.4. Equation de conservation d'énergie totale:

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h_s) = \dot{W}_T + \dot{Q} + \frac{DP}{DT} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k} \right) \quad (4)$$

Le terme de diffusion de chaleur est donné par lois de Fourier: $\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}$

h_s : L'enthalpie sensible.

$V_{k,i}$: La vitesse de diffusion de l'espace k dans la direction i

\dot{Q} : Source de chaleur radiative.

\dot{W}_T : Le dégagement chaleur du a la réaction chimique.

4.2.3. La turbulence:

Est un phénomène qui apparait assez brutalement lorsque la vitesse de l'écoulement augmente ou plutôt les gradients de vitesse dont il est le siège. Depuis la découverte de ce phénomène par Reynolds a la fin du XIXème, on sait que la turbulence est due à l'instabilité de l'écoulement laminaire devant les petites perturbations expérimentales possibles, et que l'état turbulent est la situation non stationnaire vers laquelle tend l'écoulement instable.

Ces différents écoulements sont caractérisés par un nombre adimensionnel appelé le nombre de **Reynolds (Re)**. Il est défini par la relation suivante:

$$Re = \frac{v \cdot x \cdot \rho}{\mu} \quad (5)$$

Avec

v : vitesse moyenne de l'écoulement (m.s-1),

x : une dimension caractéristique (m),

ρ : la masse volumique (kg.m-3),

μ : la viscosité dynamique (kg.m-1.s-1)

4.2.3.1. Modélisation de la turbulence RANS k-ε STANDARD:

Pour le traitement de la turbulence, on a utilisé le modèle **RANS k-ε STANDARD** incluse dans le package **Fluent** version 6.3. Ce type de modèle de turbulence est représenté par celui forme de deux equations. Ce type des modèles est l'un des plus simple modèle de turbulence **k -ε**, ou **k** est l'énergie cinétique de turbulence et **ε** le taux de dissipation de celle-ci. Ce modèle a été proposé par Launder et Spalding, et il est fréquemment utilise dans la simulation des écoulements turbulents, parce q 'il est en général facile à appliquer, robuste et économique. Les deux equations de transport pour l'énergie cinétique et la dissipation sont résolues pour former une grandeur, une échelle caractéristique non seulement pour la vitesse

turbulente, mais aussi pour la longueur. Ces échelles (dimensions) représentent la viscosité turbulente. Les équations pour l'énergie cinétique k et le taux de dissipation ε ont cette forme.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

La viscosité turbulente est calculée en employant l'équation suivante:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Où: ρ est la densité du fluide et C_μ est une constante.

Le terme G_k , présent dans les équations (7) et (8), représente la production d'énergie cinétique turbulente, due aux gradients de la vitesse moyenne.

G_b : La génération de l'énergie cinétique de la turbulence due à gravitation.

Y_m : La contribution de la dilatation fluctuante dans la turbulence compressible au taux globale de dissipation.

μ : La viscosité.

μ_t : La viscosité turbulente.

Les constantes du modèle sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau 1: Constante de modèle k- ε .

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

4.2.3.2. *Modélisation de la combustion EDM (Eddy Dissipation Model):*

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

atteinte alors dans ces structures fines correspond à celle de l'équilibre chimique. Par conséquent, on peut supposer la vitesse de réaction moyenne comme inversement proportionnelle au temps caractéristique du mélange des grandes échelles de la turbulence et indépendante de la cinétique chimique. Ceci est un artifice qui permet de simuler l'inflammation du mélange réactif sous l'effet du préchauffage par les produits de combustion, ainsi que cela se produit en pratique dans un équipement de combustion. L'absence de notion de cinétique dans ce modèle ne permet pas de tenir compte de l'effet de la température d'inflammation. On suppose donc que, si des produits de combustion existent, c'est qu'on a atteint localement la température d'inflammation et donc la réaction peut se produire. La conséquence de ceci est que, pour que la réaction de combustion puisse démarrer, il est obligatoire d'imposer une fraction non nulle de produit de combustion quelque part dans le domaine. Dès que la réaction a démarré, elle est supposée se maintenir tant que la turbulence soit présente ($k/\varepsilon > 0$) et il est impossible de simuler les phénomènes d'extinction locale ou de décollement des flammes turbulentes. Le taux moyen net de la production/destruction de l'espèce i dans la réaction r peut donc s'exprimer par:

$$\bar{\omega}_i = M_{\omega,i} \sum_{r=1}^{N_r} R_{i,r} \quad (9)$$

$$\dot{\omega}_i = \dot{v}_{i,r} M_{\omega,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min_R \left(\frac{Y_R}{\dot{v}_{i,r} M_{\omega,i}} \right) \quad (10)$$

$$\dot{\omega}_i = \dot{v}_{i,r} M_{\omega,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N v_{i,r}'' M_{\omega,i}} \quad (11)$$

4.3. Les mécanismes de formation des NO_x [46]:

La modélisation de la formation des NO_x dans les systèmes de combustion est complexe, dans la mesure où elle requiert une description fine des procédés et des phénomènes physiques, faisant appel à la dynamique des fluides, au mélange local, aux transferts thermiques et à la cinétique chimique. Tous ces phénomènes se produisent simultanément et sont intimement couplés, ce qui rend l'étude d'autant plus délicate. Dans le modèle développé ici, nous avons choisi de ne pas représenter la totalité des mécanismes et réactions chimiques mis en œuvre, mécanismes qui font intervenir de nombreux radicaux libres et espèces intermédiaires, mais d'utiliser des réactions globales représentatives des processus ayant lieu au sein de l'incinérateur HILL et SMOOT [47]. Dans les processus de combustion, la formation de NO_x peut être attribuée à quatre schémas réactionnels distincts : formation de NO_x thermique, basée sur l'oxydation du diazote de l'air et dominante à haute température ;

formation de NO_x prompt, provenant de réactions à grande vitesse en présence d'hydrocarbures,

- Formation de NO_x combustible, provenant de l'oxydation de l'azote présent dans le combustible par l'oxygène de l'air.
- Formation de NO_x par l'intermédiaire de N₂O, dans les zones riches en oxygène et à haute pression.

4.3.1. NO_x thermique:

Processus de formation de NO_x thermique La formation de NO_x thermique a pour source l'azote présent dans l'air. La réaction est favorisée par les hautes températures et par les fortes concentrations en oxygène. La réaction globale peut être écrite:



La formation de NO résulte d'un ensemble de processus élémentaires fortement dépendants de la température, dit mécanisme de Zeldovich [48]. Les différents auteurs s'accordent pour décomposer ce mécanisme en deux étapes [49, 50]:



Cette description a été améliorée par l'ajout d'une troisième réaction : ce mécanisme est connu sous le nom de "mécanisme de Zeldovich prolongé" [51].



4.3.1.1. Cinétique de formation de NO_x thermique:

Avec ce mécanisme, la vitesse de formation de NO (en mol m⁻³gaz s⁻¹) est donnée par la formule:

$$\begin{aligned} \dot{r}_{NO,th} = & k_{f1}[\dot{O}][N_2] + k_{f2}[\dot{N}][O_2] + k_{f3}[\dot{N}][\dot{O}H] \\ & - k_{r1}[NO][\dot{N}] - k_{r1}[NO][\dot{O}] - k_{r1}[NO][\dot{H}] \end{aligned} \quad (16)$$

Les constantes des trois réactions précédentes ont été mesurées dans de nombreuses études expérimentales, dont les résultats ont fait l'objet d'examen critiques [52]. Nous donnons ci-dessous les valeurs de ces constantes en (m³ mol⁻¹ s⁻¹), telles qu'évaluées par ces auteurs et utilisées dans notre modèle.

$$k_{f1} = 1.8 \times 10^8 e^{-38370/T}$$

$$k_{r1} = 3.8 \times 10^7 e^{-425/T}$$

$$k_{f2} = 1.8 \times 10^4 e^{-4680/T}$$

$$k_{r2} = 3.81 \times 10^3 e^{-20820/T}$$

$$k_{f3} = 7.1 \times 10^7 e^{-450/T}$$

$$k_{r3} = 1.7 \times 10^8 e^{-24560/T}$$

Dans GARBED-ss, les concentrations en O₂, N₂ et NO sont des variables calculées par des équations de conservation locales. Elles sont donc directement utilisables pour évaluer, NO. Par contre, il est nécessaire de connaître également les concentrations en radicaux N[•], O[•], OH[•] et H[•].

4.3.1.2. L'hypothèse d'état quasi-stationnaire pour [N[•]]:

La vitesse de formation de NOx thermique est réputée significative seulement à température élevée (au-dessus de 1500 °C) parce que la fixation de l'oxygène exige la rupture de la liaison triple de N₂ (énergie de dissociation de 951 kJ mol⁻¹). Cet effet se traduit par une énergie d'activation élevée de la réaction (11), qui est l'étape limitant du mécanisme de Zeldovich prolongé. A l'inverse, l'énergie d'activation pour l'oxydation des atomes d'azote est faible et la réaction est rapide. Quand il y a suffisamment d'oxygène, la vitesse de consommation des atomes d'azote libres peut être considérée égale à celle de leur formation et donc un état quasi-stationnaire est établi. L'AEQS (Approximation de l'Etat Quasi-Stationnaire) permet alors de calculer simplement la concentration molaire [N[•]], et fournit donc une nouvelle formulation de la vitesse de formation de NO, à savoir [53]:

$$\dot{r}_{NO,th} = 2k_{f1}[O][N_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{r1} k_{r2} [NO]^2}{k_{f1} [N_2] k_{f2} [O_2]}\right)}{1 + \frac{k_{r1} [NO]}{k_{f2} [O_2] + k_{f3} [OH]}} \quad (mol\ m^{-3}\ s^{-1}) \quad (17)$$

Cette relation souligne d'une part l'importance de la température (via k_{f1}) dans le mécanisme de NO thermique, comme nous l'expliquions précédemment, et celle de la concentration en oxygène d'autre part. Elle met également en évidence le fait que la nature du combustible n'intervient pas dans la vitesse de formation de NO, ou tout du moins pas directement. La nature du combustible aura plutôt des incidences indirectes sur les concentrations en O[•] et OH[•], ainsi que sur la température de flamme. En se basant sur les énergies d'activation, on montre que la vitesse de production de NOx thermique double pour chaque augmentation en température de 90°C au-delà de 1900°C. La vitesse de conversion en NO dépend également du temps de séjour au niveau des zones chaudes, en particulier pour apporter l'énergie nécessaire aux réactions. Une version plus simple de la relation (18) est parfois obtenue en supposant que les concentrations en NO et OH[•] sont très faibles, on a alors:

$$\dot{r}_{NO,th} = 2k_{f1}[\dot{O}][N_2] \quad (18)$$

4.3.2. NOx prompt:

Il a été constaté que, lors de la combustion des hydrocarbures, le taux de formation de NOx pouvait excéder celui produit à partir de l'oxydation directe des molécules d'azote de l'air

(c'est-à-dire par le mécanisme NOx thermique). La présence d'un deuxième mécanisme menant à la formation de NOx a été identifiée la première fois par FENIMORE [54] et a été confirmée par d'autres auteurs [55, 56, 57, 58...] Ce mécanisme est aujourd'hui connu sous le nom de "NOx prompt". Son importance est significative dans les conditions de basses températures, de fortes richesses en combustible et dans les zones où les temps de séjour sont courts. Les brûleurs placés en surface de fours, les systèmes de combustion étagés et les turbines à gaz sont des systèmes où de telles conditions peuvent exister [59]. On peut considérer ce mécanisme comme une combinaison des mécanismes NOx thermique et NOx combustible dans la mesure où il implique le diazote moléculaire et où il est néanmoins soumis à des réactions avec des radicaux hydrocarbonés capables d'attaquer la triple liaison. Le mécanisme NOx prompt est beaucoup moins endothermique que le mécanisme NOx thermique, et beaucoup plus rapide (d'où l'appellation de prompt).

4.3.3. *Processus de formation de NOx prompt:*

Nous présentons ici le mécanisme de formation de NOx prompt simplifié qui est le plus souvent mentionné dans la littérature. Parmi l'ensemble des réactions mises en jeu, on retient le schéma réactionnel suivant [60]:



4.4. *Calcul de la richesse:*

La richesse d'un mélange exprime la composition du milieu réactionnel. C'est le rapport du mélange (carburant/air).

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \quad (23)$$

$$\lambda = \frac{\left(\frac{\text{masse de combustible}}{\text{masse d'air}}\right)_{\text{réel}}}{\left(\frac{\text{masse de combustible}}{\text{masse d'air}}\right)_{\text{stoe}}} \quad (23.1)$$

Le rapport stœchiométrique:

$$R_{\text{stoe}} = \frac{\text{Coef}_{\text{stoe}} O_2 \times M_{O_2}}{\text{Coef}_{\text{stoe}} \text{Carburant} \times M_{\text{carburant}}} \quad (23.2)$$

La richesse relative du mélange par définition est simplement l'inverse de l'excès d'air. Son calcul s'obtient aisément de l'écriture d'un bilan de masse sur la combustion. La quantité d'air

nécessaire à la combustion étant égale à la quantité d'air strictement nécessaire à une combustion stœchiométrique multipliée par l'excès d'air:

$$\dot{m}_a = \lambda m_{a,1} \dot{m}_c = \frac{m_{a,1} \dot{m}_c}{\phi} \quad (24)$$

La connaissance de la formule $C_z H_y O_x$ du combustible permet d'en calculer le pouvoir comburive $m_{a,1}$ correspondant à la quantité d'air strictement nécessaire à la combustion stœchiométrique d'un kg de combustible:

$$m_{a,1} = \frac{(32 + 3.76 \times 28)(z + \frac{y - 2x}{4})}{12z + y + 16x} \quad (24.1)$$

\dot{m}_a : Le débit d'air de combustion et \dot{m}_c : Le débit de carburant.

4.4.1. Calcul de No (ppm):

$$NO(ppm) = \frac{NO \text{ mole fraction} \times 10^6}{1 - H_2O \text{ mole fraction}} \quad (25)$$

4.4.2. Capacité thermique:

La chaleur spécifique à pression constante C_p est calculées sous forme polynomiale, est estimée en utilisant un polynôme d'ordre cinq:

$$\frac{C_p(T)}{R} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 \quad (26)$$

a_0, \dots, a_5 : Constantes

- Méthane (CH₄)

For $300 \leq T < 1000$

$$C_p(T) = 403.5847T + 9.057335T^2 - 0.01442509T^3 + 1.580519e^{-5}T^4 - 6.343051e^{-9}T^5 \quad (27)$$

- Azote (N₂)

For $300 \leq T < 1000$

$$C_p(T) = 979.043T + 0.4179639T^2 - 0.001176279T^3 + 1.674394e^{-6}T^4 - 7.256297e^{-10}T^5 \quad (28)$$

- Oxygène (O₂)

For $300 \leq T < 1000$

$$C_p(T) = 834.8265T + 0.292958T^2 - 0.0001495637T^3 + 3.413885e^{-7}T^4 - 2.278358e^{-10}T^5 \quad (29)$$

- **Vapeur d'eau (h2o)**

For $300 \leq T < 1000$

$$C_p(T) = 1563.077T + 1.603755T^2 - 0.002932784T^3 + 3.216101e^{-6}T^4 - 1.156827e^{-9}T^5 \quad (30)$$

Chapitre 5 Résultats et Discussion

5.

5.1. Introduction:

Dans ce chapitre on présente les résultats des simulations numériques, effet de différent carburant, ainsi l'influence de la température sur les émissions polluantes NOx.

Les modèles utilisés sont **EDM** pour la combustion et **k-ε** pour la turbulence. Les paramètres tels que la température, la vitesse, distribution de CH₄ et d'autres carburants, l'apparition de NOx thermique seront analysés en détail.

5.2. Description du problème:

Le code fluent a été utilisé pour simuler le transport d'écoulement réactif dans une chambre de combustion, la configuration géométrique est illustrée sur la figure 1.

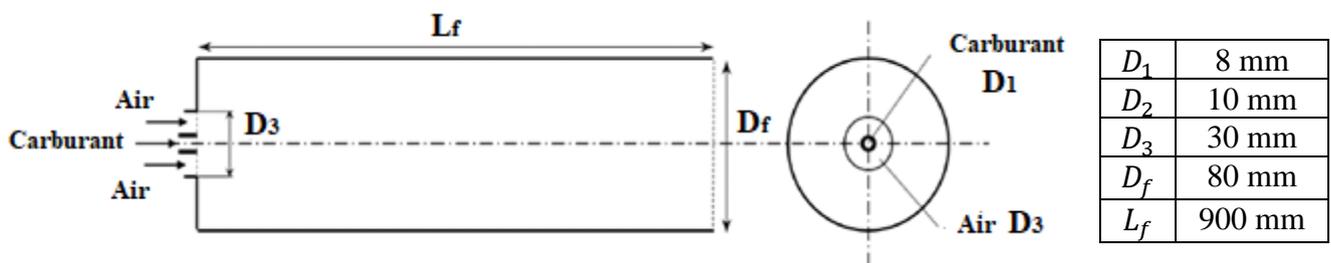


Figure 1. Vue schématique de la chambre de combustion [7].

La présente étude, est réalisée sur la base des recherches expérimentales de Zhou et al. [7]. La chambre de combustion est considérée comme la flamme à jet de diffusion de méthane turbulent et co-écoulement axisymétrique. Le carburant est injecté à travers une buse à jet de 8 mm de diamètre (D_1). Le jet d'air provient d'une buse circulaire de 30 mm de diamètre (D_3). Le mélange air / carburant est éjecté vers une chambre de combustion cylindrique de diamètre D_f et de longueur L_f .

Dans l'étude de Zhou et al [7]. Les débits d'entrée d'air et de méthane sont réglés respectivement à 8,9 m³/h et 0,8932 m³/h. La température de la paroi est de 500 K et la température d'entrée air-carburant est de 300 K. La condition à la limite de la sortie est la pression de sortie. La fonction de mur standard est également appliquée pour prendre en compte le traitement près du mur.

Dans ce travail, on a pris cinq réactions chimiques:

- Méthane: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
- Diésel: $2C_{10}H_{22} + 31O_2 \rightarrow 20CO_2 + 22H_2O$
- Essence: $C_7H_{16} + 11O_2 \rightarrow 7CO_2 + 8H_2O$
- Kérosène: $4C_{12}H_{23} + 71O_2 \rightarrow 48CO_2 + 46H_2O$

- GPL:

- Butane: $2C_4H_{10} + 13O_2 \rightarrow 8CO_2 + 10H_2O$
- Propane: $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$

5.2.1. Maillage et conditions aux limites:

5.2.1.1. Condition aux limites:

Dans cette partie on va définir les paramètres utilisés lors de la simulation numérique ainsi que les conditions aux limites imposées. Le **Velocity inlet** a été apporté à l'entrée de carburant et de l'air et **pressure outlet** pour la sortie (outlet). Une frontière **axisymétrique** est choisie sur l'axe de la chambre de combustion.



Figure 2: La géométrie du modèle sur fluide en 2D.

Enter Ch4 → velocity inlet $Q_m = \rho_{Ch4} \times Q_v$ avec $Q_v = V_{in} \times S \rightarrow V_{in} = \frac{Q_v}{S}$

Enter Air → velocity inlet $Q_m = \rho_{air} \times Q_v$ avec $Q_v = V_{in} \times S \rightarrow V_{in} = \frac{Q_v}{S}$

Sortie → Pressure Outlet

5.2.1.2. Maillage:

La génération du maillage a été accomplie à l'aide du **Maillage (Mesh)**. Un maillage est une partition de l'espace ou d'un domaine en cellules appelées éléments.

Plusieurs cas de la simulation numérique ont été testés, afin d'atteindre une solution indépendante du grille. Au cours de l'adaptation, chaque cellule carrée va se diviser en quatre sous cellules carrées avec des dimensions identiques. L'adaptation a été effectuée sur les zones du domaine comportant des gradients importants de vitesse, température ou autres variables régissant sur les flammes. Le maillage adapté comporte 10500 cellules.

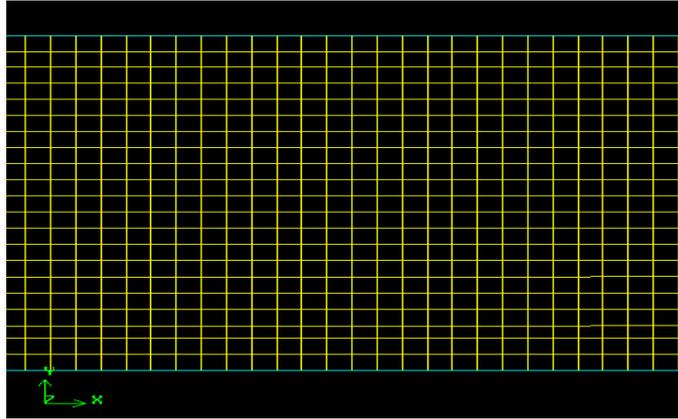


Figure3: Structure de maillage.

5.2.2. *Modèle utilisés pour la simulation:*

- Création de la géométrie sous logiciel disgn modeler.
- Choix de la stratégie de maillage.
- Vérifier le maillage.

La génération du calcul dans fluent passe par les étapes suivantes:

- On lance le solveur FLUENT, on sélectionne **2D** (Dimension) et parallèle (Local Machine).
- General → *Scale* → *Unité*
- General → *Axisymmetric* → *Check*
- Le modele physique: *Models* → *Energy-On*
- L'écoulement est turbulent et on a représenté sur fluent:
Model → *k-epsilon (2 eqn)*
- Les caractéristiques du fluide: *Model* → *Species Transport*.
Reactions → *Volumetric*.
Mixture → *Mixture material (methane-air)*.
- Model de combustion → *Eddy Dissipation(EDM)*.
- On ajoute *Species* → *No*.
- Les conditions aux limites: *Boundary Conditions*.
- Contrôle de la convergence: *Monitors* → *Residual*.
- Resoudre le probleme: *initialiser*.
- Afficher les resultats : *Results* → *Graphics / Contours*.

On a refait les mêmes étapes pour les autres carburants.

5.3. Validation des modèles utilisés:

5.3.1. Validation des profils de Temperature:

Pour valider nos résultats numériques, nous avons d'abord comparé la distribution de température pour les différents modèles d'écoulement thermique turbulent de méthane avec les résultats expérimentaux obtenus par Zhou et al [7] qui illustrent sur la figure 1. Les profils des températures obtenues montrent une augmentation brusque de température, suivie par une stabilisation puis une diminution. La température est l'une des caractéristiques propre de la combustion, les valeurs des températures sont comprises (300K, 1400 K). On remarque une similitude claire entre notre cas de simulation et les résultats expérimentaux de Zhou et al [7]. La température maximale obtenue est pratiquement identique pour notre simulation et l'expérimentale de Zhou et al [7].

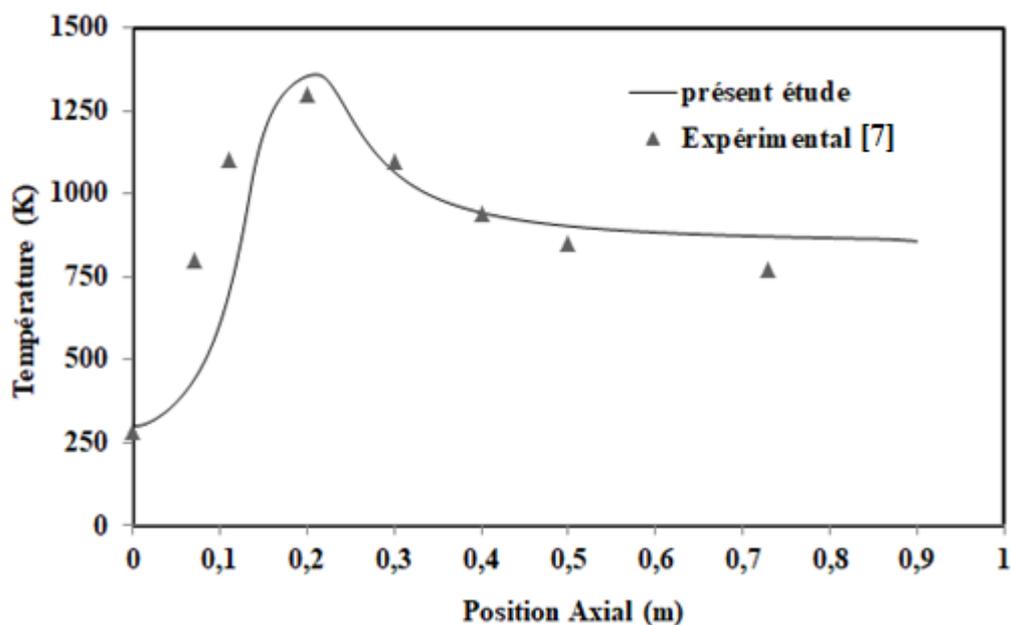


Figure 1: Validation des Profil de températures en fonction de la position axiale.

5.3.2. Validation de profile de NO thermique:

La figure 2 représente les valeurs de NO thermique dans une section de la chambre pour le modèle de l'écoulement thermique turbulent. Les valeurs de formation de NO sont assez proches des données expérimentales disponibles [7].

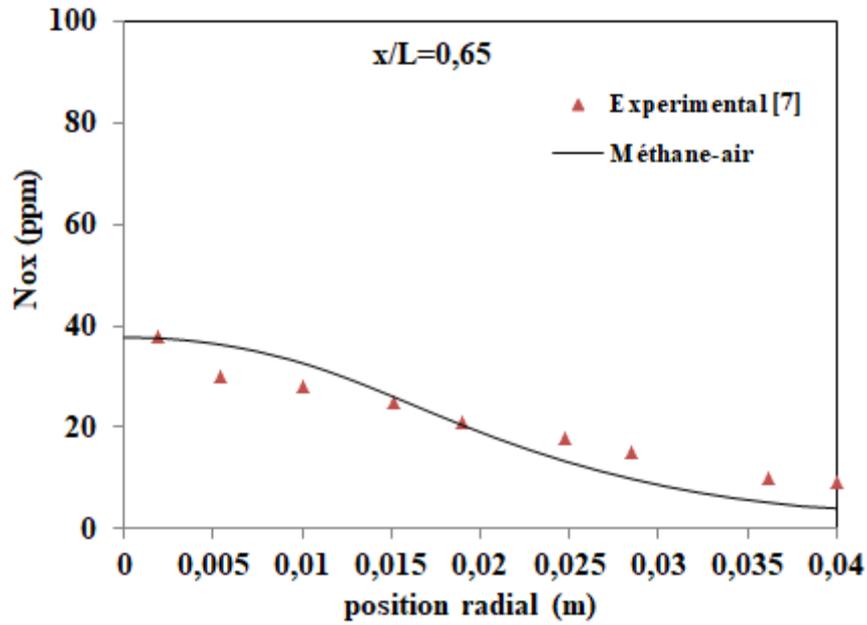
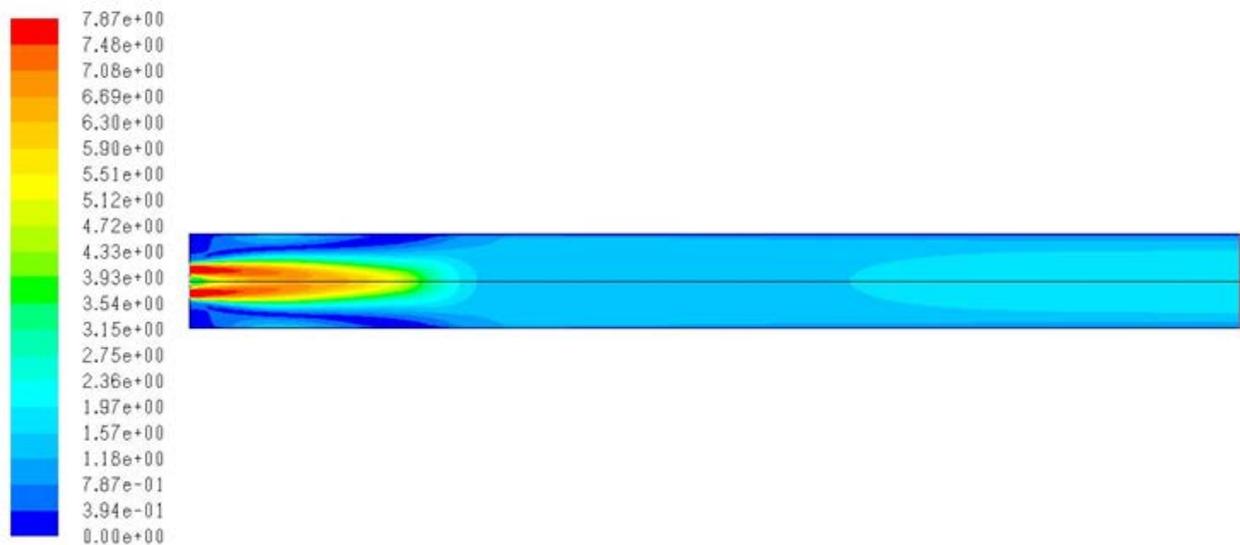


Figure 2: Comparaison de NO thermique de la présente étude et ceux de Zhou et al [7] en fonction de la position radiale.

5.4. Contour de température et de vitesse avec et sans combustion pour méthane-air:

La figure 3(a) et (b) et la figure 4 (a) et (b) montre les contours de vitesse et de température avec et sans combustion. La température maximale prévue par le modèle de combustion est de 2200 K.

(a) Sans combustion



(b) Avec combustion

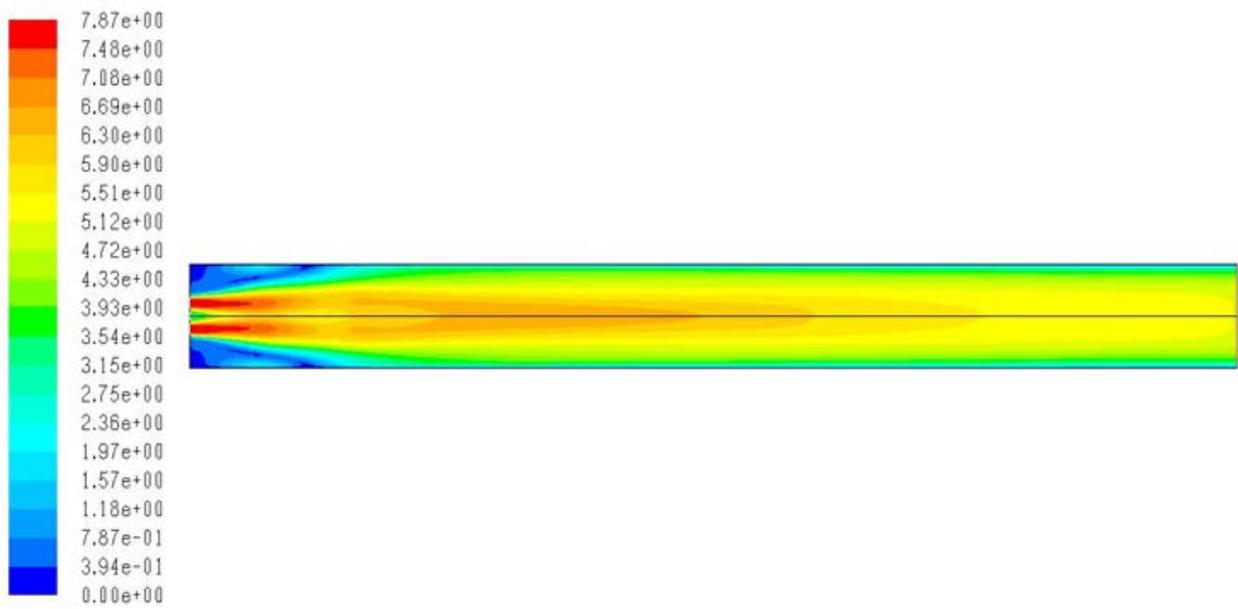
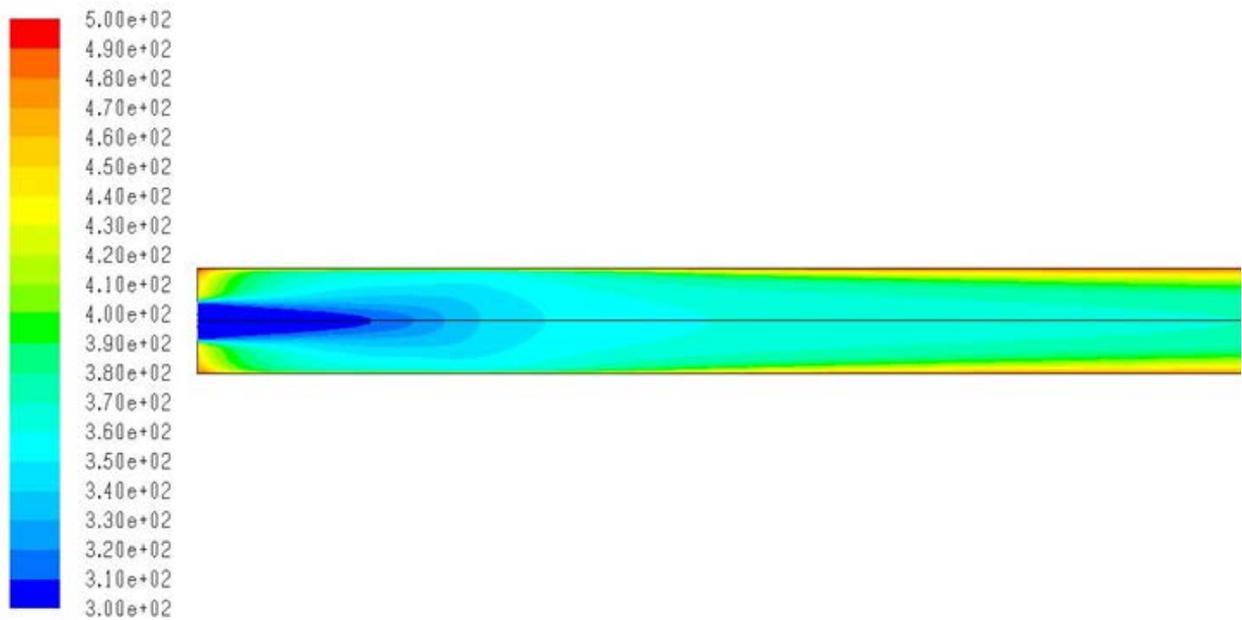


Figure 3: Contours de vitesse (a) sans combustion et (b) avec combustion pour un écoulement thermique turbulent de méthane-air.

(a) Sans combustion



(b) Avec combustion

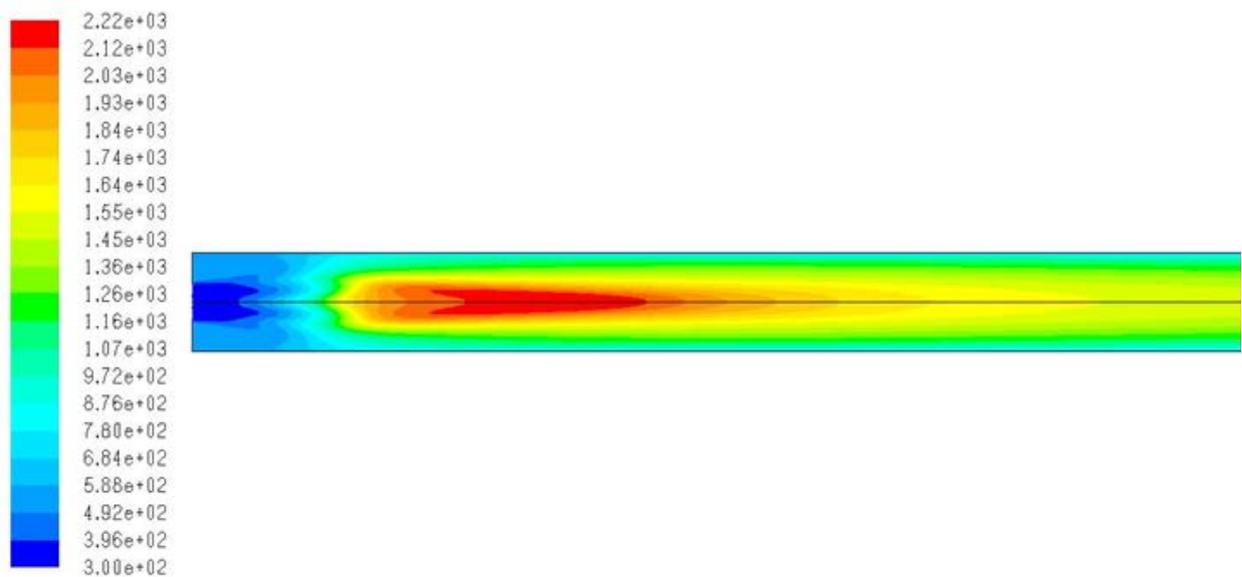


Figure 4: (a) Contours de température vitesse (a) sans combustion et (b) avec combustion pour un écoulement thermique turbulent de méthane-air.

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

5.5. Les Oxydes d'azote:

5.5.1. Contours de la fraction massique de NOx:

La figure 5 montre l'apparition des NOx thermique pour le CH₄.

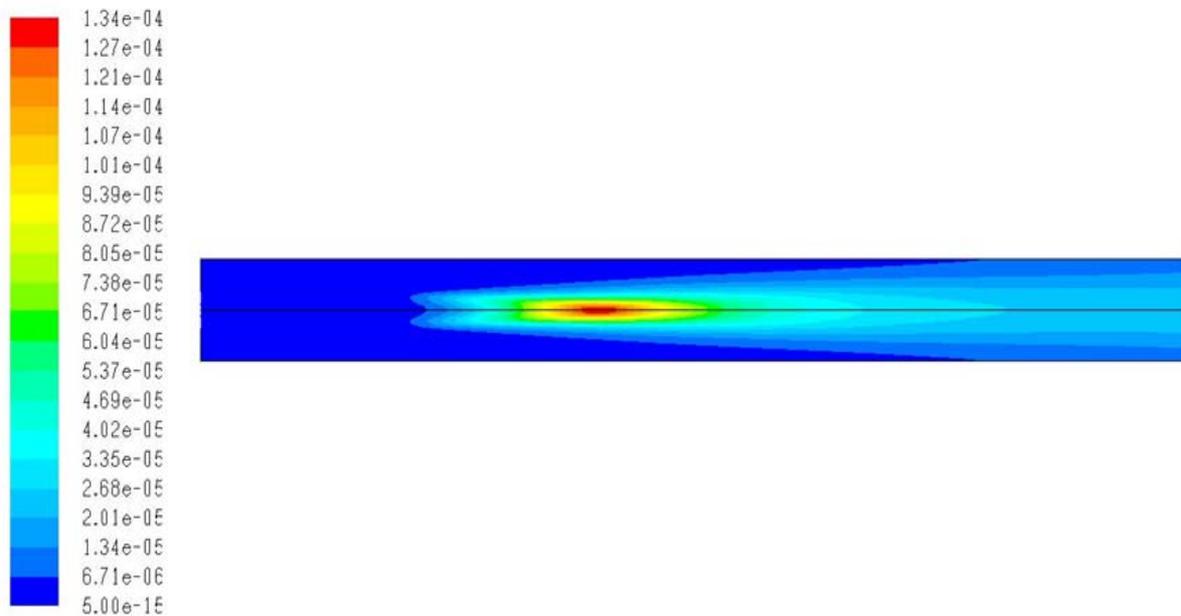


Figure 5: Contour de la fraction massique de NOx.

Les émissions de NO_x, regroupent le dioxyde d'azote NO₂ et l'oxyde nitrique NO et parfois d'autres composés tel que le N₂O en proportions beaucoup plus faibles. L'oxyde nitrique NO étant prédominant. Les NO_x sont formés quand la combustion atteint des températures très élevées. Ces conditions sont réalisées pendant la combustion d'un mélange proche de la stoechiométrie dans un environnement à haute pression et température.

5.5.2. La variation des émissions de NO_x pour différent carburants:

La variation des émissions de NO_x avec la position radiale de la chambre de combustion au frein pour le diesel, l'essence, le GPL et le kérosène est présentée sur la figure 6. Ces émissions de NO_x s'élèvent pour le GPL et diminuent pour l'essence. Il n'est donc pas seulement question du type de moteur, mais aussi du type d'injection, du type de véhicule et de l'usage qu'on en fait. En règle générale, on peut dire que les véhicules essence sont en moyenne moins polluants que les véhicules par d'autre carburant.

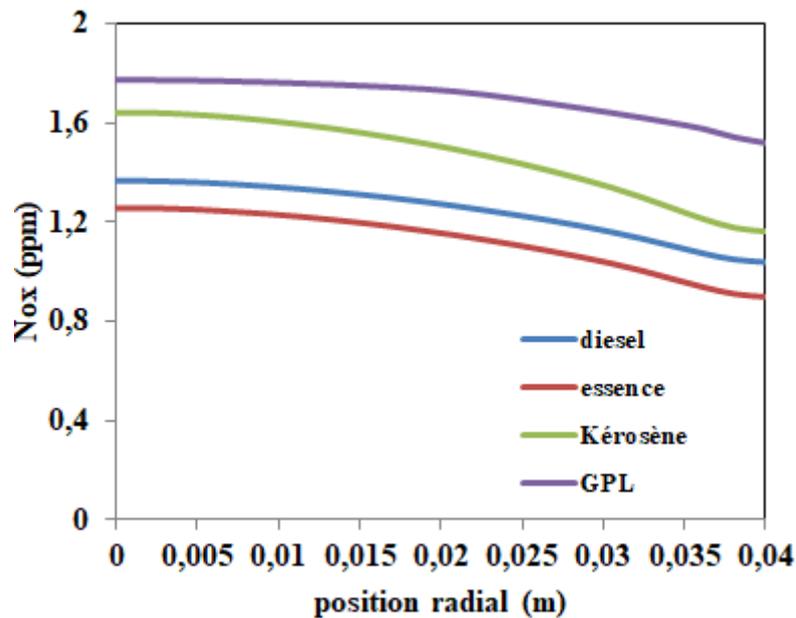
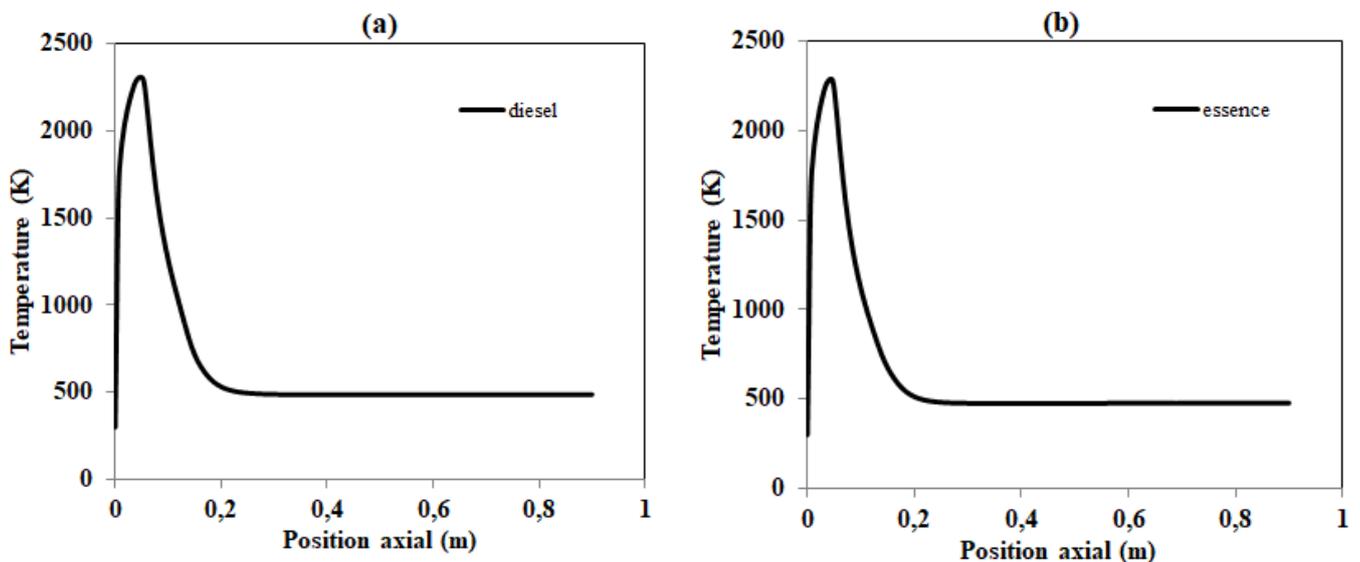


Figure 6: Evolution de la concentration de NO_x dans les gaz d'échappement pour différent carburant.

5.6. La distribution de température pour différent carburant:

La figure 7 présente la distribution de température pour différent carburant (a) diesel, (b) essence, (c) kérosène et (d) GPL en fonction de la position axial. D'après Heywood [61], l'intervalle des températures maximales du cycle est la plus contribuant dans la formation des oxydes d'azote, c'est-à-dire après le début de la combustion et au voisinage de la pression maximale du cycle. Dans cet intervalle les NO_x se forment jusqu'à atteindre un maximum, ensuite la température commence à diminuer et les NO_x se décomposent pendant un certain temps avant de se stabiliser jusqu'à l'échappement.



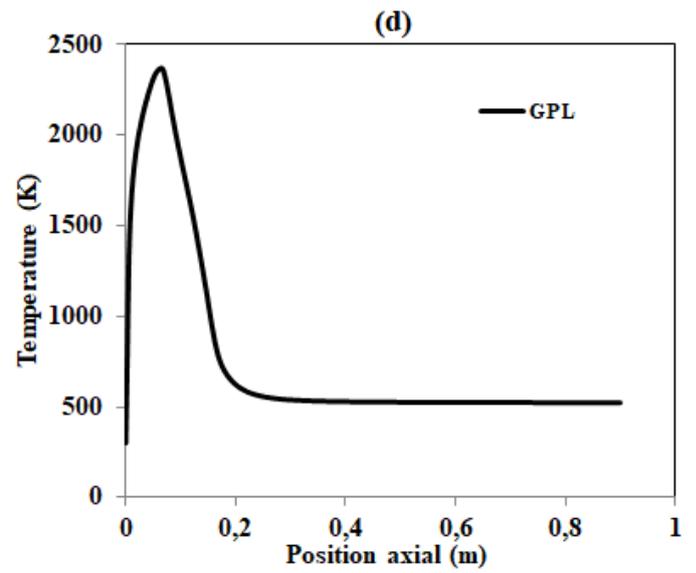
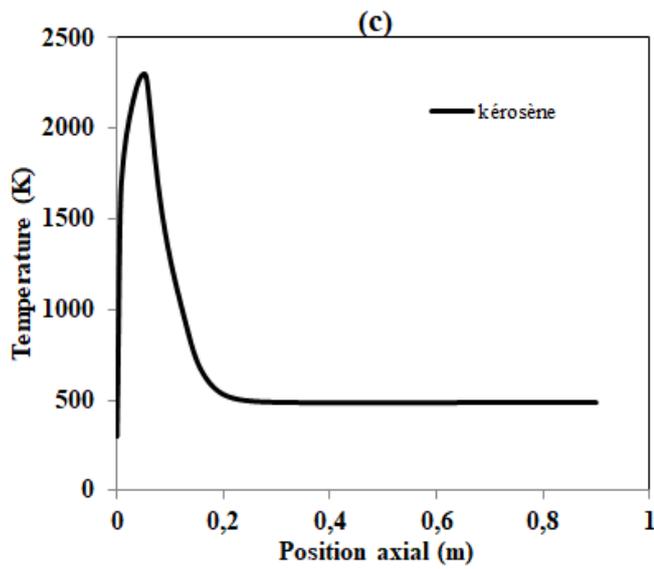


Figure 7: La distribution de température pour différent carburant (a) diesel, (b) essence, (c) kérosène et (d) GPL en fonction de la position axial.

Conclusion Générale

Notre étude de simulation numérique a été réalisée afin de mieux comprendre les phénomènes qui régissent la combustion pour une flamme diffusion (non-pré mélangé) turbulente de Méthane – Air et d'autres carburants.

Dans cette étude, on a utilisé un code numérique Fluent avec une configuration axisymétrique 2D. La simulation numérique est réalisée pour une flamme à diffusion. Le modèle $k-\epsilon$ réalisable et le modèle de dissipation des tourbillons (EDM) sont adoptés pour prédire le comportement de l'écoulement turbulent et de la combustion, respectivement.

- Dans la chambre de combustion, l'écoulement est turbulent, c'est-à-dire que la vitesse des fluides, mesurée en un point, fluctue continuellement de façon apparemment aléatoire, même en régime parfaitement établi. Cela est vrai aussi pour la température et toute autre caractéristique du milieu.
- La turbulence se caractérise donc par une fluctuation dans le temps et l'espace des grandeurs physiques de l'écoulement, telles que la vitesse ou la pression et par la présence de tourbillons.
- La dimension de ces tourbillons s'étend dans un spectre dont la taille dépend du régime d'écoulement, caractérisé par le nombre de Reynolds.
- Les NO_x sont formés quand la combustion atteint des températures très élevées. Ces conditions sont réalisées pendant la combustion d'un mélange proche de la stoechiométrie dans un environnement à haute pression et température.
- les véhicules essence sont en moyenne moins polluants que les véhicules par d'autre carburant.
- l'intervalle des températures maximales du cycle est la plus contribuant dans la formation des oxydes d'azote.

Références

- [1] Turns, S. R., Mantel S. J., an Introduction to Combustion, Second Edition, McGraw Hill, New 268 York, 2000.
- [2] Beloceвич S., et al. Modeling of pulverized coal combustion for in-furnace NO_x reduction and flame control, *Thermal Science*, 21 (2017), 3, pp. S597-S615.
- [3] Beloceвич S., et al., Modelling and Optimization of Processes for Clean and efficient pulverized coal combustion in utility boiler, *Thermal Science*, 20 (2016), 1 , pp. S183-S196.
- [4] Yichao L., et al, Combustion characteristics of a slotted swirl combustor: An experimental test and numerical validation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66 (2015), pp. 140–147.
- [5] Alemi E., Rajabi-Zargarabadi M., Effects of jet characteristics on NO formation in a jet-stabilized combustor, *International Journal of Thermal Sciences*, 112 (2017), pp. 55-67.
- [6] Fang W., Xiang X., Effect of turbulence on NO formation in swirling combustor, *Chinese Journal of Aeronautics*, 27, (2014), 4, pp. 797–804.
- [7] Zhou L. X., Chen L. X., Studies on the effect of swirl on NO formation in methan/air turbulent combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, 29, (2002), pp. 2235–2242.
- [8] Amini B., et al., A comparative study of variant turbulence modeling in the physical behaviors of diesel spray combustion, *Thermal Science*, 15, (2011), 4, pp. 1081–1093.
- [9] Scholtissek A., et al., In-situ tracking of mixture fraction gradient trajectories and unsteady flamelet analysis in turbulent non-premixed combustion, *Combustion and Flame*, 175, (2017), pp.243–258.
- [10] Irannejad A., et al, Large eddy simulation of turbulent spray combustion, *Combustion and Flame*, 162, (2015), 2, pp. 431-450.
- [11] Spalding D.B., Development of the Eddy-Break-Up model of turbulent combustion, *The Combustion Institute*, (1978), pp.1657-1663.
- [12] Abdel-Gayed R.G., Bradley D., McMahan M., Turbulent flame propagation in premixed gas: Theory and Experiment, In 17th Symposium (International) on Combustion, (1979), pp.245-254.

- [13] Bray K.N.C., The interaction between turbulence and combustion, In17th Symposium (International) on Combustion, In17th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute (1979).
- [14] Bell J.B., Day M.S., Grear J.F., Numerical Simulation of Premixed Turbulent Methane Combustion”, Computing Sciences Directorate, Publications of Lawrence Berkeley National Laboratory, (2002).
- [15] Nagano Y., Shimada M., Development of a two-equation heat transfer model based on direct simulations of turbulent flows with different Prandtl numbers. *Physics of Fluids*, 8, (1996), pp. 3379–3402.
- [16] Launder BE. On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows. *Journal of Heat Transfer (ASME)*, 110, (1988), pp. 1112–1128.
- [17] Wikstrom PM., Derivation and investigation of a new explicit algebraic model for the passive scalar flux. *Physics of Fluids*, 12, (2000), pp. 688–702.
- [18] Abe K, Suga K. Towards the development of a Reynolds-averaged algebraic turbulent scalar flux model. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 22, (2001), pp. 19–29.
- [19] Rogers MM, et al. An algebraic model for the turbulent flux of a passive scalar, *Journal of Fluid Mechanics*, 203, (1989), pp. 77–101.
- [20] Suga K., Abe K., Nonlinear eddy viscosity modeling for turbulence and heat transfer near wall and shear-free boundaries, *Int J Heat Fluid Flow*, 21, (2000), pp. 37–48.
- [21] Bazdidi-Tehrani F., Rajabi-Zargarabadi M., Application of second moment closure and higher order generalized gradient diffusion hypothesis to impingement heat transfer, *Transactions of The CSME*, 32, (2008), pp. 91–105.
- [22] Rajabi-Zargarabadi M., Bazdidi-Tehrani F., Implicit algebraic model for predicting turbulent heat flux in film cooling flow, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 64, (2010), pp. 517–531.
- [23] Rup K., Wais P., An Application of the K- ϵ Model with Variable Prandtl Number to Heat Transfer Computation in Air Flows, *Heat Mass Transfer*, 34, (1999), pp. 503-508.
- [24] Mazaheri K., et al., A modified turbulent heat-flux model for predicting heat transfer in separating-reattaching flows and film cooling applications, *Appl. Therm. Eng.*, 110, (2017), pp. 1609–1623.

- [25] Mazaheri K., et al., Application of a modified algebraic heat-flux model and second-moment-closure to high blowing-ratio film-cooling and corrugated heat-exchanger simulations, *Appl. Therm. Eng.*, 124, (2017), pp. 948–966.
- [26] <https://www.etudier.com/dissertations/Introduction-Carburants/572177.html>.
- [27] Baudin J.B., Les carburants : une source d'énergie chimique, Site de ressources en chimie pour les enseignants, (2006).
- [28] Claude G.J., Carburants et moteurs. Tome 1, Editions Technip, 1, (1997), 2710810913.
- [29] Colombano S. et al, Nature des produits pétroliers et origine du vieillissement: tentative de l'identification de la source via la prise en compte des impacts et l'analyse de l'âge approximatif des déversements, (2014).
- [30] Wauquier J.P., Raffinage du pétrole (Le). Tome 1. Pétrole brut. Produits pétroliers. Schémas de fabrication, Editions Technip, 1, (1998), 2710810794.
- [31] Hocini N.H., Etude d'un système de vaporisation du GPL au niveau de L'UNITE GPL-2/ CIS-HMD, (2018).
- [32] https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique.
- [33] Roland B., Michel D., Combustion et les flammes, Editions OPHRYS, (1995), 2710810840.
- [34] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustion>.
- [35] Lucien B., Daniel F., Thermodynamique et énergétique, PPUR presses polytechniques, 1, (2005), 2880745454.
- [36] Moussou J., Caractérisation expérimentale du flux thermique transitoire pariétal pour différents modes de combustion, Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique, (2016).
- [37] Hmataity H., Abbad S., Audit énergétique des chaudières et du turbo-alternateur centrale turbine à gaz mohammedia (3X100MW), (2010).
- [38] <https://www.xpair.com/lexique/definition/bruleur.htm>.
- [39] <https://sites.google.com/site/pollusiondelenvironnement/definition-de-la-pollutiob>.
- [40] Brahim H. B., Environnement et développement durable, Culture générale.
- [41] <https://www.airparif.asso.fr/pollution/differents-polluants#GoTop>.
- [42] Paul D., Automobile et pollution, Editions OPHRYS, (1995), 2710810727.

- [43] Piperel A., Impact des propriétés des gaz d'échappement recyclés sur l'initiation et le déroulement de la combustion : caractérisation paramétrique de la réactivité de l'EGR, *Energétique, transfert thermique et combustion*. (2008).
- [44] Wartel M., Développement de la méthode Fluorescence Induite par Laser en jet froid pour la quantification d'espèces aromatiques impliquées dans la formation des particules de suie dans les flammes, *Optique et lasers, Physico-chimie, Atmosphère*, (2014).
- [45] Zouaoui B., Simulation numérique de l'effet du type de carburant sur la combustion et les émissions polluants dans un Moteur (MCI), *Génie mécanique*, (2015).
- [46] Asthana A., Modélisation mathématique de la formation des NO_x et de la volatilisation des métaux lourds lors de l'incinération sur grille d'ordures ménagères, *Génie des procédés*. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, (2008).
- [47] Hill S.C., Smoot L.D., Modelling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, 26, (2000), 417-58.
- [48] Zeldovich Y.B., The oxidation of nitrogen in combustion and explosions, *Acta Physicochim*, 21, (1946), pp 577-628.
- [49] Malte P.C., Pratt D.T., Measurement of atomic oxygen and nitrogen oxides in jet stirred combustion, [Proceedings] 15th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, (1974), pp 1061-70.
- [50] Sawyer R.F., The formation and destruction of pollutants in combustion processes, Plenary lecture, 18th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, (1981), pp 1-22.
- [51] Bowman C.T., Kinetics of nitric oxide formation in combustion processes, [Proceedings] 14th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, (1973), pp 729-38.
- [52] Hanson R.K., Salimian S., Survey of rate constants in H/N/O systems. In W.C. Gardiner, editor, *Combustion Chemistry*, (1984).
- [53] Hayhurst A.N., Vince I.M., Nitric oxide formation from N₂ in flames: the importance of "prompt" NO, *Progress in Energy and Combustion Science*, 6, (1980), pp 35-51.

- [54] Fenimore C.P., Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames, 13th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, (1971), pp 373-80.
- [55] Miller J.A., Bowman C.T., Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion, Progress in Energy and Combustion Science, 15, (1989), pp 287-338.
- [56] Kramlich J.C., Cole J.A., McCarthy J.M., & Lanier W.S., Mechanisms of nitrous oxide formation in coal flames. Combustion and Flame, 77, (1989), pp 375-384.
- [57] Bose A.C., Dannecker K.M., & Wendt J.O.L., Coal composition effects on mechanisms governing the destruction of nitric oxide and other nitrogenous species during fuel-rich combustion. Energy & Fuels, 2, (1988), pp 301-08.
- [58] Bowman C.T., Kinetics of nitric oxide formation in combustion processes, 14th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, (1973), pp 729-38.
- [59] Barnes F.J., Bromly J.H., Edwards T.J., & Madngezewsky R., NO_x emissions from radiant gas burners, Journal of the Institute of Energy, 155, (1988), pp 184-88.
- [60] Morley C., The formation and destruction of hydrogen cyanide from atmospheric and fuel nitrogen in rich atmospheric-pressure flames, Combustion and Flame, (1976).
- [61] Heywood J. B., Internal combustion engines fundamentals, Mc Graw Hill, 1988