الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie de la Matière



Mémoire de Fin d'étude

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Mécanique

Option : Energétique et thermique des systèmes

THEME

Etude de l'effet des conditions d'injection sur les caractéristiques thermiques de la flamme dans un système de combustion à géométrie complexe (Approche CFD utilisant Ansys CFX)

Préparé et présenté par :

DAOUD Atallah

GACHI Allal

Proposé et dirigé par :

Dr. Alliche Mounir

Promotion : 2014-2015

Remerciements

*On tient tout d'abord à remercier « **Dieu, Allah** » le Tout Puissant.*

*Les plus sincères remerciements vont également à notre encadreur Dr. **Alliche Mounir** pour la qualité de son encadrement et ses encouragements qui ont été indispensables pour garder le moral dans les moments les plus compliqués, pour ses brillantes intuitions et pour l'optimisme qu'il a su me transmettre.*

On souhaite également remercier les membres du jury qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps à notre mémoire.

Merci à nos collègues et amis avec lesquels on a beaucoup partagé, en particulier.

Un grand merci à toute la famille, et surtout à notre parents, notre frères et à notre sœurs, merci pour votre soutien inconditionnel.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A la mémoire de mon père

A ma mère,

A mes frères et sœurs,

et toute la famille,

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans ce travail.

DAOUD Atallah

Dédicace

Ce travail est dédier à ma mère et à mon père pour

Leurs aides et leur patience, et que je pense ne jamais

Pouvoir assez remercier.

A mes frères, A mes sœurs, toute ma famille.

A tous mes amis. A tous ceux qui mon aider de

Près ou de loin.

GACHI Allal

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur la combustion et les flammes

I.1 Introduction : 3

I.2 Définition de la combustion : 3

I.3Modes de combustion élémentaires : 4

I.3.1 La combustion pré-mélangée : 4

I.3.2 La combustion non pré-mélangée : 4

I.3.3 La combustion partiellement pré-mélangée : 4

I.4 La combustion turbulente : 5

I.4.1 La combustion turbulente non pré-mélangée (diffusion) : 5

I.5 Applications industrielles de la combustion turbulente : 6

I.6 Les trois catégories de combustion : 6

I.7 Les Flammes : 6

I.7.1 Définition : 6

I.7.2 Classification des flammes : 6

I.7.2.a La flamme de diffusion : 7

I.7.2.b La flamme de pré-mélange : 7

I.7.3 Stabilité des flammes : 8

I.7.4 Propagation de la flamme : 9

I.8 Le mélange stœchiométrique : 9

Chapitre II : propriétés de méthane

II.1 Histoire : 10

II.2 Définition : 10

II.3 Formation et stockages naturels : 11

II.1.1 Le méthane du sous-sol terrestre : 11

II.1.2 Le méthane des fonds marins : 11

II.4 Propriétés physico-chimiques de méthane : 12

II.5 La combustion du méthane : 13
II.6 Utilisation : 14
II.7 Biocarburant de troisième génération : 15
II.8 Stockage énergétique : 15
II.9 Origine des émissions : 15
II.10 Réduire les émissions de méthane : 16

Chapitre III : modélisation mathématique

III.1 Introduction : 17
III.2 Objectifs du travail : 17
III.3 Equations de la combustion gazeuse : 17
III.3.1 Equations de continuité : 18
III.3.2 Equations de conservation de quantité de mouvement : 18
III.3.2.a Effet de la turbulence sur les équations instantanées de Navier –Stokes : 19
III.3.3 Equations de conservation de l'énergie : 19
III.3.4 Equations de conservation des espèces chimiques : 20
III.3.5 Equitations d'état : 20
III.3.6Modèle de turbulence : 21
III.3.6.a Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente : 22
III.3.6.b Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente : 22
III.3.7 Modélisation de la réaction de combustion : 23
III.3.7.a Modèle Eddy Dissipation : 23
III.3.7.b Mélange Rate Limite : 23
III.3.7.c Eddy Dissipation Modèle Coefficient A / B : 24
III.4 Le Modèle P1 : 25

Chapitre IV : Présentation du code ANSYS CFX

IV.1 Introduction : 26

IV.2 Approche CFD dans la simulation du problème de combustion : 26

IV.2.1 Définition de la "CFD" : 26

IV.2.2 Contexte historique : 26

IV.2.3 Méthodologie : 27

IV.3 Présentation d'ANSYS CFX : 27

Chapitre II : Résultats et discussions

V.1 Introduction : 40

V.2 Modélisation de la chambre de combustion: 40

V.2.1 Configuration éxpérimentale : 40

V.2.2 Propriétés des mélanges : 41

V.3 Résultats et discussions : 42

V.3.1 Effet de la vitesse d'entrie de l'air : 42

V.3.1.a champ de la fraction massique de CO2 : 43

V.3.1.b champ de la température [k] : 44

V.3.1.c champ de fraction massique de CH4 : 45

V.3.1.d champ de fraction massique de NO : 46

V.3.2 Effet de la vitesse d'entrie de fuel (méthane) : 47

V.3.2.a champ de la fraction massique de CO2 : 47

V.3.2.b champ de fraction massique de CH4: 48

V.3.2.c champ de la température [k] : 50

V.3.2.d champ de fraction massique de NO : 51

V.3.3 Effet de la température de fuel d'entrie sur la flamme : 53

V.3.3.a champ de la fraction massique de CO2 : 53

V.3.3.b champ de la température [k] : 54

V.3.3.c champ de fraction massique de NO: 55

V.3.4 Effet de la température d'entrie d'air sur la flamme : 56

V.3.4.a champ de la fraction massique de CO2 : 57

V.3.2.b champ de fraction massique de CH4: 58
V.3.2.c champ de la température [k] : 59
V.3.2.d champ de fraction massique de NO : 60

Liste de figure

Figure I.1 : Triangle du feu 1
Figure I.2 : Type de flamme non pré-mélangée 5
Figure I.3 : Type de flamme pré-mélangée 5
Figure I.4 : les différents types de combustion et régimes d'écoulement 6
Figure II.1 : Combustion du méthane dans le dioxygène 9
Figure II.2 : Flamme complète et incomplète 12
Figure V.1 : Chambre de combustion adoptée 40
Figure V.2 : Géométrie de la chambre de combustion étudiée 41
Figure V.3 : Lignes axiale et radiale 42
Figure V.4 : Champ de la fraction massique de CO2 avec la variation de la vitesse d'air 43
Figure V.5 : Evolution axial et radial de concentration de CO2 avec la variation de la vitesse d'air 43
Figure V.6 : Champ de la température [k] avec la variation de la vitesse d'air 44
Figure V.7 : Evolution de la température suivant les lignes axial et radial avec la variation de la vitesse d'air 44
Figure V.8 : Champ de la fraction massique de CH4 avec la variation de la vitesse d'air 45
Figure V.9 : Evolution axial et radial de concentration de CH4avec la variation de la vitesse d'air 45
Figure V.10 : Champ de la fraction massique de NO avec la variation de la vitesse d'air 46
Figure V.11 : Evolution de la fraction massique de NO suivant les lignes axial et radial avec la variation de la vitesse d'air 46
Figure V.12 : Champ de la fraction massique de CO2 avec la variation de la vitesse de fuel. 47
Figure V.13 : Evolution de la fraction massique de CO2suivant les lignes axial et radial avec la variation de la vitesse de fuel 48
Figure V.14 : Champ de la fraction massique de CH4 avec la variation de la vitesse de fuel. 48
Figure V.15 : Evolution de la fraction massique de CH4suivant les lignes axial et radial avec la variation de la vitesse de fuel 49
Figure V.16 : Champ de la température [k] avec la variation de la vitesse de fuel 50
Figure V.17 : Evolution de la température [k] suivant les lignes axial et radial avec la variation de la vitesse de fuel 50
Figure V.18 : Champ de la fraction massique de NO avec la variation de la vitesse de fuel . 51
Figure V.19 : Evolution de la fraction massique de NO suivant les lignes axial et radial avec la variation de la vitesse d'air 51

Figure V.20 : représentation d'évolution de fraction massique de CO2 au plan radial et axial 52

Figure V.21 : Champ de la fraction massique de CO2 avec la variation de température de fuel. 53
Figure V.22 : Evolution de la fraction massique de CO2 suivant les lignes axiales et radial avec la variation de la température de fuel 53
Figure V.23 : Champ de la température [k] avec la variation de la température de fuel 54
Figure V.24 : Evolution de la température suivant les lignes axial et radial avec la variation de la température de fuel 54
Figure V.25 : Champ de la fraction massique de NO avec la variation de température de fuel. 55
Figure V.26 : Evolution de la fraction massique de NO suivant les lignes axial et radial avec la variation de la température de fuel 56
Figure V.27 : Champ de la fraction massique de CO2 avec la variation de température d'air. 57
Figure V.28 : Evolution de la fraction massique de CO2 suivant les lignes axial et radial avec la variation de la température d'air 57
Figure V.29 : Champ de la fraction massique de CH4 avec la variation de température d'air. 58
Figure V.30 : Evolution de la fraction massique de CH4suivant les lignes axial et radial avec la variation de la température d'air 58
Figure V.31 : Champ de la température avec la variation de la température d'entrée d'air. .. 59
Figure V.32 : Evolution de la température d'entrée suivant les lignes axial et radial avec la variation de la température d'air 59
Figure V.33 : Champ de la fraction massique de NO avec la variation de température de fuel. 60
Figure V.34 : Evolution de la fraction massique de NO avec la variation de la température d'air 60

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients principaux des trois modes de combustions 3

Tableau II.1 : Propriétés physico-chimiques de méthane 15

Nomenclatures

C	Variable d'avancement de la réaction	[--]
c_p	Chaleur spécifique à pression constante du mélange	[J/ (kg K)]
c_{pk}	Chaleur spécifique à pression constante de l'espèce k	[J/ (kg K)]
$c_\mu, c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2,} \sigma_k$et σ_ε	Constantes du modèle k-ε	[--]
D_K	Coefficient de diffusion de l'espèce k dans le mélange	[m2/s]
D_a	Nombre de Damkhöler	[--]
D_{inj}	Diamètre de l'injecteur (brûleur)	[m]
f_{kf}	Forces spécifique de volume agissant sur l'espèce *k* dans la direction *j*	[m/s2]
$h_{F,K}$	Enthalpie chimique spécifique de l'espèce k	[J/kg]
hk	Enthalpie spécifique de l'espèce k	[J/kg]
hs, k	Enthalpie sensible de l'espèce k	[J/kg]
k	Energie de turbulence	[m2/s2]
Ka	Nombre de Karlovitz	[--]
L	Echelle intégrale de longueur	[m]
lδ	Epaisseur de la couche interne de la flamme	[m]
lf	Epaisseur de la flamme laminaire	[m]
lfspa	Epaisseur de la flamme laminaire (Spalding)	[m]
Lfzel	Epaisseur de la flamme laminaire (Zeldovitch)	[m]
P	Pression	[N/m2]
Q	Source de chaleur	[J/ (m^3s)]
R	Constante universelle des gaz parfaits	J/ (Kg K)]
Ret	Nombre de Reynolds de la turbulence	[--]
S	Rapport stœchiométrique	[--]
SL	Vitesse de la flamme laminaire	[m/s]
Sc	Nombre de Schmidt	[--]
T	Température	[K]

T°	Température maximale (adiabatique) de la flamme laminaire	[K]
t_η	Echelle de temps de Kolmogorov	[s]
u_i	Vitesse dans la direction i	[m/s]
u_η	Vitesse de retournement du tourbillon de Kolmogorov	[m/s]
u_i'	Fluctuation de vitesse dans la direction i	[m/s]
$V_{k,i}$	Vitesse de diffusion de l'espèce k dans la direction i	[m/s]
W_k	Masse molaire de l'espèce k	[mole/kg]
Y_k	Fraction massique de l'espèce k	[--]
Z	Fraction de mélange	[--]

Résumé :

Ce travail présente une étude numérique d'une flamme turbulente non pré-mélangée à la sortie d'un injecteur coaxial. L'écoulement considéré est un jet rond turbulent d'un mélange combustible Méthane/air. Cet écoulement est caractérisé par des rapports de densités et de vitesses élevés à l'injection. La combustion est modélisée par le Modèle Eddy Dissipation **(EDM**) et la turbulence par le modèle K-ε. L'interaction chimie turbulence est représentée par le modèle **PDF** (probability density function). L'outil informatique utilisé dans cette étude est le code de calcul **«** ANSYS - **CFX ».**

Une étude paramétrique a été menée. On a examiné, principalement, l'effet des conditions initiales sur la structure de la flamme ; en occurrence : la vitesse d'injection du méthane, la vitesse d'injection de l'air et la température d'entrée du combustible.

Les résultats de simulation obtenus sous forme de l'évolution axiale et radiale de (température et les masses fraction des espèces CO2, CH4, H2O, O2, NO, N2).

Mots clés : Combustion - Flamme non-prémélangée – CFD – Ecoulement turbulent réactif

Abstract :

This work presents a numerical study of a non-premixed turbulent flame at the outlet of a coaxial injector. The flow is considered as turbulent round jet of a combustible mixture Methane / air. This flow is characterized by relationships of densities and high injection speeds. The Eddy Dissipation Model (**EDM**) and turbulence model combustion by the **K-ε** model. The model **PDF** (probability density function) represents the chemistry turbulence interaction. The computer tool used in this study is the calculation code "ANSYS - **CFX**."

A parametric study was conducted. Were examined mainly, the effect of initial conditions on the flame structure; in this case: the injection rate of methane, the air injection speed and the fuel inlet temperature.

The simulation results obtained in the form of axial and radial changes (temperature and mass fraction of species CO2, CH4, H2O, O2, NO, N2).

Keywords: Combustion - non-premixed flame - CFD - Turbulent reactive

الملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة عددية للهب مضطرب غير مخلوط عند مخرج حاقن محوري بحيث يكون التدفق المضطرب خليط من غاز الميثان والهواء، يتميز هذا التدفق بتأثير مختلف المعاملات العنصرية للحقن مثل نموذج تبديد الدوامة **EDM** ونموذج الاضطراب **K-ε** والنموذج **PDF** يمثل التفاعل الكيميائي للاضطراب وذلك باستخدام البرنامج العددي "**ANSYS -CFX**"

نقوم في هذه الدراسة بفحص تأثير الشروط الابتدائية على بنية اللهب حيث نغير كل من سرعة حقن الهواء وسرعة حقن غاز الميثان ودرجة حرارة دخول الوقود ودرجة حرارة دخول الهواء

نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تكون على شكل تغيرات لكل من درجة الحرارة والكتل الجزئية للأنواع التالية (CH4، H2O، O2، NO، N2)

الكلمات المفتاحية :الاحتراق -اللهب الغير المخلوط CFD -السيلان المضطرب المتفاعل

Introduction générale :

Les processus de combustion trouvent une importante étendue pratique dans la vie quotidienne et ainsi que dans les procédés industriels.

D'après Chrys (2000) et Européens Commission (2005), un pourcentage de 79 % des besoins mondiaux en énergie (fours, moteurs automobiles ou aéronautiques et turbines à gaz) proviennent de la combustion. [1]

Cependant, et malgré cette importance, les principaux processus de la combustion et leurs interactions ne sont pas encore complètement maîtrisés.

En outre, les carburants généralement utilisés dans l'industrie sont les hydrocarbures et le charbon. Ces derniers sont des ressources épuisables, d'où la nécessité d'une combustion plus économique.

D'autre part, les émissions polluantes issues de la combustion posent une menacesérieuse sur le plan planétaire (environnement).

Dans ce sens, il est nécessaire d'optimiser les paramètres des modes opératoires et géométriques des processus de combustion, afin de réduire au minimum les risques environnementaux, tels que :

- l'émission de polluants nocifs à l'être humain (HC, NOx et CO).
- l'effet de serre provoqué par l'émission de CO2

Dans la majeure partie des cas, les systèmes industriels, impliquant des phénomènes de combustion, sont basés sur la combustion turbulente d'un carburant qui est stocké sous forme liquide puis injecté soit dans une chambre de pré-vaporisation, soit directement dans la chambre de combustion.

Dans la littérature, les systèmes de combustion sont classés selon la méthode d'injection du comburant et du combustible en deux types : non prémélangé et prémélangé.
Dans le présent travail, on s'intéresse à l'étude de la flamme non prémélangée (ou de diffusion), qui a toujours une température maximale proche ou égale à la température adiabatique de l'écoulement et qu'on ne peut pas contrôler.

Cet avantage permet d'une part de diminuer la température à laquelle seront soumises les parois des chambres de combustion et d'autre part de contrôler efficacement les émissions nocives. De plus, des références bibliographiques ont montré que les flammes de diffusion sont plus sensibles aux perturbations et peuvent êtres soufflées ou éteintes.

L'objectif principal du présent travail est la simulation numérique d'une flamme de diffusion (non pré-mélange) Méthane-Air, par une approche **CFD** utilisant le code ANSYS-CFX. Un couplage Combustion-Turbulence-Ecoulement sera étudié.

Lors de cette simulation, on a utilisé :

- Modèle de turbulence **k-ε.**
- Modèle de combustion non pré-mélangé **EDM** : **E**ddy **D**issipation **M**odel

Pour ce faire, on a adopté le plan de ce travail suivant :

Nous discuterons d'abord les propriétés et procédures de combustion et les flammes (chapitre 1), la présentation des propriétés et caractéristiques du Méthane (combustible) (chapitre 2). Puis nous présentons les équations décrivant le processus de combustion et nous décrirons les modèles de combustion (chapitre 3). Une Présentation générale du code ANSYS-CFX est ensuite faite (chapitre 4). Finalement, nous décrirons et discuterons les principaux résultats des simulations dans le chapitre 5. En fin, on va donner quelques remarques de conclusion.

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse au phénomène physique de la combustion et non aux processus de la formation et du développement des flammes.

I.2 Définition de la combustion :

La combustion est un phénomène important puisqu'elle est utilisée comme source d'énergie principale.Elle permet de convertir l'énergie chimique contenue dans les combustibles en chaleur. Elle peut être caractérisée comme une (ou des) réaction(s) irréversible(s) fortement exothermique(s) entre un combustible (ou réducteur) et un comburant (ou oxydant) selon le schéma global.
Dans un phénomène de combustion, les corps présents sont les suivants :

- Le combustible
- Le comburant
- Le produit de combustion

Le triangle du feu sous dessus représente les trois facteurs doivent être réunis pour que la combustion :



Figure I.1 : Triangle du feu

La complexité du système réactif réside dans le fait que la combustion ne se déroule pas en une seule étape amenant aux produits finaux (typiquement le dioxyde de carbone et l'eau). En réalité, de nombreux composés intermédiaires entrent en jeu, comme le monoxyde de carbone, des aldéhydes, des cétones, des alcènes et des espèces oxygénées.

I.3 Modes de combustion élémentaires :

I.3.1 La combustion pré-mélangée :

C'est un mode de combustion où carburant et oxydant sont pré mélangés avant d'atteindre le front de flamme.

Ce mode est souvent utilisé en régime pauvre, permettant ainsi d'augmenter le rendement du système de combustion et de réduire la production d'oxydes d'azote, polluant très nocif dont on veut limiter la production.

En contrepartie, les flammes obtenues sont souvent difficiles à maîtriser, nécessitant l'utilisation de dispositifs complexes d'accrochage de flamme.

I.3.2 La combustion non pré-mélangée :

C'est est un mode de combustion où carburant et oxydant sont injectés par deux courants différents. Le front de flamme se positionne à la rencontre des deux lignes d'introduction des courants.

Ce mode de combustion, qui est donc plus facile à maîtriser, a l'inconvénient de former plus de polluants, du fait des hautes températures atteintes dans le front de flamme.

Il en résulte que le développement des flammes de diffusion est commandé essentiellement par des facteurs aérodynamiques et l'aspect chimique lié à la nature des réactifs reste secondaire. [2]

I.3.3 La combustion partiellement pré-mélangée :

C'est un mode de combustion intermédiaire retrouvé fréquemment dans les applications industrielles. Pour des raisons de sécurité, l'oxydant et le carburant sont stockés séparément (l'oxydant est par ailleurs bien souvent pris dans l'environnement extérieur et n'est pas stocké par le système de combustion). L'oxydant et le carburant sont donc injectés par deux courants différents, en amont du front de flamme, et sont supposés se mélanger avant d'atteindre le front de flamme. Mais il arrive très fréquemment que le mélange ne soit pas parfait et que des hétérogénéités de mélange atteignent le front de flamme. Dans un autre sens, il est envisageable que les deux courants d'un système non pré-mélangé se mélangent avant d'atteindre le front de flamme. Ainsi le mode de combustion n'est plus non pré-mélangé mais partiellement pré-mélangé. [3]

Mode de combustion	Avantages	inconvénients
Pré-mélangé	Peu polluant (en régime pauvre)	Instabilité de combustion, stockage du mélange
Non pré-mélangé	Stabilité de la flamme, stockage du carburant en dehors des limites de flammabilité	Production d'oxydes d'azote
Partiellement pré-mélangé	Peu polluant (en régime pauvre), stockage du carburant en dehors des limites de flammabilité	Instabilité de combustion, hétérogénies de mélange

Tableau I.1: Avantages et inconvénients principaux des trois modes de combustions

I.4 La combustion turbulente :

Dans un foyer, l'écoulement est turbulent c'est à dire que les vitesses des gaz, mesurées en un point fluctue continuellement de façon apparemment aléatoire, même en régime parfaitement établi ; ceci est vrai pour la température et toute autre caractéristique du milieu. Cette turbulence est due à une forte vitesse de l'écoulement entrant. Elle s'est développée dans le canal amont à cause des gradients de vitesse aux parois et à partir d'obstacle tels que les injecteurs.[4]

L'interaction entre un processus chimique de combustion et la "turbulence" joue un rôle très important dans de nombreux systèmes de combustion, pour la propulsion ou la production d'énergie, comme par exemple les chambres de combustion des turboréacteurs, des chaudières ou des turbines à gaz. L'étude de ces écoulements turbulents de gaz réactifs a conduit à l'introduction de différentes grandeurs caractéristiques de ces phénomènes physiques. Ces quantités sont issues de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et de la chimie.

I.4.1 La combustion turbulente non pré-mélangée (diffusion) :

La description des différents régimes de flammes de diffusion turbulentes se fait par des paramètres physiques qui sont : les échelles caractéristiques et les nombres adimensionnels. Dans le cas d'une flamme de diffusion, on ne peut pas définir une vitesse et une épaisseur de flamme ; ces notions dans une flamme de diffusion n'ont pas de sens physique ; en effet, on peut obtenir plusieurs vitesses de flammes de diffusion dans la même configuration.[2]

I.5 Applications industrielles de la combustion turbulente :

Une première grande catégorie de dispositifs concerne les moteurs, quidoivent propulser divers véhicules (avions, fusées, bateaux, automobiles,…) grâceà l'énergie thermique que la combustion peut libérer.la deuxième catégorie ci les brûleurs sont les autres dispositifs industriels utilisant la combustion, qui sont utilisés dans des foyers, des fours, ou des chaudières, la dernière catégorie de situations industrielles, ou naturelles, dans la quelles la combustionturbulente joue un rôle prépondérant ci les incendies et explosions.[5]

I.6 Les trois catégories de combustion :

Selon la nature du combustible, on peut rencontrer :

- Combustions solides
- Combustions liquides
- Combustion gazeux

I.7 Les Flammes :

I.7.1 Définition :

La flamme est la zone de réaction d'oxydation très rapide qui se déroule en phase gazeuse, à haute température, généralement entre 1000 et 2 000°C. Elle dégage de l'énergie thermique (réaction exothermique) grâce à l'oxydation d'un **combustible** (généralement un hydrocarbure), par l'oxygène de l'air, le **comburant**. La réaction ne se déroule que si le mélange comburant-combustible a été réalisé dans des proportions adéquates. L'exemple simple de la combustion du méthane se représente par :

$$CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O + 890 \text{ kj/ mole de } CH_4 \text{ (16g)}$$

Soit : 1vol. 10vol.

de gaz d'air (= 2vol. de O_2)

I.7.2 Classification des flammes :

Deux situations généralement rencontrées sont identifiées selon la procédure utiliséepour introduire les réactifs dans la zone de flamme.

- la flamme de diffusion
- la flamme de pré-mélange
- la flamme de décomposition

I.7.2.a La flamme de diffusion :

La flamme de diffusion est appelée aussi **flamme non pré-mélangée** ainsi car, les réactants étant séparés, ils doivent venir au contact l'un de l'autre, par le phénomène de diffusion.



Figure I.2 : Type de flamme non pré-mélangée

I.7.2.b La flamme de pré-mélange :

Le combustible est toujours un gaz, parfaitement mélangé au comburant. On parle aussi de **flamme aérée**.

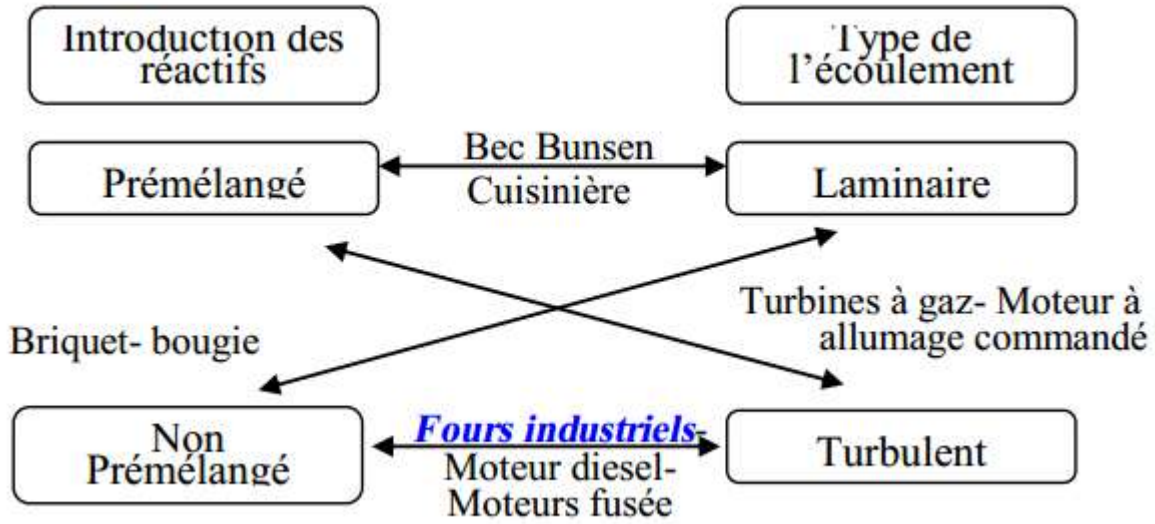


Figure I.3 : Type de flamme pré-mélangée

La combustion pré-mélangée est, à priori, la situation la plus efficace en terme de dégagement d'énergie puisque les réactifs sont déjà en contact avant la zone de flamme. En revanche, une telle flamme est susceptible de se propager dans le mélangecombustible/oxydant donc de remonter l'écoulement en amont de la chambre, jusqu'à l'endroit où s'effectue le mélange, ce qui pose des problèmes de sécurité. Cela n'est pas le cas pour les flammes de diffusion.

Les écoulements pouvant être laminaires ou turbulents, quatre situations sont possibles, résumées dans la figure (I.4) qui y associe quelques applications pratiques. Si les flammes laminaires semblent n'intervenir que dans quelques applications plutôt

anecdotiques(bougie, flamme de briquet), la compréhension de la structure de ces flammes est cependantfondamentale pour la description et la modélisation de nombreuses situations industrielles. Notre attention sera focalisée principalement sur les flammes non pré-mélangées considérées dans le présent travail



.**Figure I.4 :** les différents types de combustion et régimes d'écoulement [6]

I.7.3 Stabilité des flammes :

Pour diminuer les polluants nocifs et les imbrûlés issus de la combustion, on utilise un excédent d'air. Dans ce régime de combustion dit pauvre, on consomme théoriquement tout le combustible, ce qui donne une combustion complète et moins d'imbrûlés. ce mode de combustion favorise cependant l'apparition des instabilités, par exemple : « le décrochage », « le soufflage » et même « l'extinction » de la flamme.

En pratique, l'initiation des flammes fait appel à un apport d'énergie extérieur qui provient, par exemple, d'une petite flamme annexe (allumette) ou de l'étincelle issue d'une bougie d'allumage. Mais cet apport n'intervient en général que pendant un temps limité. Ensuite, la flamme doit rester stable sans source extérieure d'énergie, afin d'éviter son extinction. [7]

Une flamme instable ou qui s'éteint en plein processus non seulement ne remplit pas sa mission, mais peut conduire à de grave problèmes de sécurité (explosions et incendies) si les écoulements de gaz ne sont pas arrêtés. L'analyse et l'identification des mécanismes responsables de stabilisation des flammes sont donc nécessaires.

On entend par flamme stable la présence d'une zone de réaction plus ou moins fixe dans l'espace en dépit de petites perturbations de l'écoulement alimentant la combustion. Il s'agit d'un phénomène complexe qui dépend de la dynamique de l'écoulement et de la qualité du mélange des réactifs. Les scénarios régissant la stabilisation des flammes ne sont pas encore bien identifiés à ce jour.

Les principaux mécanismes de stabilisation des flammes suggérés, dans les différents régimes de combustion : pré-mélangé, de diffusion et partiellement pré-mélangé, vont maintenant être brièvement décrits.

I.7.4 Propagation de la flamme :

Les trois paramètres principaux de propagation de la flamme sont :

- les proportions du mélange : plus on est proche de **la stœchiométrie**, plus la flamme se propage vite ;
- la température des gaz frais : plus la température est élevée (proche de la température provoquant l'inflammation spontanée), plus la propagation est élevée ;
- l'écoulement des gaz : les obstacles et turbulences modifient la progression de la flamme.

I.8 Le mélange stœchiométrique :

D'une façon générale, la formation du mélange consiste à mettre en contact le combustible et le comburant sous des formes propices à l'initialisation et à la propagation de la combustion ainsi qu'à l'évacuation des produits de la réaction. Le mélange homogène à la stœchiométrie, entre le combustible et le comburant (généralement de l'air) constitue le cas idéal pour une combustion complète. A titre d'exemple nous allons dans notre cas d'application adopter une réaction d'une étape du méthane, où une mole de méthane de formule CH4 requiert deux moles d'oxygène pour que la combustion complète soit réalisée:$\mathbf{CH_4 + 2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O}$[6]

II.1 Histoire :

Le gaz de méthane est un composé chimique de formule CH_4. Il a été découvert et isolé par **Volta** entre 1776 et 1778. Il s'agit du plus simple des hydrocarbures, et plus précisément du premier terme de la famille des alcanes. Il est assez abondant dans le milieu naturel, ce qui en fait un combustible à fort potentiel. Jusqu'aux années 1970, l'impact du méthane sur le climat était inconnu. En 1976, il a été démontré que le méthane était un gaz à effet de serre. [8]

Ce gaz est naturellement présent dans l'atmosphère terrestre, mais les ajouts anthropiques ont amené son taux à plus que doubler depuis la révolution industrielle. Sa durée de vie est assez brève moins de dix ans dans l'atmosphère, où il est détruit par des radicaux hydroxyles OH^-. C'est un gaz à effet de serre bien plus puissant que le CO_2, responsable, au niveau actuel de sa concentration, de quelques pour-cent de l'effet de serre total à l'œuvre dans notre atmosphère. Ainsi, à titre comparatif, sur un horizon de 100 ans, relâcher une certaine quantité de méthane dans l'atmosphère a un effet sur le réchauffement climatique environ 9 fois plus important que de brûler cette même quantité de méthane en dioxyde de carbone (CO_2). [9]

II.2 Définition :

Le méthane est un Gaz sans couleur se composant de molécules de quatre atomes d'hydrogène et d'un atome de carbone. C'est le constituant principal du gaz naturel, combustible d'origine fossile. Il est libéré dans l'atmosphère quand la matière organique se décompose dans des environnements avec de faibles niveaux d'oxygène.

Il contribue fortement à l'effet de serretandis que sa durée de vie dans l'atmosphère est de l'ordre de la décennie.

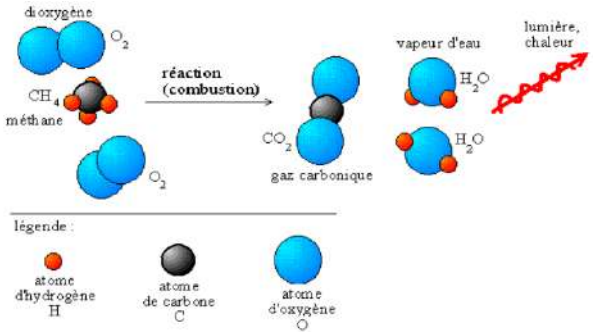


Figure II.1 : Combustion du méthane dans le dioxygène

II.3 Formation et stockages naturels :

II.1.1 Le méthane du sous-sol terrestre :

Le méthane est le seul hydrocarbure classique qui peut être obtenu rapidement et facilement grâce à un processus biologique naturel. Nous utilisons principalement du gaz naturel et donc du méthane fossile, mais l'utilisation du méthane renouvelable, aussi appelé biogaz, est en développement : Suède, Allemagne, Danemark, Viêt Nam, Cambodge, Chine, Inde… [10]

Ce dernier est dégagé naturellement des zones humides peu oxygénées comme les marais et certains sols longuement inondés.

Il se forme aussi dans l'estomac et le tube digestif de nombreux animaux (de certains invertébrés aux mammifères). Ce gaz est présent en faible quantité dans les gaz intestinaux humains.[10]

II.1.2 Le méthane des fonds marins :

Le débullage de méthane à partir des sédiments marins, sur les lignes de fractures du plancher océanique est considéré comme un indice de risque sismique élevé, voire peut-être comme pouvant annoncer un tremblement de terre (sous réserve de confirmation à la suite des expériences en cours, en mer de Marmara, sur la faille nord-anatolienne en cours au large de la Turquie).[11]

II.4 Propriétés physico-chimiques de méthane :

Aux conditions normales de température et de pression, c'est un gaz incolore et inodore. Plus léger que l'air, le méthane en milieu non confiné s'échappe vers la haute atmosphère et n'a pas la tendance des gaz plus lourds que l'air (propane, butane) à former des nuages explosifs. Le méthane est un combustible qui compose jusqu'à 90 % le gaz naturel. Sa température d'auto-inflammation dans l'air est de 540 °C.[12]

La combustion de 1 m^3 de méthane à 15 °C (gaz naturel) libère une énergie de 9,89 kWh (35,6 MJ).[8]

- Le gaz naturel, (constitué à plus de 90 % de méthane) est transporté par navires (méthaniers) à une température de -162 °C et à une pression voisine de la pression atmosphérique. Les réservoirs sont construits sur le principe de la bouteille isotherme et leur capacité peut aller jusqu'à 40 000 ou 50 000 m^3 de gaz liquide par réservoir. Un méthanier comportant plusieurs réservoirs, sa cargaison peut actuellement atteindre 154 000 m^3 de GNL (Gaz Naturel Liquéfié*)*. Les futurs méthaniers pourront transporter jusqu'à 260 000 m^3 de GNL. Le volume du méthane à l'état gazeux est égal à 600 fois son volume à l'état liquide, à pression atmosphérique. [8]

- Présent à tous les stades de l'industrie pétrolière, mais mal valorisé, il est fréquemment brûlé dans une torchère ; ce comportement contribuant à l'effet de serre, les pétroliers tentent de plus en plus de restreindre ce procédé. [8]

Propriétés chimiques

Formule brute	CH_4
Masse molaire	$16.0425 \pm 0.00011\ g/mol$ C 74.87 %, H 25.13 %
Propriétés physiques	
T° fusion	-182.47 °C
T° ébullition	-161.52 °C
Solubilité	22 mg/l (eau, 25°C)
Paramètre de solubilité $\boldsymbol{\sigma}$	11.0 $MPa^{1/2}$ (25 °C)
Masse volumique	422.62 kg*m^{-3} (-161 °C, liquide) 0.6709 kg*m^{-3} (15 bar, gaz)
T° d'auto-inflammation	537 °C
Point d'éclair	Gaz inflammable
Limites d'explosivité dans l'air	4.4-17% vol
Pression de vapeur saturant	2atm (-152.3 °C) ; 5atm (-138.3°C) 10atm (-124.8°C) ; 20atm (-108.5 °C) 40atm (-86.3 °C) ; 4.66*10^5mm Hg (25 °C)

Tableau II.1 : Propriétés physico-chimiques de méthane [8]

II.5 La combustion du méthane :

Le méthane est le principal constituant du gaz naturel. Ce dernier est extrait de gisements souterrains (la Russie et le Moyen-Orient, notamment, sont de grands producteurs de gaz naturel).Quand la combustion du méthane donne une flamme bleue, on dit que cette combustion est « complète ». Pour que la combustion soit complète, il faut que le dioxygène soit en quantité abondante. [13]

Si le dioxygène est en quantité insuffisante, la flamme est jaune : la combustion est « incomplète ».

L'équation chimique de la combustion complète du méthane est :

méthane + dioxygène → dioxyde de carbone + l'eau

$$CH_4 + 2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O \qquad \Delta H = -891\ kJ*mole$$



Figure II.2 : Flamme complète et incomplète

II.6 Utilisation :

Les gisements fossiles de gaz naturel comportent entre 50 et 60 % de méthane, le gaz naturel brut est épuré avant d'être injecté sur le réseau de distribution, la proportion de méthane présent dans le gaz naturel que nous utilisons est supérieure à 90 % dans la plupart des gaz.[8]

Dans la science de « *biologie* » ou biogénie, ou biogaz, est produite le méthane par la fermentation anaérobie de matière organique comporte 50 à 80 % de méthane, (60-65 % généralement).le biogaz produit dans les décharges pourrait être (bien davantage) récupéré et valorisé sous forme d'électricité, de chaleur ou comme carburant automobile.[8]

Le gaz méthane est valorisable comme combustible mais d'autres usages en seraient possibles. Par exemple, des chercheurs ont réussi à transformer à température presque ambiante (40 °C) du méthane en un ester (propionate d'éthyle) potentiellement valorisable. Pour ce faire, un carbone (composé très réactif) a été introduit dans une liaison du méthane via un catalyseur organométallique.[8]

II.7 Biocarburant de troisième génération :

Pour produire un méthane de décharge assez pur et pour faire un bon biocarburant de troisième génération, un « *digesteur anaérobie* » inspiré de la digestion anaérobie à l'œuvre dans la panse des bovins est expérimenté au Canada. Des microorganismes méthanogènes vivant en symbiose avec les vaches savent produire plus de méthane que de CO_2, mais ils ont des exigences précises, en température et humidité notamment. La difficulté est de conserver les conditions de vies optimales de ces organismes dans un milieu constitué de déchets, ce qu'on tente ici de faire au moyen d'électrodes spéciales régulant la température du milieu. Ce sont ensuite des fibres creuses constituées d'une membrane perméable qui devraient séparer le CO_2 du méthane qui pourra ensuite être brûlé comme source d'énergie, utilisé par la carbochimie ou compressé et stocké.[14]

II.8 Stockage énergétique :

Dans la perspective d'une transition vers des énergies renouvelables, des chercheurs de l'entreprise autrichienne Solar Fuel Technology (**Salzbourg)**, en coopération avec l'Institut **Fraunhofer** de recherche sur l'énergie éolienne de Leipzig (IWES), le Centre de recherche sur l'énergie solaire et l'hydrogène de **Stuttgart** (ZSW) et l'université de **Linz** ont mis au point une solution de stockage de l'énergie sous forme de méthane. L'énergie électrique excédentaire d'origine éolienne ou photovoltaïque est utilisée pour décomposer de l'eau en dihydrogène et dioxygène (électrolyse de l'eau), puis le dihydrogène est utilisé pour méthaniser du dioxyde de carbone (réaction de Sabatier). [8]

L'un des principaux intérêts de ce procédé est d'utiliser les infrastructures (réservoirs et conduites de gaz) existantes, dont la capacité de stockage serait suffisante pour couvrir les besoins de méthane de l'**Allemagne** pendant plusieurs mois. [15]

II.9 Origine des émissions :

Globalement, Les principales sources des émissions de méthane vers l'atmosphère sont[8] :

- La fermentation anaérobie sous l'eau : 32 % des émissions.
- Les énergies fossiles : 21 % des émissions.
- Les ruminants Les déchets humains : 12 % des émissions.
- La biomasse : 10 % des émissions.

- Les pergélisols :

II.10 Réduire les émissions de méthane :

Il existe des moyens de diminuer les émissions de méthane pour diminuer son action sur l'effet de serre :[8]

- capter le méthane, ou biogaz, émis au niveau des décharges d'ordures ou stations d'épuration et le brûler (la combustion forme du CO_2 qui a un effet de serre moins important). Cela permettrait de remplacer en partie d'autres énergies fossiles au lieu de le brûler en torchère comme c'est souvent le cas actuellement.
- capter et utiliser le méthane, ou biogaz, produit au niveau des systèmes de stockage des effluents d'élevages ; récupérer le méthane émis lors de l'exploitation minière et après celle-ci.
- développer une riziculture moins productrice de méthane, diminuer les taux de fertilisants, lutter contre la turbidité des eaux et la production de sédiments méthanogènes, et donc en amont contre l'érosion, la régression et dégradation des sols.

III.1 Introduction :

Généralement un modèle mathématique de la combustion consiste en un ensemble d'équation différentielles régressent quantitativement un système ou un phénomène donné. Le modèle mathématique considéré, dans le cas de la combustion est celui basé sur les lois fondamentales de la physique, de la mécanique des fluides et de transfert thermique en particulier. Souvent, on peut même supposer des hypothèses pour la construction de ce modèle.

Dans ce chapitre, nous présentons les équations qui régissant le phénomène de la combustion sont dans ce cas celles de **Navier-Stokes** moyennées, l'équation d'énergie, l'équation de la moyenne de la fraction du mélange et l'équation d'état du gaz. Les termes superflus issus de la prise de la moyenne seront modélisés.

III.2 Objectifs du travail :

L'objectif principal du présent travail est la simulation numérique d'une flamme de diffusion (non pré-mélange) Méthane-Air, par une approche **CFD** utilisant la méthode des éléments finis. On a utilisé le code **ANSYS-CFX**. Un couplage Combustion-Turbulence-Ecoulement sera étudié.

Lors de cette simulation, on a utilisé :

- Modèle de turbulence k-**ε.**
- Modèle de combustion non pré-mélangé **EDM** (**M**odèle **E**ddy **D**issipation)

III.3 Equations de la combustion gazeuse :

Dans la combustion gazeuse les écoulements de fluide peuvent être mathématiquement décrits par l'équation da Navier-stockes. Ces équation sont généralement valides pour un mélange des gaz parfaits en équilibre thermodynamique.

Les hypothèses considérées pour la combustion turbulente non-pré-mélangée sont les suivantes :

- ❖ L'écoulement est tridimensionnel.
- ❖ Le fluide est compressible.
- ❖ Le régime instationnaire.

L'équation gouvernant l'écoulement du fluide s'obtient en considérant la conservation de la masse, la quantité de mouvement, l'énergie ainsi que la masse de chaque espèce chimique lorsque le fluide passe à travers un volume de control fixe. [(Williams 1985), (Poinsot et veynant 2001)]

III.3.1 Equations de continuité :

C'est l'equation qui exprime la loi de concervation de la masse pour un volume de contrôle matériel.Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivant :

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho u_i = 0 \qquad \text{III.1}$$

u_i : est la composante de la vectrice vitesse selon l'axe i.

ρ : La masse volumique

III.3.2 Equations de conservation de quantité de mouvement :

Les équations de quantité de mouvement moyennées de Navier Stokes, connues sous le nom de **RANS** sont pour un fluide incompressible et newtonien données par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \underbrace{\frac{\partial}{\partial}(\rho u_i u_j)}_{\substack{\text{transport}\\ \text{convectif}}} = \underbrace{-\frac{\partial p}{\partial x_j}}_{\substack{\text{forces des}\\ \text{pression}}} \underbrace{+ \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial u_j}\right)\right]}_{\text{forces de viscosité}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u_i \overline{u_j})}_{\substack{\text{forces générés}\\ \text{par laturbulence}}} + F_i \qquad \text{III.2}$$

Où les $-\rho u_j \overline{u_j}$ sont les composantes du tenseur des contraintes de Reynolde.

Pour les relier à l'écoulement moyen, on a recours au concept de Boussinesq qui permet de les exprimer en fonction des gradients des vitesses moyennes :

$$-\rho u_i \overline{u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial xj} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \quad \text{III.3}$$

F_i *:* sont les forces de volume.

III.3.2.a Effet de la turbulence sur les équations instantanées de Navier –Stokes :

La simulation directs des équations de Navier –stokes pour un écoulement turbulent pour des cas pratiques est toujours hors de parte car elle nécessite des moyens de calcul phénoménaux que le développement des ordinateur ne peut assurer.

Ce panant, en ingénierie on a besoin uniquement des procédures de calcul que puissent pour des informations adéquates concernant les effets prépondérants de la turbulence.

Les informations fournies par la connaissance des propriétés moyennes par rapport au temps sont suffisantes pour l'ingénieur.

III.3.3 Equations de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i E)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum h_i j_j + u_i u_i (\tau_{ij})_{eff}\right) + S_h \quad \text{III.4}$$

Avec :

$$j_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu t}{sct})\frac{\partial y_i}{\partial x_i} \quad \text{III.5}$$

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff}\left(\frac{u_j}{x_i} + \frac{u_i}{u_j}\right) - \frac{2}{3}\mu_{eff}\frac{u_i}{x_i}\delta_{ij} \quad \text{III.6}$$

Dans cette équation :

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2_i}{2} \quad \text{III.7}$$

$\vec{j}$ **:** Vecteur flux de chaleur du à la conduction et à la diffusion de l'enthalpie (effet Dufour).

$k_{eff:}$ conductivité effective ($k+k_t$) ou kt est la conductivité thermique turbulente).

$(\tau_{ij})_{eff}$: tenseur effectif newtonien des contraintes visqueuses

T : température de mélange.

$D=D_{i,m}$: coefficient de diffusion de l'espace i dans le mélange (loi de Fick)

S_h : Energie due à la réaction chimique et au rayonnement.

III.3.4 Equations de conservation des espèces chimiques :

La détermination de la fraction massique pour chaque espèce, Y_i, se fait par la solution de l'équation de transport de la i^{éme} espèce, qui a la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \upsilon Y_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\left(\rho Di, m + \frac{\mu t}{sct}\right) Y_i\right) + R_i \qquad \text{III.8}$$

Y_i : est la fraction massique de espèce i ;

Sc_t : est le nombre de Schmidt turbulent $\frac{\mu t}{\rho Dt}$

R_i : est le taux net de production par réaction chimique

Calcul de la masse volumique :

$$\rho = \frac{P_{OP}}{RT\sum_i \frac{Y_i}{M_{w,i}}} \qquad \text{III.9}$$

R :est la constant universelle des gaz

$M_{w,i}$:est la masse molaire de l'esépèce i

p_{op} :est la prission de référence

III.3.5 Equitations d'état :

On suppose que le fluide est un mélange homogène de gaz parfaits.Ainsi, on peut écrire les relations suivantes :

$$p= \rho RT\sum \frac{Y_i}{M_i} \quad \text{III.10}$$

$$h= \sum h_i(T)y_i \quad \text{III.11}$$

$$h_i= \int_{T_{r,f}}^{T} cp_i dT \quad \text{III.12}$$

$$C_p = C_p(T) = \sum_m C_{p,i}(T)Y_i \quad \text{III.13}$$

$\mathbf{C_p}$: est la capacité calorifique du mélange.

$\boldsymbol{M_i}$: est la fraction massique de l'espèce

III.3.6 Modèle de turbulence :

En plus des équations de conservation, le problème de combustion est généralement couplé avec la présence du phénomène de turbulence et de rayonnement.

Un des modèles les plus en vue de la turbulence, la k-ε (k-epsilon) modèle, a été mis en œuvre dans la plupart des codes CFD usage général et est considéré comme le modèle standard de l'industrie. Il est avéré être stable et robuste numériquement et a un régime bien établi de la capacité prédictive. Pour les simulations d'usage général, le modèle offre un bon compromis en termes de précision et de robustesse.

Dans CFX, le modèle de turbulence k-ε utilise l'approche mur fonction évolutive pour améliorer la robustesse et la précision lorsque le maillage proche paroi est très fin. Les fonctions de mur évolutives permettent solution sur arbitrairement fines grilles près de paroi, ce qui est une amélioration significative sur les fonctions muraux standard. [16]

Alors que les modèles à deux équations standard, tels que le modèle k-ε, fournir de bonnes prévisions pour de nombreux flux d'intérêt de l'ingénierie, il existe des applications pour lesquelles ces modèles peuvent ne pas convenir. Parmi celles-ci :

- Débit avec la séparation de la couche limite.
- flux avec des changements brusques de la vitesse de déformation moyenne.
- Débit dans les fluides en rotation.
- flux sur des surfaces courbes.

III.3.6.a Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente :

L'équation de l'énergie cinétique est donnée comme suite :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} + \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial xj}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon \qquad \text{III.14}$$

- **Modélisation de l'energie cinitique est donné comme suit** :

Ce terme est difinit par :

$$G_k = \overline{\rho \grave{u}_l \grave{u}_j}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \qquad \text{et} \qquad G_b = \beta g \frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$\beta = \frac{1}{\partial}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \text{ ou : } G_b \text{ est l'effet Buyancy(poussée d'Archiméde)}$$

- **Modélisation de la viscosité turbulente :**

La viscosité turbulent μ_t est obtenue en combinant *k* et ε comme siut :

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \text{III.15}$$

Pour la conctant c_μ: c_μ= 0.09

III.3.6.b Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_i)}_{\text{Tronsport convectif}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_j}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + c_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + G_{3\varepsilon}G_b) - c_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}}_{\text{Terme source}} \qquad \text{III.16}$$

Les constantes usuelles du modèle de turbulence k-ε sont données à partir de l'expérience ou de la théorie par :

$C_{1\varepsilon}$ = 1.44 ; $C_{2\varepsilon}$=1.92 ; Cμ =0.09 ; σ_k=1.3

III.3.7 Modélisation de la réaction de combustion :

Plusieurs modèles de combustion existent dans la littérature. On présente ici quelques modèles qu'on a utilisé lors de cette étude et qui sont implémentés dans le code **CFD CFX**.[16]

On note que le présent travail traite essentiellement un problème de flammes turbulentes non prémélangées (ou de diffusion). Ces modèlesseront donc utilisés pour la modélisation des taux de réaction.

III.3.7.a Modèle Eddy Dissipation :

Le modèle de dissipation de Foucault est basé sur le concept selon lequel la réaction chimique est rapide par rapport aux processus de transport dans l'écoulement. Lorsque réactifs se mélangent au niveau moléculaire, ils forment instantanément produits. Le modèle suppose que la vitesse de réaction peut être liée directement au temps nécessaire pour mélanger les réactifs au niveau moléculaire. Dans les écoulements turbulents, ce temps de mélange est dominé par les propriétés de Foucault et, par conséquent, la vitesse est proportionnelle à un temps de mélange défini par la turbulence de l'énergie cinétique, k, et de dissipation,

$$\text{Rate} \propto \frac{\varepsilon}{k} \qquad \text{III-17}$$

Ce concept de contrôle de la réaction est applicable dans de nombreux problèmes de combustion industrielle où les taux de réaction rapide sont comparés au réactif taux de mélange.

III.3.7.b Mélange Rate Limite :

La valeur maximale autorisée du taux de mélange turbulent locale. Seulement applicable si le Eddy Dissipation modèle est utilisé. Le Eddy Dissipation modèle prédit parfois un comportement non physique, tels que la flamme rampante à travers les murs. Ceci parce que le rapport des quantités de turbulence $\frac{\varepsilon}{k}$ devient grande proximité des frontières de la paroi, mais la turbulence dans ces régions est faible. Cette valeur est utilisée pour faire respecter une limite supérieure à la valeur $\frac{\varepsilon}{k}$ utilisée pour calculer la vitesse de réaction. Pour le méthane / air, une valeur d'environ 2500 [1 / s] est raisonnable.

III.3.7.c Eddy Dissipation Modèle Coefficient A / B :

Le coefficient A est un facteur qui apparaît à la fois les corps réactionnels et les produits limiteur.

A doit toujours être positif. Il y a un traitement spécial dans le solveur pour **B**. négative. Si tel est le cas, le limiteur de produit ne soit pas appliqué et la vitesse de réaction est déterminée par la concentration des réactifs et de la turbulence. Lorsque B est négatif, l'amplitude de B est négligeable.

Les valeurs par défaut suivantes sont applicables :

A = 4.0, B = -1

Expressions variables (CEL) sont prises en charge pour les deux paramètres.

- **Réactifs Limiteur :**

$$R_K = A\frac{\varepsilon}{k}\min[\frac{[I]}{V_{kI}^{'}}] \qquad \text{III–18}$$

Où [I] est la concentration molaire du composant I et je ne comprends que les composants réactifs.

- **produits Limiteur :**

$$R_K = AB\frac{\varepsilon}{k}[\frac{\sum_P [I]\, W_I}{\sum_P V_{kI}^{''}\, W_I}] \qquad \text{III–19}$$

Où **P** passe en boucle sur toutes les composantes de ce produit dans la réaction élémentaire k.

Les produits limiteur sont désactivés lorsque le coefficient de modèle B est réglé sur une valeur négative. Pour les deux en une seule étape et de schémas de réaction en plusieurs étapes, il est désactivé par défaut, (mis à -1), mais peut être activé par la définition explicite du coefficient de modèle B à une valeur positive (bien que ce ne soit pas recommandé pour les schémas de réaction à plusieurs étapes).

III.4 Le Modèle P1 : [16]

Le rapprochement différentiel ou P1 ajoute une équation de transport supplémentaire à la simulation, par conséquent, il est plus coûteux. Le modèle de P1 est valable pour une épaisseur optique supérieure à 1. Par exemple, le modèle a révélées adéquates pour l'étude de carburant pulvérisé (PF) flammes, dans les régions à l'extérieur depuis le voisinage immédiat de la flamme. Cependant, il a été utilisé pour les valeurs inférieures avec un succès variable.

La mise en œuvre du modèle de P1 dans CFX ne permet que de murs opaques diffus. Autrement dit, le réglage de la fraction diffuse alors être ignoré.

Frontières ouvertes : entrées, sorties et des ouvertures sont traités comme des frontières totalement transparentes. Autrement dit, ils absorbent la totalité de l'énergie sortante, et l'énergie d'entrée est calculé comme un corps noir à la température soit locale ou à une température de corps noir externe spécifié par l'utilisateur.

IV.1 Introduction :

L'objectif de ce tutoriel est que l'étudiant maîtrise les étapes de se rendre à exécuter une simulation simple, une fois que c'est fait l'étudiant peut modéliser n'importe quel type de géométrie qu'il voit nécessaire à son cas étudié.

IV.2 Approche CFD dans la simulation du problème de combustion :

IV.2.1 Définition de la "CFD" :

Computational **F**luid **D**ynamics, généralement abrégé en **CFD**, est une branche de la mécanique des fluides qui utilise des méthodes numériques et algorithmes pour résoudre et analyser les problèmes qui impliquent des écoulements de fluides. Les ordinateurs sont utilisés pour effectuer les calculs nécessaires pour simuler l'interaction de liquides et de gaz avec des surfaces définies par des conditions aux limites. Avec les supercalculateurs à haute vitesse, de meilleures solutions peuvent être atteints. Toutefois, la validation initiale d'un tel logiciel est effectuée à l'aide des essais expérimentaux sur une soufflerie par exemple.

IV.2.2 Contexte historique :

La base fondamentale de presque tous les problèmes de **CFD** est les équations de Navier-Stokes, qui définissent tout écoulement de fluide monophasé. Ces équations peuvent être simplifiées en supprimant les termes décrivant la viscosité pour obtenir les équations d'Euler. Simplification, en supprimant quelques termes. Enfin pour de petites perturbations dans les flux subsoniques et supersoniques (non transsonique ou supersonique), ces équations peuvent être linéarisées pour obtenir les équations linéarisées.

Historiquement, les méthodes ont d'abord été développé pour résoudre les équations en deux dimensions, en utilisant des méthodes de transformations conformes de l'écoulement autour d'un cylindre à l'écoulement autour d'un profil d'aile ont été développés dans les années 1930. [7]

Les premiers travaux utilisant des ordinateurs pour l'écoulement du fluide modèle, tel qu'il est régi par les équations de Navier-Stokes, a été réalisée à Los Alamos National Labs, dans le groupe T3. Le groupe a publié un document de deux flux de modélisation dimensionnelle tourbillonnant autour d'un objet juillet 1963. [7]

IV.2.3 Méthodologie :

Dans toutes ces approches la même procédure de base est suivie.

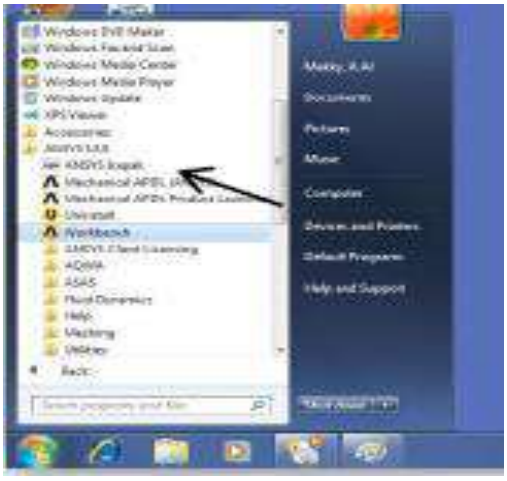
- Lors du prétraitement, la géométrie (limites physiques) du problème est définie.
- Le volume occupé par le fluide est divisé en cellules discrètes (maillage). Le maillage peut être uniforme ou non uniforme.
- La modélisation physique est définie (par exemple, les équations de mouvement, équation d'énergie, rayonnement, conservation des espèces)
- Les conditions aux limites sont définies. Il s'agit de préciser le comportement du fluide et les propriétés aux limites du problème. Pour des problèmes transitoires, les conditions initiales sont également définies.
- La simulation est lancée et les équations sont résolues de manière itérative comme un état stationnaire ou transitoire.
- Enfin un post-processeur est utilisé pour l'analyse et la visualisation de la solution résultante.

IV.3 Présentation d'ANSYS CFX :

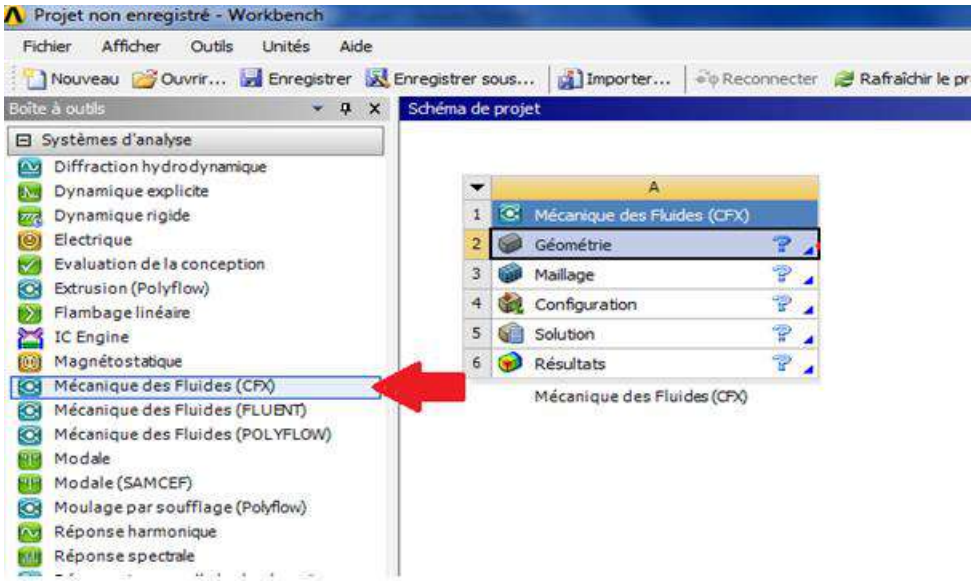
CFX-14.0 est un logiciel général de simulation numérique d'écoulement en mécanique des fluides et transfert thermique. Ce logiciel permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète de la modélisation, de la création géométrique, et la visualisation des résultats, en passant par la création du maillage et le calcul.

Dans une étude on suit les étapes suivantes :

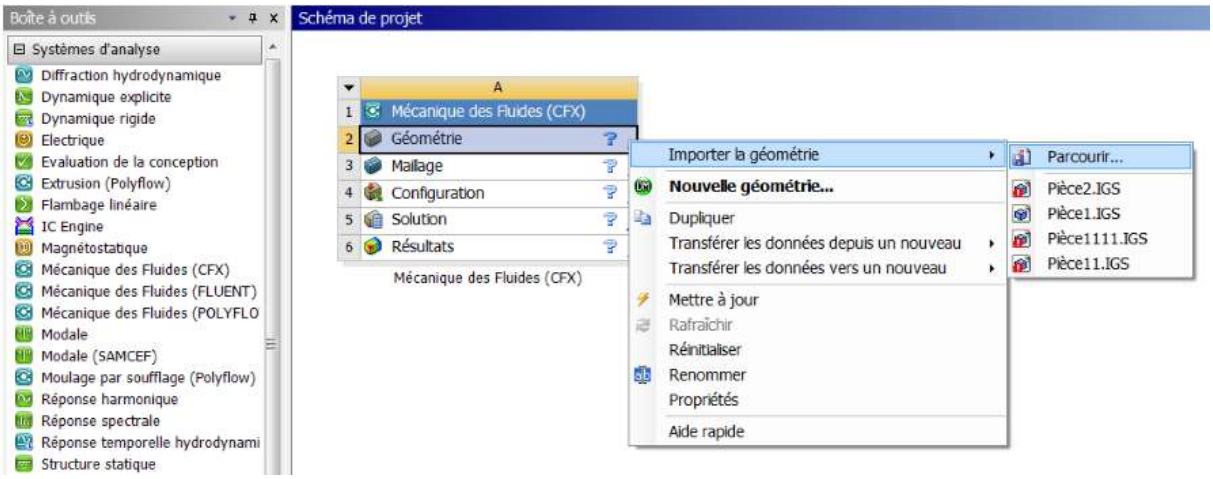
Étape 1 : Lancez ANSYS, en allant dans le menu de démarrage et double-cliquant sur le fichier dans le dossier **Workbench ANSYS** 14.0



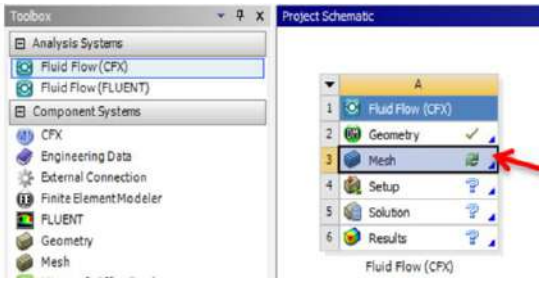
<u>Étape 2</u> : La deuxième étape consiste à double-cliquer sur l'icône **l'écoulement du fluide (CFX)**, alors la prochaine étape est de double-cliquer sur l'icône de la géométrie.



<u>Étape 3</u> : click par la droit à l'icône de la géométrie en suite sur l'importé de la géométrie encore la parcourir, cette étape est pour obtenir la géométrie requise lire dans le logiciel.

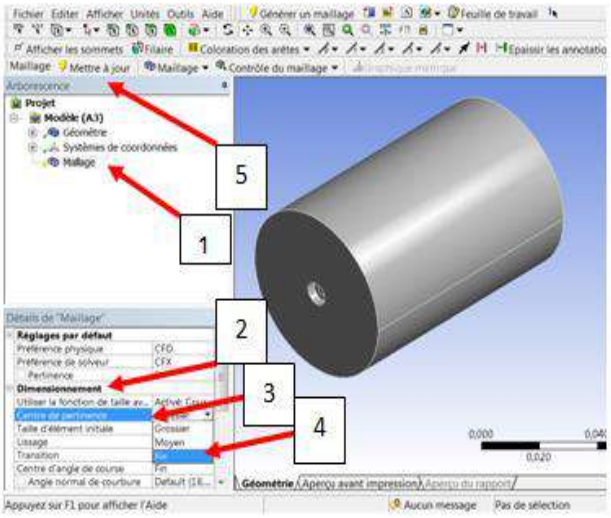


Etape 4 : Retour à la liste principale et vérifier que la tique verte est visible à côté de l'icône de la géométrie et puis double-cliquez sur l'icône Maillage.

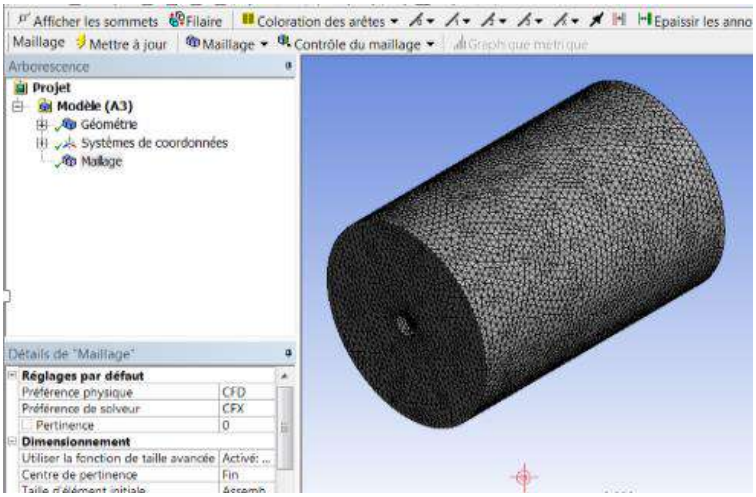


Etape5 : La partie maillage du projet à commencer, notez que à côté de la maille, il est une icône de tonnerre jaune.

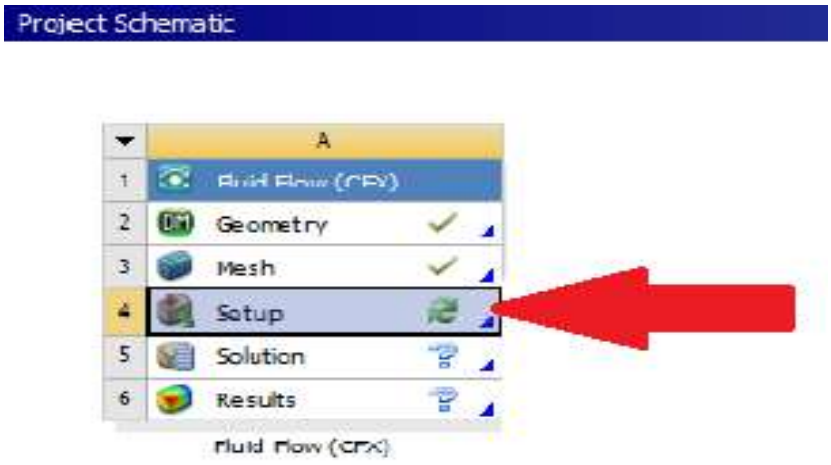
Double cliquer sur maillage, click sur le dimensionnement et puis centre de pertinence et choisi fin pour un maillage bien raffiné et à la fin appuyer sur Mettre à jour.



Juste de noter que si le processus de maillage prend plus des quelques minutes que la plupart probablement pas maillage serait généré.

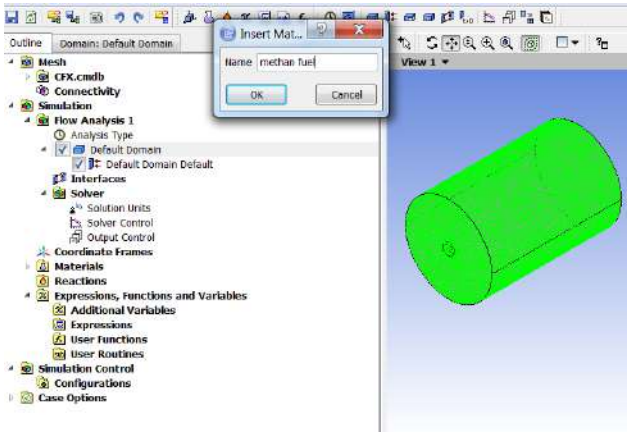


Etape 6 : Vérifiez que la coche verte est à côté de la maille signe puis double-cliquez sur l'icône d'installation.

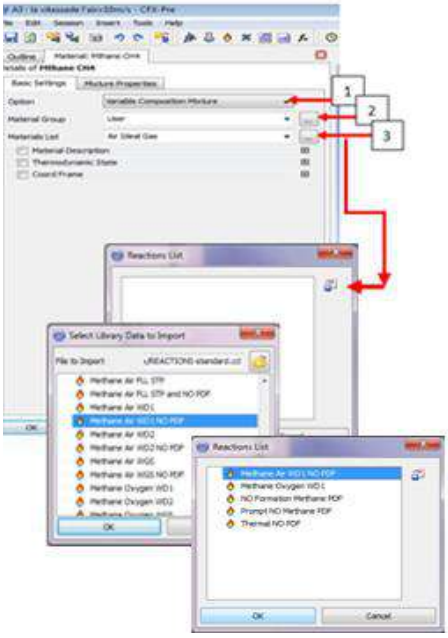


Etape 7 : Aller à la barre de tache sous dessus et cliquez sur le bouton de **material**

et sélectionnez l'option de changement de nom et apés entié le nom de votre matière et click **OK** .



Automatiquement la fenêtre suivant ouvre pour déclarer les caractéristiques de ce matériel



Donc, on va faire les changements suivants :

1. **Variable Composition Mixture** par **Reacting Mixture**
2. **User** par **Gas Phase Combustion**
3. A partir de la bibiothèque du logiciel, on va choisir le mélange de composition variable et à la fin valider par **OK. P**our cette étude, on a choisi le **Méthane Air WD1 NO PDF***

Après cette étape, on a appliqué les paramètres suivants :

Tab	Setting	Value
Mixture Properties	Mixture Properties	(Selected)
	Mixture Properties > Radiation Properties > Refractive Index	(Selected)†
	Mixture Properties > Radiation Properties > Absorption Coefficient	(Selected)
	Mixture Properties > Radiation Properties > Scattering Coefficient	(Selected)

Double-cliquez défaut domaine et appliquer les paramètres suivants :

Basic Setting	Fluid 1>option>material library> material>methane CH4	OK
Fluid Model	Heat transfer>option>thermal energy Turbulence>option> k-Epsilon Combustion>option>Eddy Dissipation> Eddy Dissipation Model coefficient B>**EDM** coef. **B** = 0.5 Thermal Radiation Model > Option>P1 Component>N2>option>constraint	OK

Etape 8 : Création du domaine

Allez à la barre de tache sous dessus et cliquez sur le bouton de baundaryet sélectionnez l'option de changement de nom, puis attribuez la limite correspondant en vert dans le volume da la géométrie comme (inlet, Wall, outlet, symmitry) et appliquer les paramètres suivants :

Tableau : entrée de fuel		
Boundary	Insert boundary > name > fuel	OK
Basic Settings	Boundary Type >	inlet
	Location	F27.29
Boundary Details	Mass and Momentum > Normal Speed	40 [m/s]
	Heat Transfer > Static Température	300 [K]
	Component Details	CH4
	Component Details > CH4 > Mass Fraction	1

Click OK

Tableau : entrée d'air		
Boundary	Insert boundary > name > air	OK
Basic Settings	Boundary Type >	Inlet
	Location	F18.29
Boundary Details	Mass and Momentum > Normal Speed	10 [m/s]
	Heat Transfer > Static Température	300 [K]
	Component Details	O2
	Component Details > O2 > Mass Fraction	0.232

Click OK

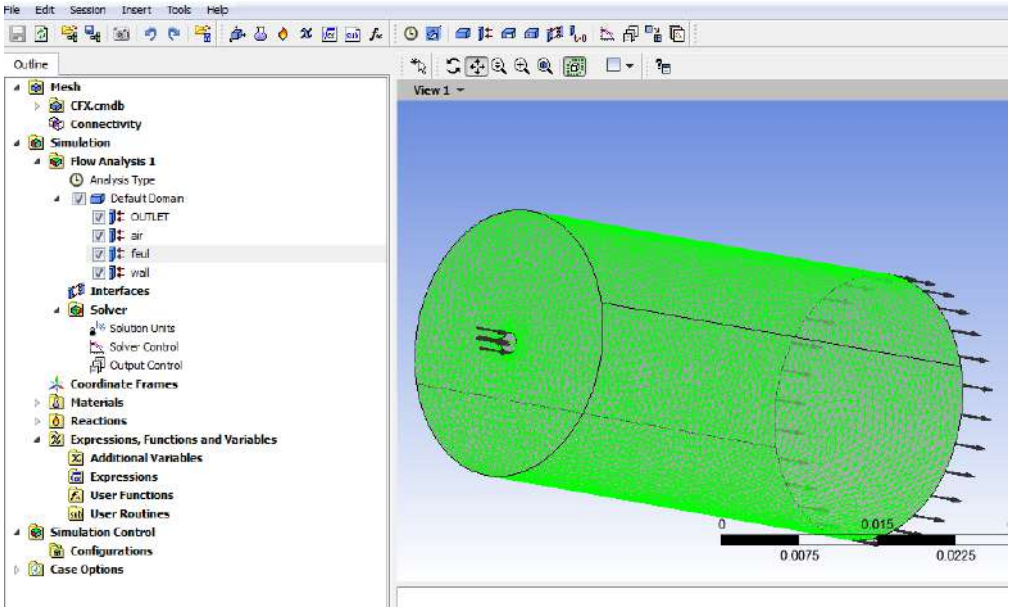
Tableau :Outlet(sortie)		
Boundary	Insert boundary > name > outlet	OK
Basic Settings	Boundary Type >	outlet
	Location	F10.29
Boundary Details	Mass and Momentum > relative pressure	0 [m/s]

Click OK

Tableau : paroi (wall)		
Boundary	Insert boundary > name > wall	OK
Basic Settings	Boundary Type >	wall
	Location	F11.29 F16.29 F24.29 F30.29 F37.29 F4.29 F43.29

Click OK

Après l'étape de création de domaine, on observe cette figure :



Etape 9 : déclaration les conditions initiales : cliquez sur le bouton de initialisation 

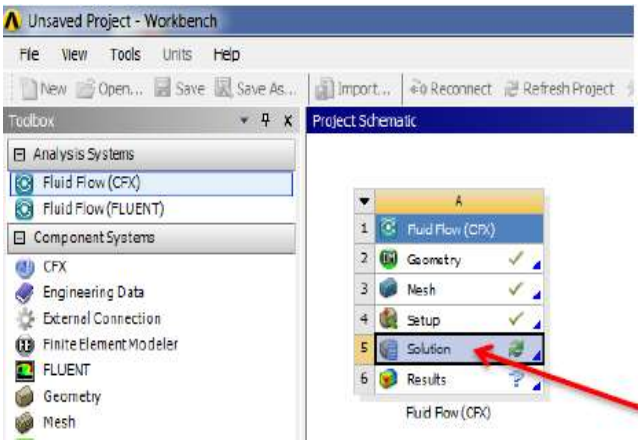
et appliqués les réglages suivants :

Tab	Setting	Value
Global Settings	Initial Conditions > Cartesian Velocity Components > Option	Automatic with Value
	Initial Conditions > Cartesian Velocity Components > U	0 [m s^-1]
	Initial Conditions > Cartesian Velocity Components > V	0 [m s^-1]
	Initial Conditions > Cartesian Velocity Components > W	5 [m s^-1]
	Initial Conditions > Turbulence Eddy Dissipation	(Selected)
	Initial Conditions > Turbulence Eddy Dissipation > Option	Automatic
	Initial Conditions > Component Details	O2
	Initial Conditions > Component Details > O2> Option	Automatic with Value
	Initial Conditions > Component Details > O2 > Mass Fraction	0.232*
	Initial Conditions > Component Details	CO2
	Initial Conditions > Component Details > CO2 > Option	Automatic with Value
	Initial Conditions > Component Details > CO2 > Mass Fraction	0.01
	Initial Conditions > Component Details	H2O
	Initial Conditions > Component Details> H2O > Option	Automatic with Value
	Initial Conditions > Component Details > H2O > Mass Fraction	0.01

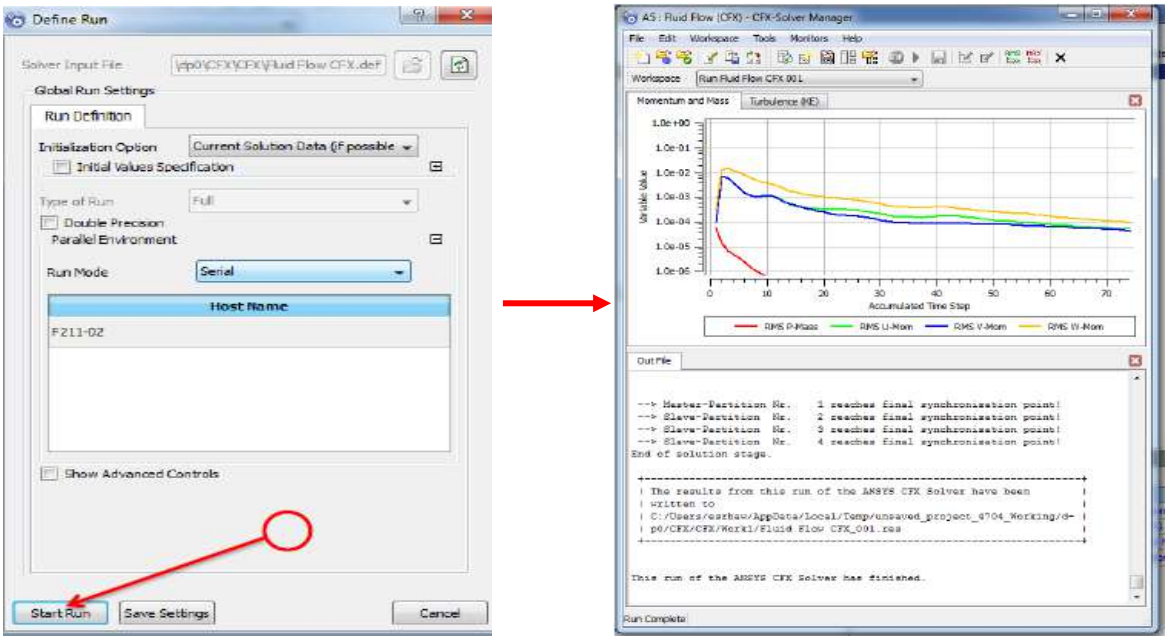
Etape 10 : Click **solver control** et appliqué les réglages suivants **:**

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Convergence Control > Max. Iterations	100
	Convergence Control > Fluid Timescale Control > Timescale Control	Physical Timescale
	Convergence Control > Fluid Timescale Control > Physical Timescale	0.025 [s]

Etape 11 : Vérifiez qu'il y a une coche verte dans la section de configuration puis double-cliquez sur l'icône de la **solution.**

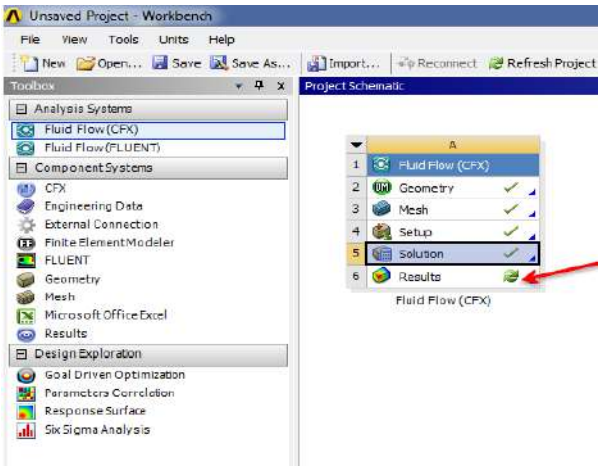


Etape 12 : La dernière étape consiste presse sur **start run**, sur Exécuter et le calcul doit commencer.



Etape 13 : Vérifiez qu'il y a une coche verte à côté de l'icône de la Solution, puis double-cliquez sur l'icône des résultats.

Pour lancer le résultat double clic sur la cellule résultat. On peut créer beaucoup de différents objets dans résultat.



Etape 14 : Créez un nouveau plan appelé Plan 1

outline	location > plan > insert plan > name > plan 1	OK
	geometry > definition > method	Plan **yz**
	method > Plan **yz > x = 0**	apply

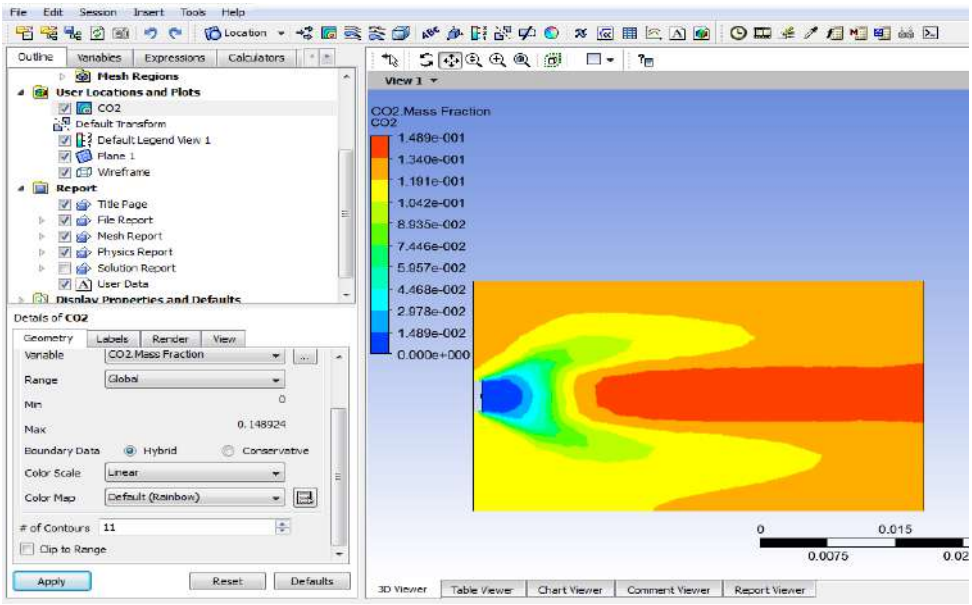
Etape 15 : création des contours

 contour	Click sur le bouton contour > insert contour > Name > exemple : **CO2**	OK
	geometry > location >	Plan **1**
	geometry > variable >	**CO2**.masse fraction

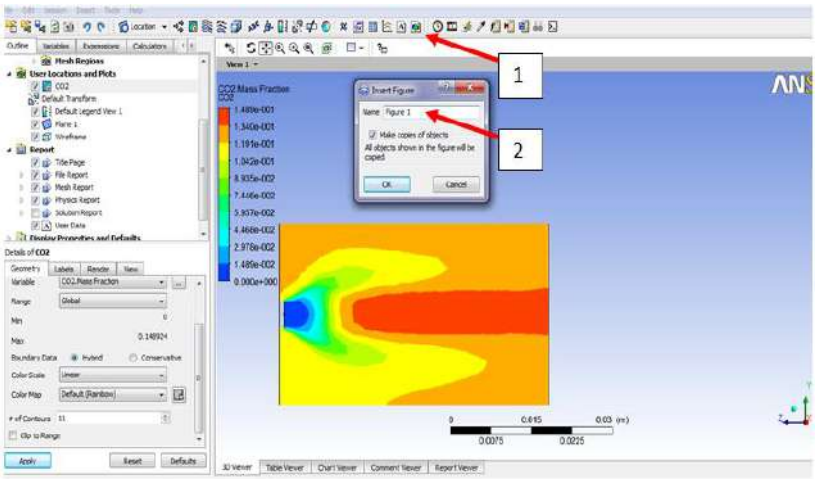
Click OK

Remarque : même méthode valable pour des autres variables (vitesse, CO2, N2 ….).

Après l'étape de création de conteur on observe cette figure, ce qui l'exemple de variation de la fraction massique de CO2.



<u>Etape 16</u> : insérer figure dans le rapport

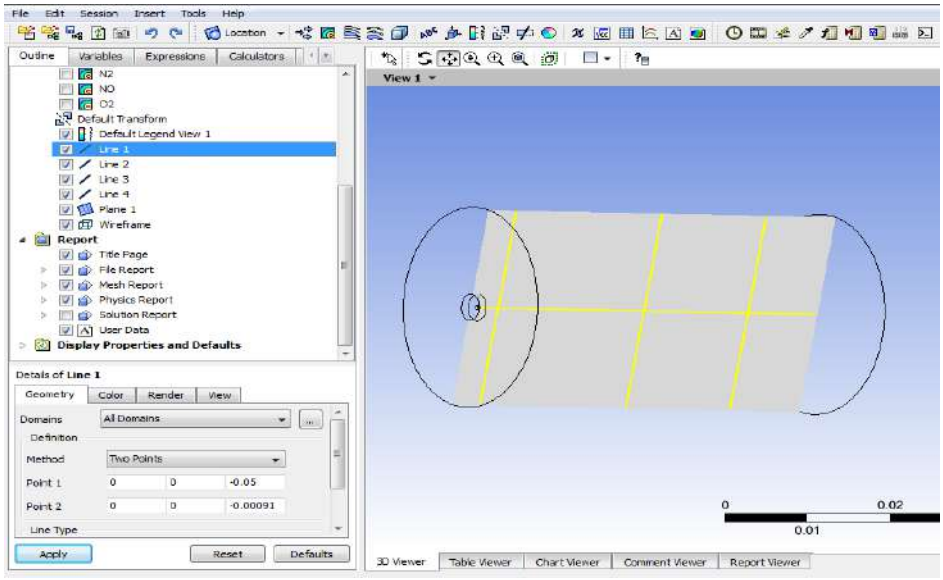


Etape 17 : créations des lignes

<table>
<tr><td rowspan="2">out line</td><td>location > plan > insert plan > name > line1</td><td>OK</td></tr>
<tr><td>geometry > definition > method</td><td>
<table>
<tr><td>line1</td><td>X</td><td>Y</td><td>Z</td></tr>
<tr><td>Point 1</td><td>0</td><td>0</td><td>-0.05</td></tr>
<tr><td>Point 2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Line2</td><td>X</td><td>Y</td><td>Z</td></tr>
<tr><td>Point 1</td><td>0</td><td>-0.015</td><td>-0.004</td></tr>
<tr><td>Point 2</td><td>0</td><td>0.015</td><td>-0.004</td></tr>
<tr><td>Line3</td><td>X</td><td>Y</td><td>Z</td></tr>
<tr><td>Point 1</td><td>0</td><td>-0.015</td><td>-0.025</td></tr>
<tr><td>Point 2</td><td>0</td><td>0.015</td><td>-0.025</td></tr>
<tr><td>Line4</td><td>X</td><td>Y</td><td>Z</td></tr>
<tr><td>Point 1</td><td>0</td><td>-0.015</td><td>-0.04</td></tr>
<tr><td>Point 2</td><td>0</td><td>0.015</td><td>-0.00091</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

Click OK

Remarque : pour créer chaque line il faut déclarer même des étapes qu'est appliqué dans le tableau ci-dessus.



Etape 18 : représentation graphique :

Cette étape nous permet de représenter les résultats de combustion graphiquement, donc pour créer les graphes on va suivre les étapes ci-dessous :

chart	Insert chart > name > example :(NO masse fraction)	OK
	Data sérié > location > line 1 X axis > variable > z	
	Y axis > variable > **NO**.masse fraction	apply

Remarque : même méthode valable pour des autres lignes et des autres variables (vitesse, CO2, N2 ….).

V.1 Introduction :

On présente dans ce chapitre les résultats obtenus par les simulations numériques à l'aide du code Ansys CFX 14.0 sur deux PC i3. Le temps de calcul pour un cas atteint en moyenne 9 heures CPU.

V.2 Modélisation de la chambre de combustion :

V.2.1 Configuration expérimentale :

L'étude expérimentale utilisée pour la validation de la méthodologie de la présente simulation numérique était la configuration d'une chambre de combustion à deux jets coaxiaux avec une convergence au-dessus de la chambre de combustion tirée de la littérature.

Cette configuration a été choisie pour sa géométrie relativement complexe et ces conditions aux limites, bien que l'écoulement soit complexe et ressemble à celui utilisédans une chambre de combustion de turbine à gaz, et pour des mesures accessibles qui tracent les graphes (fraction des espèces, température) dans la chambre de combustion. (Figure(V.1))

Cette étude se compose en plusieurs cas où on a varié les conditions initiales et les modèles de la combustion et de la turbulence.

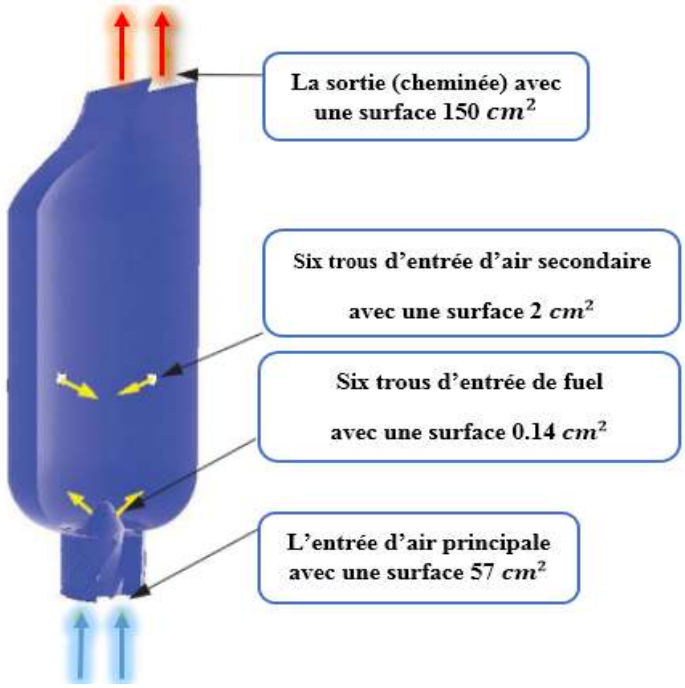


Figure V.1 : Chambre de combustion adoptée

La figure précédente est une section de la coupe de la paroi externe d'une chambre de combustion d'une turbine à gaz appelé la canette de combustion aménagée autour d'un anneau central. (Figure(V.2))

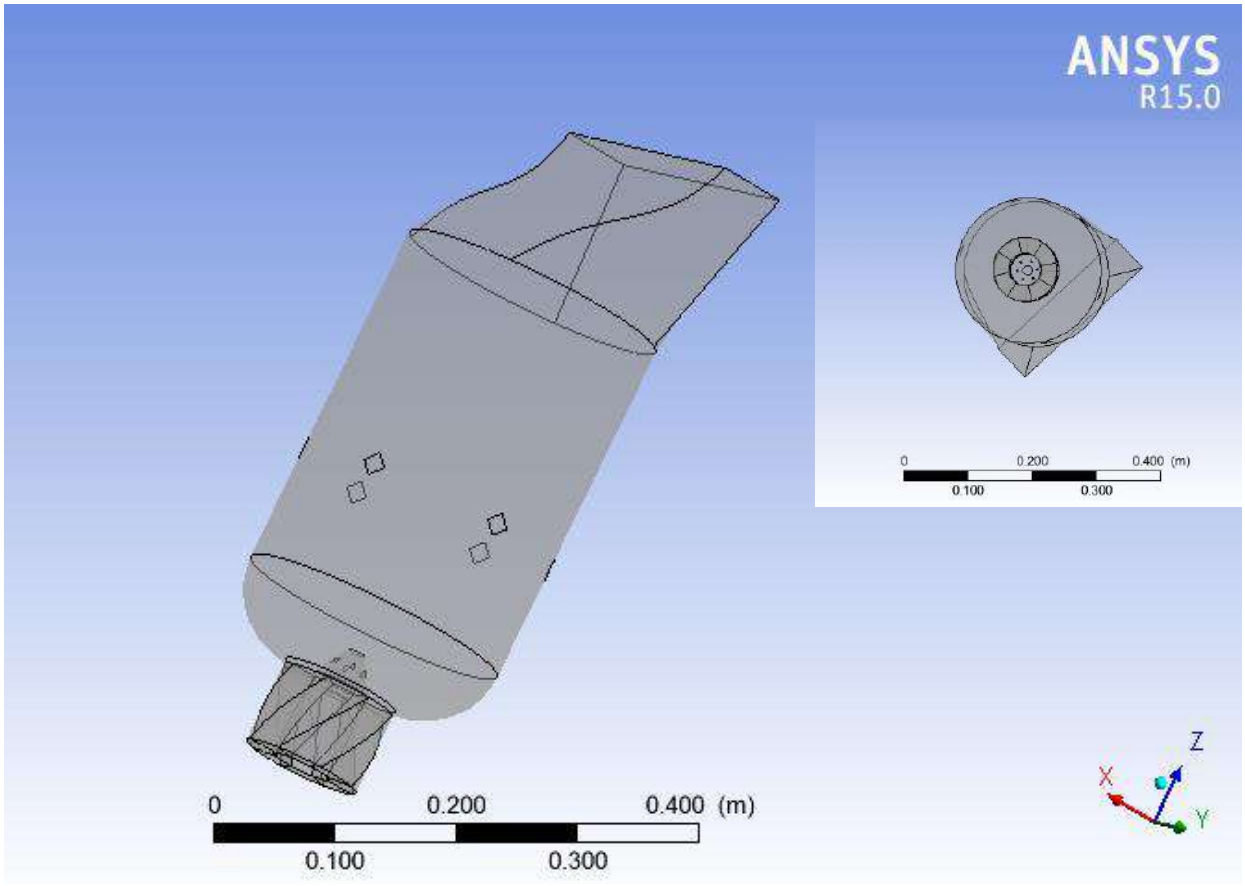


Figure V.2 : Géométrie de la chambre de combustion étudiée

V.2.2 Propriétés des mélanges :

Cette étude implique 05 espèces différentes :

- Méthane (CH4),
- l'oxygène (O2),
- vapeur d'eau (H2O),
- le dioxyde de carbone (CO2),
- l'azote (N2).

On a tracé une ligne axiale (ligne 1) et trois lignes radiales (ligne 2, ligne 3 et ligne 4) pour voir les résultats de la combustion.

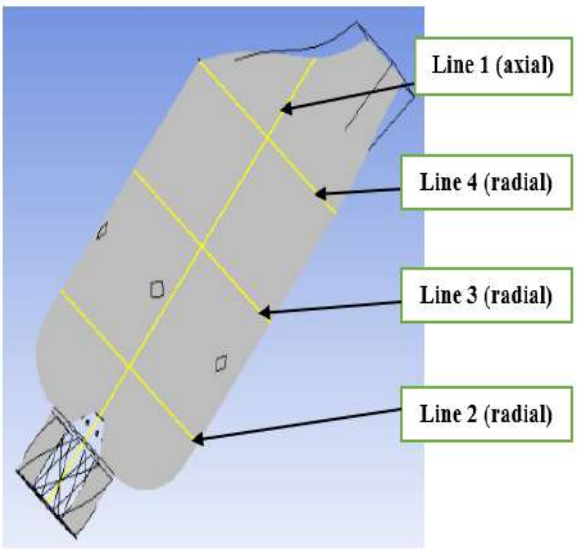


Figure V.3 : Lignes axiale et radiale

V.3 Résultats et discussion :

Les figures de ce chapitre montrent également les profils de densité, fraction massique des espèces (CO2, CH4, NO) et de la température.

V.3.1 Effet de la vitesse d'entrée de l'air :

On veut mettre en évidence l'effet de la vitesse d'entrée de l'air sur la structure de la flamme. On a pris trois valeurs**(10 m/s, 15 m/s, 30m/s)** et on fixe toutes les conditions initiales.

	La vitesse	**pression**	**température**	**Modèle de turbulence**	**Modèle decombustion**
Air	10 m/s	1 atm	300 K	**k-ε**	Eddy Dissipation **B** Ceof = **0.5**
	15 m/s				
	30m/s				
Fuel	40 m/s	1 atm	300 K		

V.3.1.a Champ de la fraction massique de CO2 :

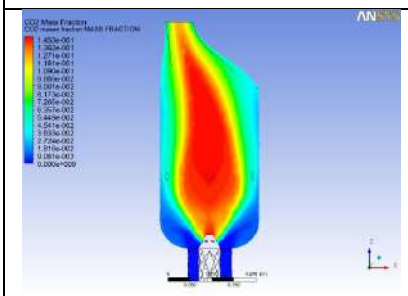
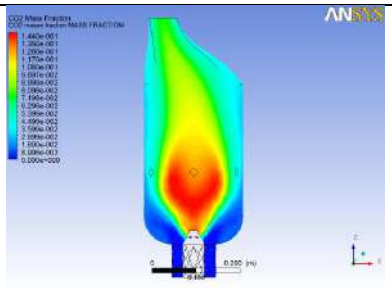
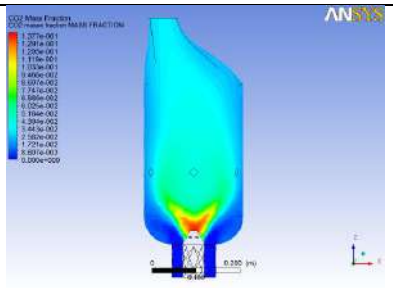
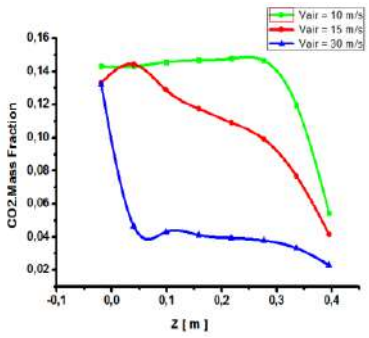
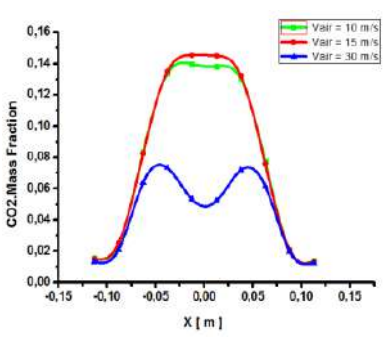
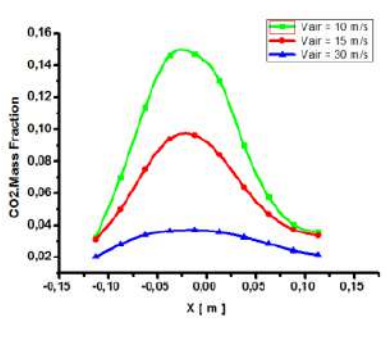
Vitesse d'air =10m/s	Vitesse d'air =15m/s	Vitesse d'air =30m/s
		

Figure V.4 : Champ de la fraction massique de CO2 avec la variation de la vitesse d'air

Les champs de la fraction massique du **CO2** de la chambre pour différentes Vitesses d'entrée d'air sont montrés sur la figure (V.4). On peut voir que la structure flamme est faible lorsque la vitesse d'air =30m/s. La structure de flamme devient plus intense avec la diminution de la vitesse d'air, tout en demeurant accrochée au bec d'injection. Ceci est confirmé par la figure (V.5).

		
Evolution de la fraction massique de CO2 suivant ligne 1 axial	Evolution de la fraction massique de CO2 suivant ligne 2 radial	Evolution de la fraction massique de CO2 suivant ligne 4 radial

FigureV.5 : Evolution axiale et radiale de la concentration de CO2 avec la variation de la vitesse d'air

L'évolution de la fraction massique de CO2 suivant les lignes axiale et radiale montre que :

- Le taux de fraction massique du CO2 est inversement proportionnel à la valeur de la vitesse d'entrée de l'air.

- Radialement (ligne 2, ligne 3 et ligne 4), on remarquequela fraction massique de CO2 est symétrie par rapport à l'axe central de la chambre.

V.3.1.b Champ de la température [k] :

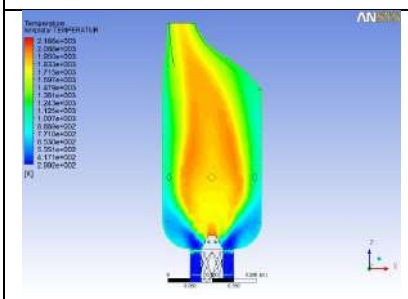
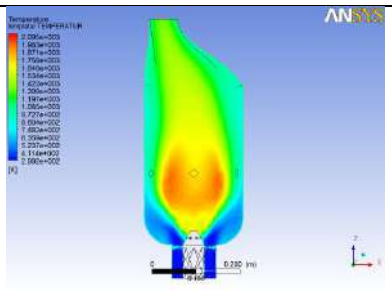
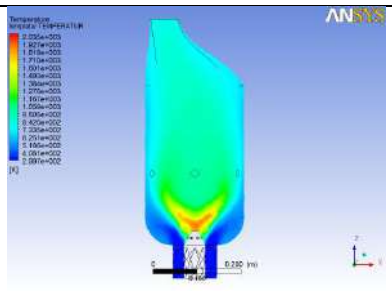
Vitesse d'air =10m/s	Vitesse d'air =15m/s	Vitesse d'air =30m/s
		

Figure V.6 : Champ de la température [k] avec la variation de la vitesse d'air

La Répartition de la température dans la chambre de combustion pour différentes valeurs de Vitesse d'air est montrée sur la figure (V.6). La température maximale de la combustion dans la zone de réactionest de l'ordre 2000 [k].

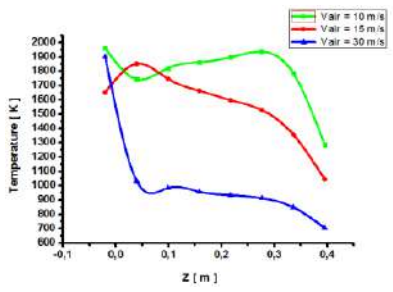
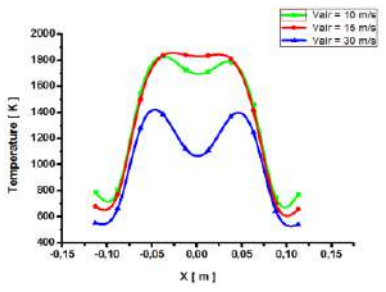
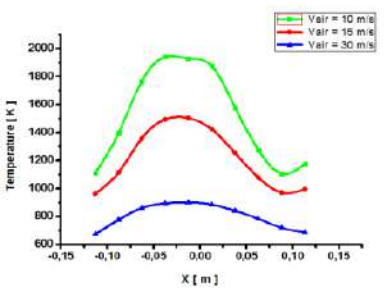
		
Evolution de la température suivant ligne 1 axial	Evolution de la température suivant ligne 2 radial	Evolution de la température suivant ligne 4 radial

Figure V.7 : L'évolution de la température suivant les lignes axiale et radiale avec la variation de la vitesse d'air

A partir des courbes de l'évolution de la température, on peut voir l'influence de la variation de Vitesse d'air d'entrée sur la température (Figure(V.7)) :

- La température de la flammeest inversement proportionnelle à la valeur de la vitesse d'entrée de l'air. En effet, lorsque le débit d'air augmente, la flamme se refroidit et se replie sur elle-même près de l'injecteur à la région centrale de la chambre.

- Radialement (ligne 2 et 4) on remarque que le profil de la température est symétrique par rapport à l'axe central de la chambre.
- La taille de flamme devient plus importante pour de faibles vitesses d'entrée d'air.
- La flamme présente un gauchissement dans sa formedû à la présence d'un convergent à la sortie de la chambre de combustion.

V.3.1.c Champ de la fraction massique de CH4 :

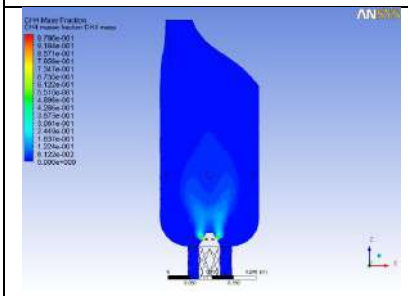
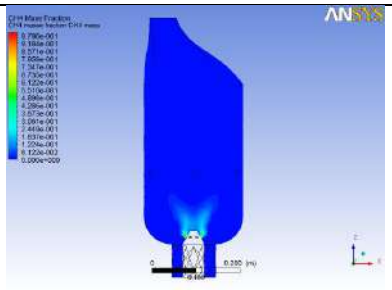
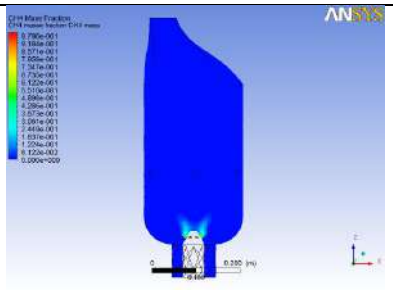
Vitesse d'air =10m/s	Vitesse d'air =15m/s	Vitesse d'air =30m/s
		

Figure V.8 : Champ de la fraction massique de CH4 avec la variation de la vitesse d'air

Répartition de la fraction massique de CH4 de la chambre de différent Vitesse d'air est montrée sur la figure précédant. On peut voir que, l'augmentation de la vitesse d'air influencé sur l'existence de la fraction massique de CH4 telle que, sa fraction massique diminue progressivement jusqu'à une faible valeur

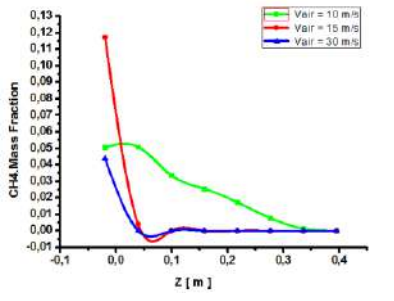
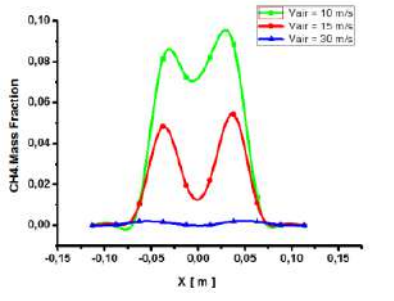
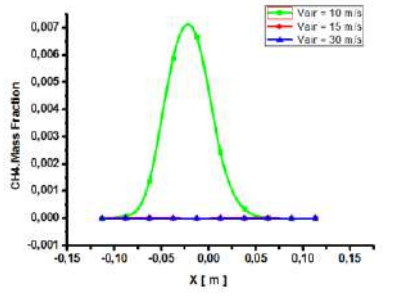
		
Evolution de la fraction massique de CH4 suivant ligne 1 axial	Evolution de la fraction massique de CH4 suivant ligne 2 radial	Evolution de la fraction massique de CH4 suivant ligne 4 radial

Figure V.9 : Evolution axiale et radiale de la concentration de CH4 avec la variation de la vitesse d'air

- pour la ligne axiale (ligne 1) on remarque que, pour la vitesse d'air = 15 m/s la fraction massique de CH4 prend une valeur maximale dans la position Z = 0 m et une valeur minimale

dans la position Z=0.54m. Généralement la fraction massique de CH4 diminue progressivement.

- Pour la ligne radiale (2) on remarque que, pour la vitesse d'air =15m/s et 10m/s la fraction massique de CH4 est symétrique axialement et diminue progressivement.Pour la vitesse d'air = 30m/s sa fraction massique est nulle ; ceci signifie que la quantité d'airest très importante dans la chambre de combustion ; on est dans un cas de combustion avec excès d'air.
- Pour les line radiaux (ligne 3, ligne 4) on remarque que, pour la vitesse d'air=10 m/s la fraction massique de CH4 est symétrie axialement, pour la vitesse d'air = 15 m/s et 30 m/s sa fraction massique est nul à cause de l'augmentation de la vitesse d'air.

V.3.1.d Champ de la fraction massique de NO :

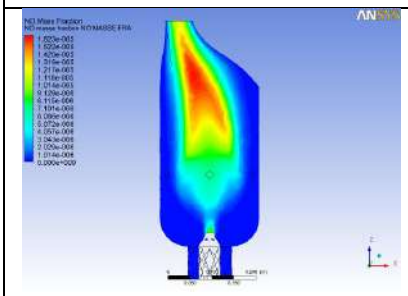
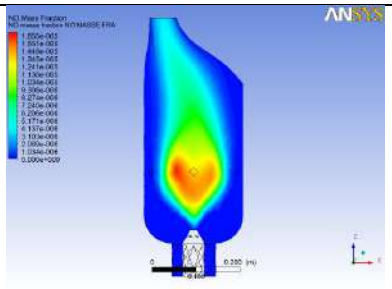
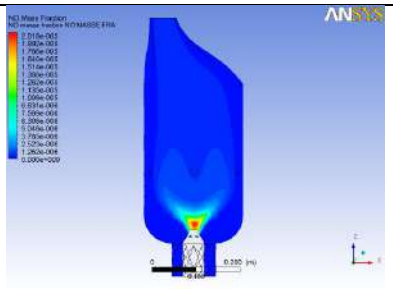
Vitesse d'air =10m/s	Vitesse d'air =15m/s	Vitesse d'air =30m/s
		

Figure V.10 : Champ de la fraction massique de NO avec la variation de la vitesse d'air

La répartition de la fraction massique du **NO** dans la chambre de combustion pour différentes Vitesses d'entrée d'air est montrée sur la figure ci-dessus. La région de concentration de NO diminue progressivement avec l'augmentation de la vitesse d'air. Il peut évidemment être vu que, lorsque la vitesse d'air de 10m/s, la concentration de NO est loin au bec. Pour la vitesse d'air = 15 m/s, la concentration de NO est près du bec et accroché au bec pour la vitesse d'air = 30 m/s.

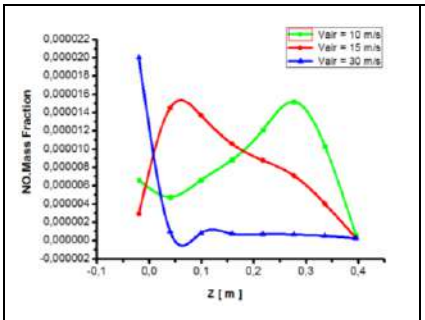
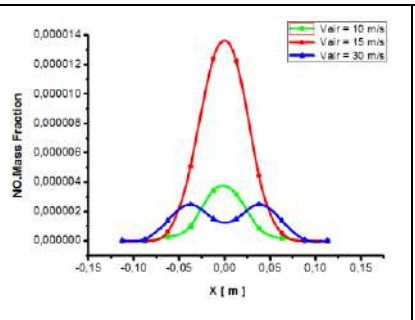
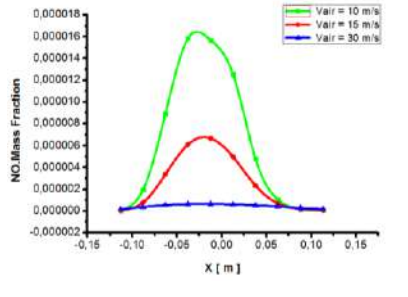
		
Evolution de la fraction massique de NO suivant ligne 1 axial	Evolution de la fraction massique de NO suivant ligne 2 radial	Evolution de la fraction massique de NO suivant ligne 4 radial

Figure V.11 : évolution de la fraction massique de NO suivant les lignes axiale et radiale avec la variation de la vitesse d'air

- A partir des évolutions axiales, la fraction massique de NO diminue rapidement pour une vitesse d'air = 30 m/s jusqu'à la valeur nulle. Pour la vitesse d'air=15 m/s, la fraction massique augmente dans au début jusqu'à une certaine valeur et puis diminue.Pour la vitesse d'air = 10 m/s, la fraction massique de NO augmente progressivement jusqu' à une certaine valeur puis diminue rapidement.
- Pour les évolutions radiales,on remarque une symétrie par apport l'axe de chambre de combustion.
- D'autre part, on remarque que la concentration de la fraction massique de NO diminue proportionnellement avec l'augmentation de la vitesse d'air

V.3.2 Effet de la vitesse d'entrée du fuel (méthane) :

On veut mettre en évidence l'effet de la température d'entrée de l'air sur la structure de la flamme. On a varié la vitesse d'entrée du fuel (méthane) en trois variables **(40 m/s, 60 m/s, 100m/s)** et on fixe toutes les conditions initiales.

	La vitesse	**pression**	**température**	**Modèle de turbulence**	**Modèle de combustion**
Fuel	40 m/s	1 atm	300 K	**k-ε**	Eddy Dissipation **B** Ceof= **0.5**
	60 m/s				
	100m/s				
Air	40 m/s	1 atm	300 K		

V.3.2.a Champ de la fraction massique de CO2 :

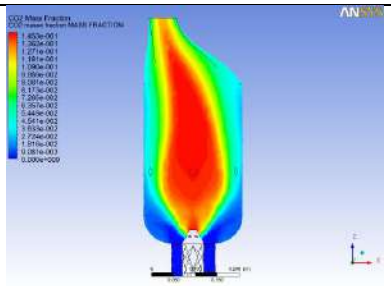
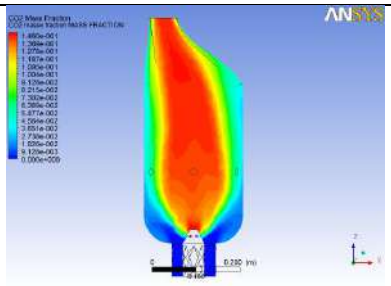
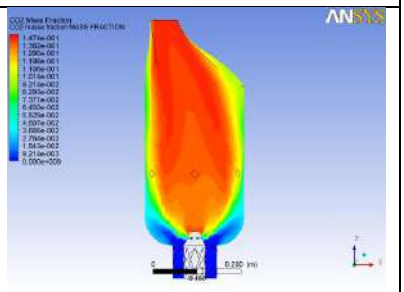
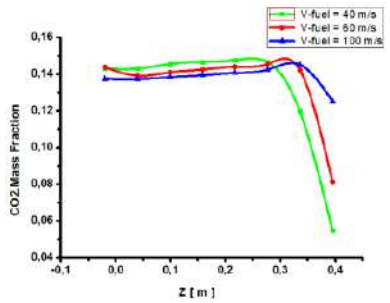
Vitesse de fuel =40m/s	**Vitesse de fuel =60m/s**	**Vitesse de fuel =100m/s**
		

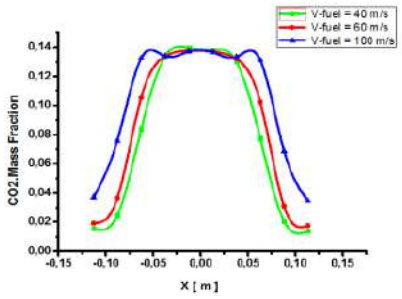
Figure V.12 : Champ de la fraction massique de CO2 avec la variation de la vitesse de fuel

Répartition de la fraction massique de **CO2** de la chambre de différent Vitesse de fuel est montrée sur la figure. On peut voir que la structure flamme est plus grande et couvre

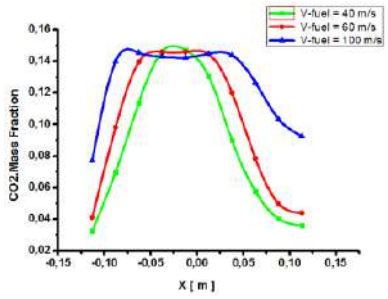
presque toute la région de la chambre de combustion, lorsque la Vitesse de fuel =100 m/s, et la structure flamme devient diminue progressivement avec diminution de la vitesse de fuel.



Evolution de la fraction massique de CO2 suivant ligne 1 axial



Evolution de la fraction massique de CO2 suivant ligne 2 radial



Evolution de la fraction massique de CO2 suivant ligne 4 radial

Figure V.13 : évolution de la fraction massique de CO2 suivant les lignes axiale et radiale avec la variation de la vitesse de fuel

- A partir les évolutions axial de la fraction massique de CO2 on peut voir que sa fraction massique est stable dans valeur maximal 0.14 pour la zone de réaction Z = 0 m jusqu'à Z = 0.25 après sa on va remarquer que la concentration de CO2 diminué rapidement.
- Pour les évolutions radiales on peut voir que la fraction massique de CO2 est symétrie par apport l'axe de chambre de combustion
- A d'autre part on va remarquer que la concentration de la fraction massique de CO2 augmente proportionnellement avec l'augmentation de la vitesse de fuel jusqu'à une grand valeur dans cœur de flamme.

V.3.2.b Champ de la fraction massique de CH4 :

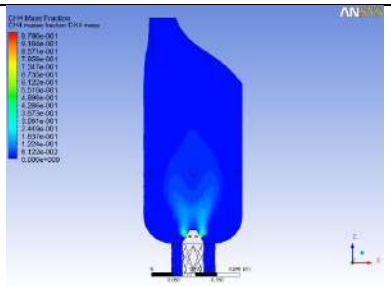
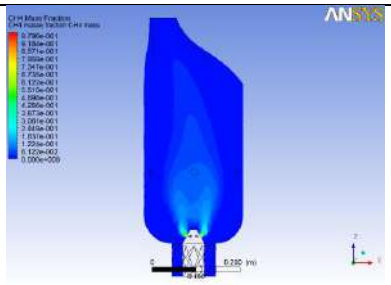
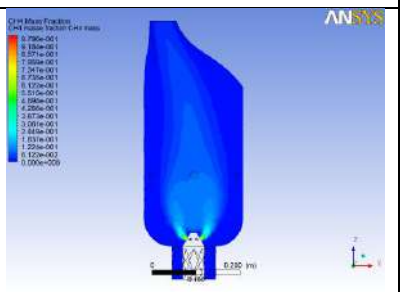
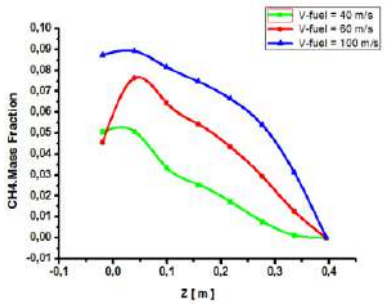
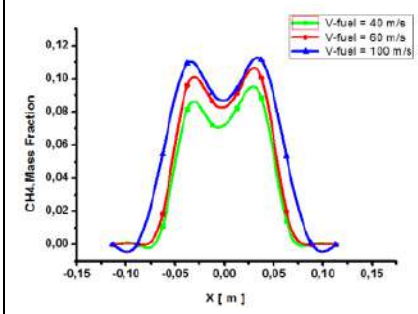
Vitesse de fuel =40m/s	Vitesse de fuel =60m/s	Vitesse de fuel =100m/s
		

Figure V.14 : Champ de la fraction massique de CH4 avec la variation de la vitesse de fuel

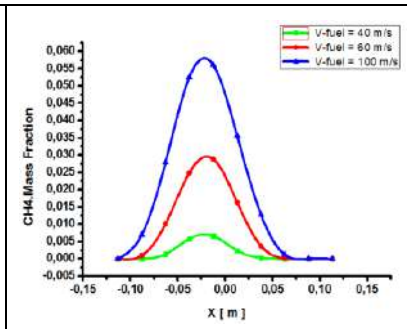
Répartition de la fraction massique de CH4 de la chambre de différent Vitesse de fuel est montrée sur la figure précédant. On peut voir que, l'augmentation de la vitesse de fuel influencé sur l'existence de la fraction massique de CH4 telle que, sa fraction massique augmente progressivement jusqu'à une grand valeur.



Evolution de la fraction massique de CH4 suivant ligne 1axial



Evolution de la fraction massique de CH4 suivant ligne 2 radial



Evolution de la fraction massique de CH4 suivant ligne 4 radial

Figure V.15 : évolution de la fraction massique de CH4 suivant les lignes axiale et radiale avec la variation de la vitesse de fuel.

L'augmentation de la vitesse d'injection de fuel implique l'augmentation de fraction massique de CH4 dans la chambre de combustion alors :

- Pour la line axiale (ligne 1) fraction massique de CH4 prendre une valeur maximal égale 0.09 tel que la vitesse de fuel égale 100 m/s et après sa diminue progressivement jusqu' à une valeur nul.
- Pour les line radiales on remarque que les graphs est symétrie par rapport l'axe de chambre de combustion et peut voir une grand différent entre les résultats qui obtient dans les graphs tel que l'augmentation de la fraction massique de CH4 proportionnelle avec l'augmentation vitesse de fuel jusqu'à une grand valeur loin la paroi et près de l'axe d'injection.

V.3.2.c Champ de la température [k] :

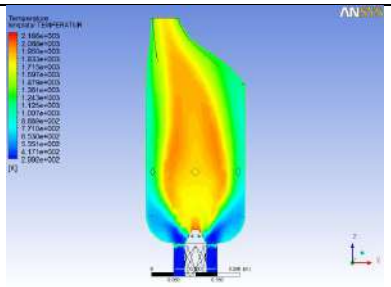
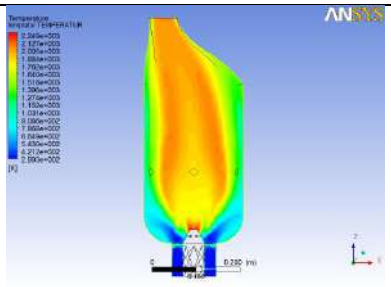
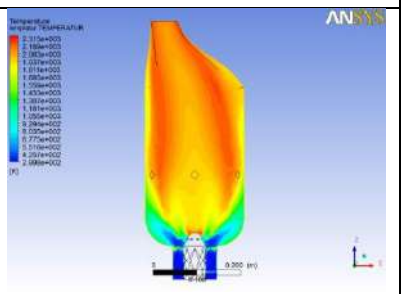
Vitesse de fuel =40m/s	Vitesse de fuel =60m/s	Vitesse de fuel =100m/s
		

Figure V.16 : Champ de la température [k] avec la variation de la vitesse de fuel

Répartition de la température de la chambre de différent Vitesse d'air est montrée sur la figure précédant la température maximale de la combustion dans la zone de réaction Prendre sa valeur maximale à l'ordre 2200 [k].

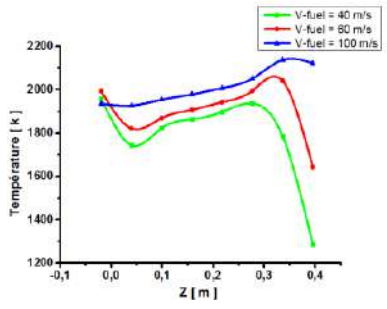
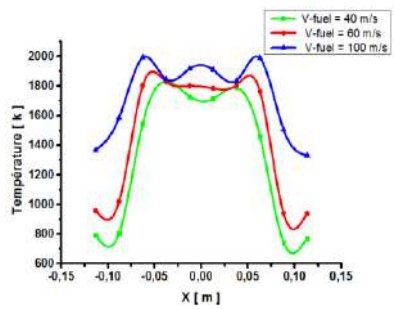
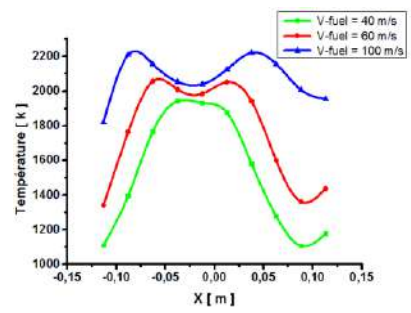
		
Evolution de la température suivant la ligne 1 axial	Evolution de la température suivant la ligne 2 radial	Evolution de la température suivant la ligne 4 radial

Figure V.17 : évolution de la température suivant les lignes axiale et radiale avec la variation de la vitesse de fuel

- on vent mettre à partir les évolutions axiales (ligne 1) que l'augmentation de la vitesse de fuel d'entrée proportionné avec l'augmentation de la température de la flamme.
- A d'autre façon en remarque que par les évolutions radiale pour une vitesse de fuel d'entrée égale 100 m/s la température prendre une valeur maximal égal 2200 K° loin de bec bruleur, tel que la largeur et la longueur de flamme sa sera très grand

V.3.2.d Champ de la fraction massique de NO :

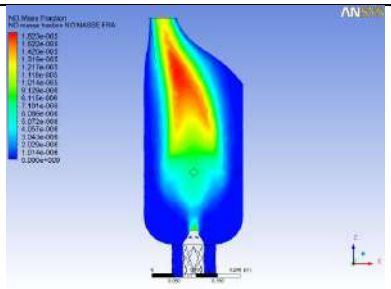
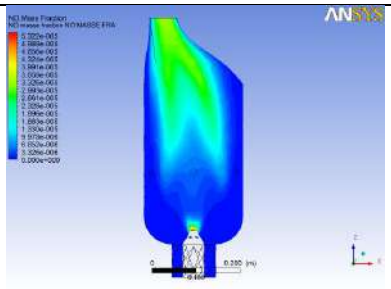
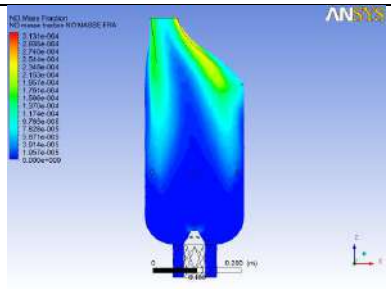
Vitesse de fuel =40m/s	Vitesse de fuel =60m/s	Vitesse de fuel =100m/s
		

Figure V.18 : Champ de la fraction massique de NO avec la variation de la vitesse de fuel

Répartition de la fraction massique de **NO** de la chambre de différent Vitesse de fuel est montrée sur la figure précédant la région de répartition de NO diminue progressivement avec l'augmentation de la vitesse de fuel. Il peut évidemment être vu que, lorsque la vitesse de fuel de 40 m/s, la concentration de NO est loin au bec.

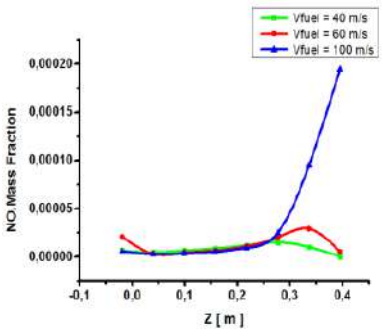
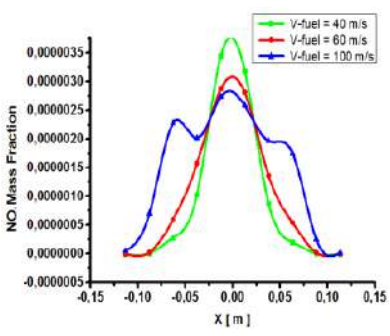
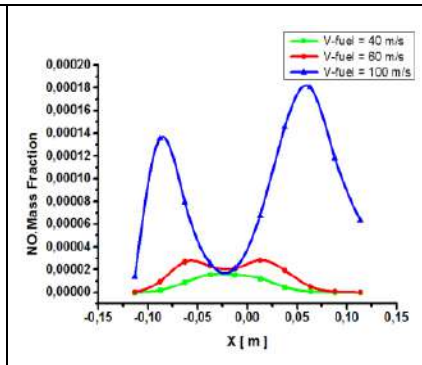
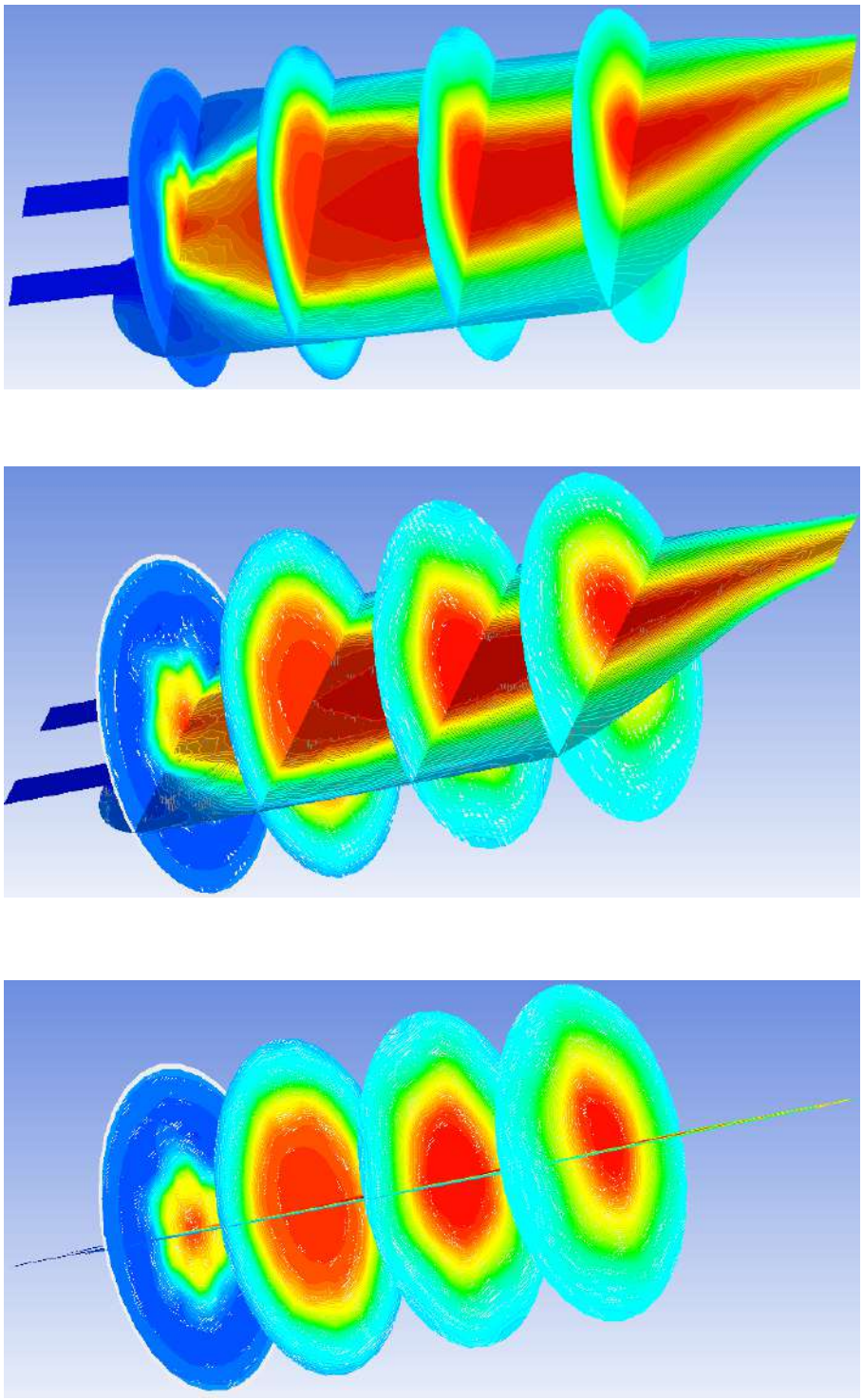
		
Evolution de la fraction massique de NO suivant ligne 1 axial	Evolution de la fraction massique de NO suivant ligne 2 radial	Evolution de la fraction massique de NO suivant ligne 4 radial

Figure V.19 : évolution de la fraction massique de NO suivant les line axial et radial avec la variation de la vitesse de fuel

- A partir les évolutions axial qui représente dans la graph 1 est montre que la concentration de NO prendre une valeur maximal de $2*10^{-4}$ dans la zone de réaction Z = 0.38 m et malgré sa cette valeur est très faible.
- A d'autre part pour les évolutions radial la concentration de NO est proportionnellement inversé avec l'augmentation de vitesse de fuel et la distribution de NO près les parois à la sortie de la chambre de combustion loin à la l'axe de la chambre de combustion.



Figures V.20 : représentation d'évolution de fraction massique de CO2 au plan radial et axial

V.3.3 Effet de la température de fuel d'entrée sur la flamme :

Le but de cette partie est de voir l'effet de variation de la température d'injection du fuel sur la structure de la flamme de Méthane-Air, ainsi que son influence sur la combustion. On suppose que le combustible est injecté à (**300 k, 350k, 400k)**

	Température	**Pression**	**Vitesse**	**Modèle de turbulence**	**Modèle de combustion**
Fuel	300 K	1 atm	40 m/s	**k- ε**	Eddy Dissipation **B** Coef = 0.5
	350 K				
	400 K				
Air	300 K	1 atm	10 /s		

V.3.3.a Champ de la fraction massique de CO2:

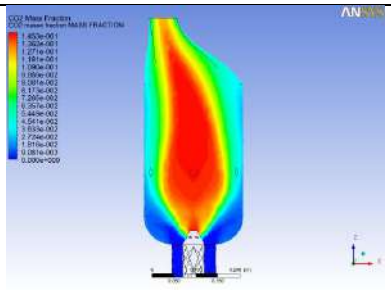
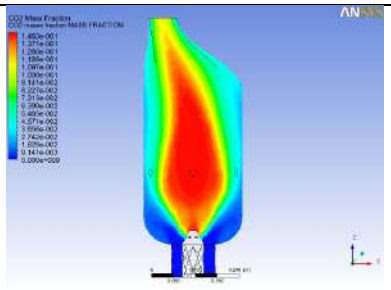
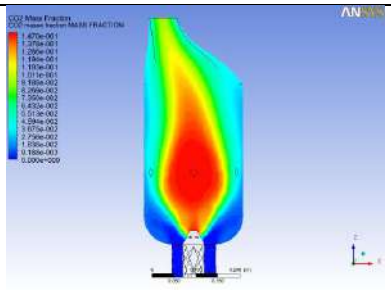
Température de fuel = 300 K	**Température de fuel = 350 K**	**Température de fuel = 400 K**
		

Figure V.21 : Champ de la fraction massique de CO2 avec la variation de température de fuel

Le champ de la fraction massique de **CO2** est représenté sur les figures précédant et sous forme de profile pour différentes valeurs de température d'entrée de fuel injecté.

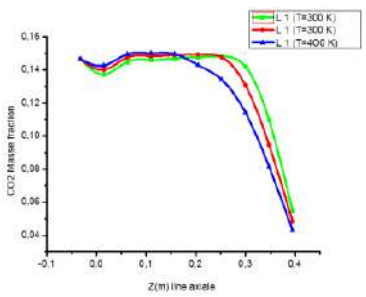
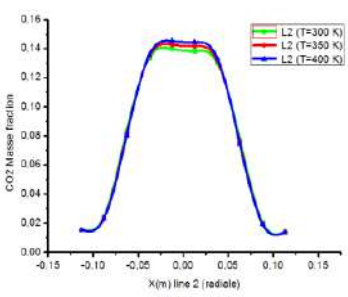
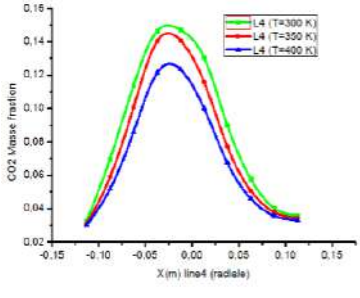
		
Evolution de la fraction massique du CO2 suivant la ligne 1 axiale	Evolution de la fraction massique du CO2 suivant la ligne 2 radial	Evolution de la fraction massique du CO2 suivant la ligne 4 radial

Figure V.22 : évolution de la fraction massique de CO2 suivant les lignes axiales et radiales avec la variation de la température de fuel

L'influence de la variation de température de fuel injecté sur la distribution de la concentration de **CO2** est représentée sur les graphes ci-dessus :

- il peut voir qu'axialement dans une région plus proche du bec de bruleur, la distribution de **CO2** diminue progressivement avec l'augmentation de température de fuel injecté jusqu'à une valeur faible.
- D'autre part, les évolutions radiales sont représentées sur les graphes (**2, 3**) et montrent que la largeur et la longueur de la flamme diminuent avec l'augmentation de la température d'entrée.

V.3.3.b Champ de la température [k] :

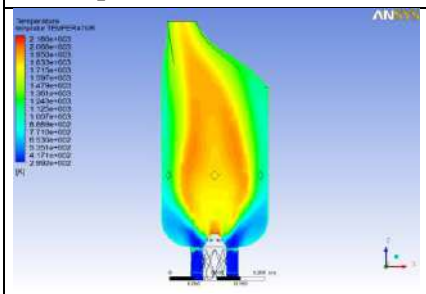
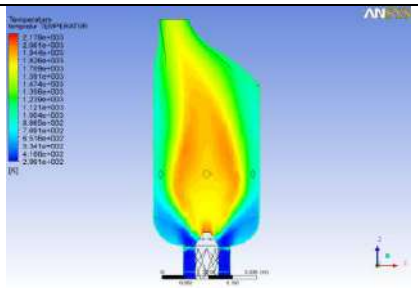
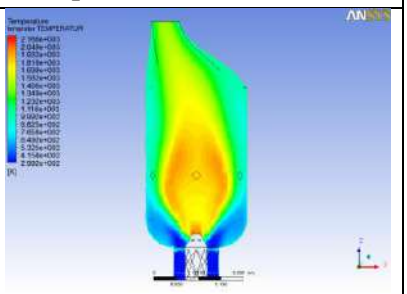
Température de fuel = 300 K	**Température de fuel = 350 K**	**Température de fuel = 400 K**
		

Figure V.23 : Champ de la température [k] avec la variation de la température de fuel

Le champ de la température est représenté sur les figures précédant et sous forme de profile pour différentes valeurs de température d'entrée de fuel injecté.

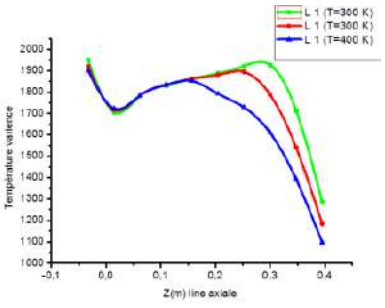
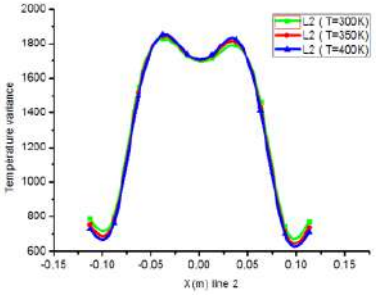
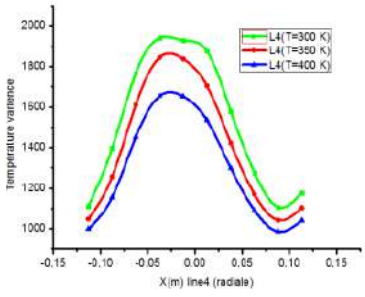
		
Evolution de température suivant la ligne 1 axiale	Evolution de température suivant la ligne 2 radial	Evolution de température suivant la ligne 4 radial

Figure V.24 : évolution de la température suivant les lignes axiales et radiales avec la variation de la température de fuel

- On remarque que plus la température d'entrée est grande plus la flamme s'accroche au bec d'injection, ce qui peut représenter un danger par la fusion du bec si le temps résiduel dépasse une certaine limite ou donne lieu à une possibilité du retour de flamme si le diamètre d'injection dépasse la distance de coincement de la flamme en question.
- D'autre part, la température maximale de la flamme est inversement proportionnelle avec l'augmentation de la température d'entrée du carburant comme montre les figures dessus et La flamme devient plus mince si on augmente la température d'entrée du fuel.

V.3.3.c Champ de la fraction massique de NO :

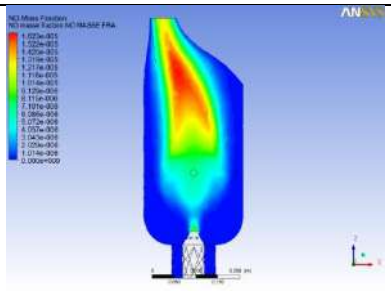
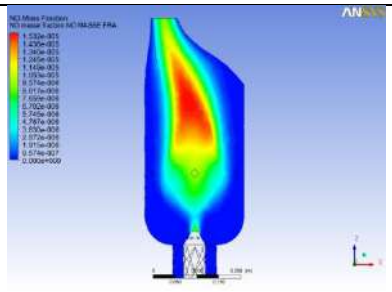
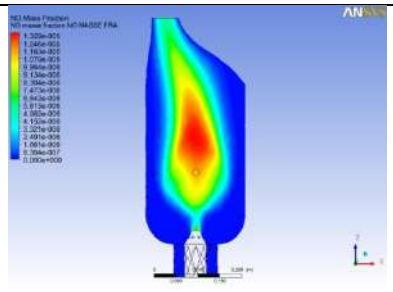
Température de fuel = 300 K	**Température de fuel = 350 K**	**Température de fuel = 400 K**
		

Figure V.25 : Champ de la fraction massique de NO avec la variation de la température de fuel

Les figures ci-dessus représentent l'influence de variation de la température de fuel injecté sur la variation de la concentration de **NO** dans la chambre de combustion.

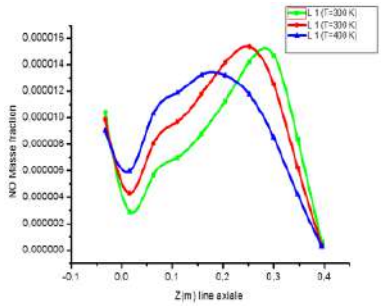
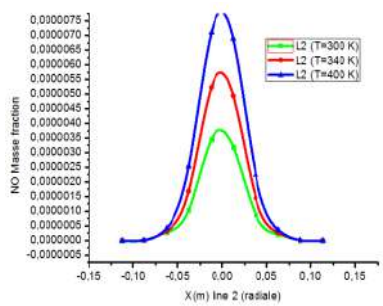
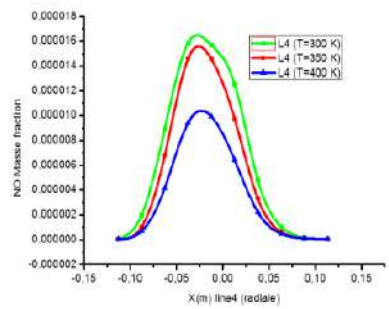
		
Evolution de la fraction massique de NO suivant la ligne 1 axiale	Evolution de la fraction massique de NO suivant la ligne 2 radial	Evolution de la fraction massique de NO suivant la ligne 4 radial

Figure V.26 : évolution de la fraction massique de NO suivant les lignes axiales et radiales avec la variation de la température de fuel

D'après les résultats de simulation, on remarque :

- Axialement (au centre de la chambre de combustion), on voit que la quantité de concentration de NO diminue prés du bec de bruleur tandis que plus loin on remarque que la concentration de NO prend sa valeur maximale 15 $*10^{-4}$ dans la zone de réaction Z=0.28 m pour une valeur de température de fuel injecté puis finalement la quantité de NO diminue rapidement jusqu'à une valeur nulle à la zone Z=0.4 m.
- Radialement au niveau de deux lignes radiales (ligne 2 et ligne 3), on remarque que la concentration de NO augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température de fuel.

V.3.4 Effet de la température d'entrée d'air sur la flamme :

Le but de cette partie est de voir l'effet de variation de la température d'entrée de l'air d'injection sur la structure de la flamme de Méthane-Air, ainsi que son influence sur la combustion. On suppose que le combustible est injecté à 300 **K.**

	Température	**Pression**	**Vitesse**	**Modèle de turbulence**	**Modèle de combustion**
Fuel	300 K	1 atm	40 (m/s)	**k- ε**	Eddy Dissipation Coef **B** = 0.5
AIR	300 K	1 atm	10 (m/s)		
	350 K				
	400 K				

V.3.4.a Champ de la fraction massique de CO2 :

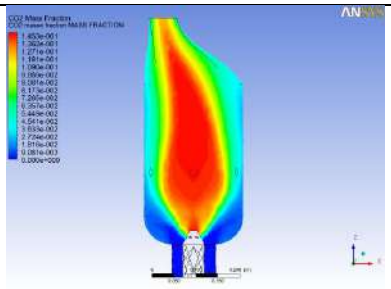
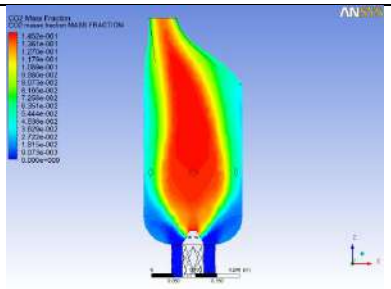
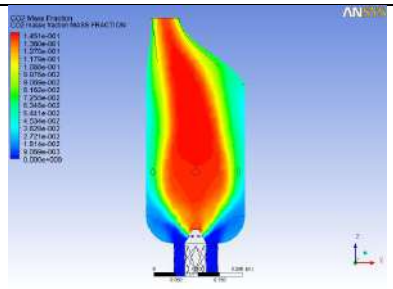
Température d'air= 300 K	Température d'air = 350 K	Température d'air = 400 K
		

Figure V.27 : Champ de CO2 masse fraction avec la variation de la température d'air

La figure précédant représente le champ de répartition de la fraction massique du CO_2 sous l'effet de la variation de la température d'injection de l'air.

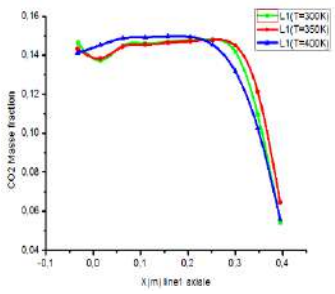
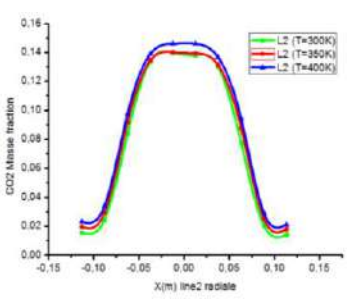
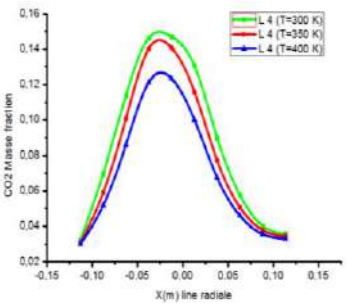
		
Evolution de la fraction massique de CO2 suivant la ligne 1 axiale	Evolution de la fraction massique de CO2 suivant la ligne 2 radiale	Evolution de la fraction massique de CO2 suivant la ligne 4 radiale

Figure V.28 : évolution de la fraction massique de CO2 suivant les lignes axiales et radiales avec la variation de la température d'air

- Les évolutions de la fraction massique de **CO2** suivant la direction axiale montre que la concentration de CO2 est stable dans une valeur maximale égale 0.15 jusqu'à une zone de réaction 0.3. On remarque que la concentration décroit rapidement jusqu'à prendre une valeur nulle pour n'importe quelle valeur de température d'air injecté.
- Les évolutions de la fraction massique de **CO2** suivant la direction radiale montre que les graphes sont symétriques par rapport au centre de la chambre de combustion et augment proportionnellement avec l'augmentation de la température du fuel. On remarque que les résultats montrés dans le **graphe4** vont dans le sens contraire tel que l'augmentation

de température de fuel injecté est inversement proportionnelle avec la concentration de CO2 dans la chambre de combustion.

V.3.4.b Champ de la fraction massique de CH4 :

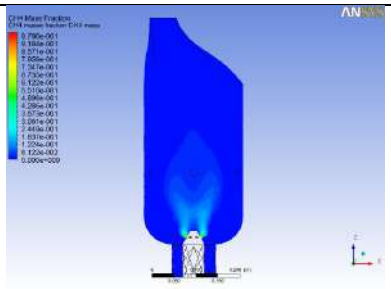
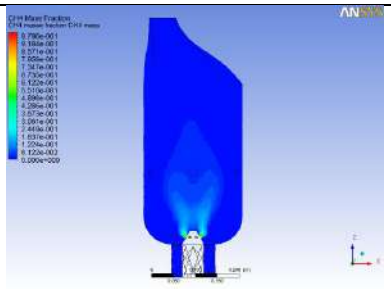
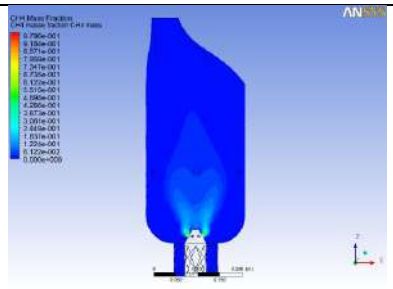
Température d'air= 300 K	Température d'air = 350 K	Température d'air = 400 K
		

Figure V.29 : Champ de fraction massique du CH4 avec la variation de la température d'air

La figure (V.29) représente l'influence de variation de la température d'air injecté sur la variation de concentration de CH4 dans la chambre de combustion. On constate un effet très faible de la température d'injection de l'air sur les fractions massiques du CH4 dans la direction axiale de la chambre tandis que cet effet devient sensible dans la direction radiale et particulièrement au centre de la chambre comme le montre la figure (V.30).

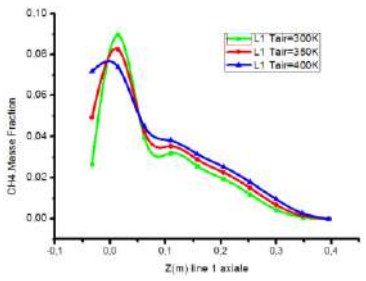
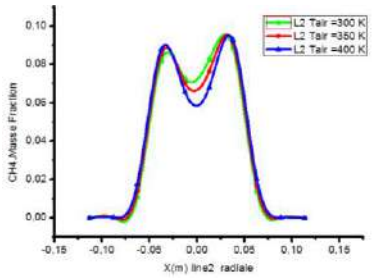
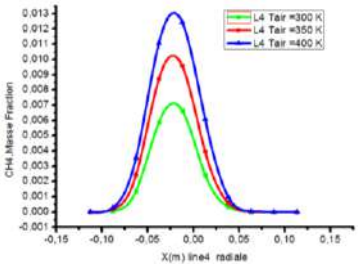
		
Evolution de la fraction massique de CH4 suivant la ligne 1 axial	Evolution de la fraction massique de CH4 suivant la ligne 2 radial	Evolution de la fraction massique de CH4 suivant la line 4 radial

Figure V.30 : évolution de la fraction massique de CH4 suivant les lignes axiales et radiales avec la variation de la température d'air

- On remarque bien que la quantité de CH4 diminue progressivement avec l'augmentation de la température d'injection de l'air jusqu'à prendre une valeur nulle au voisinage de **400 K .** Cependant, les courbes sur l'axe radial montrent

une concentration plus importante au centre de la chambre ; ce qui permet la survie de la flamme dans cette région par rapport à d'autres. Figure (V.29).

V.3.4.c Champ de la température [k] :

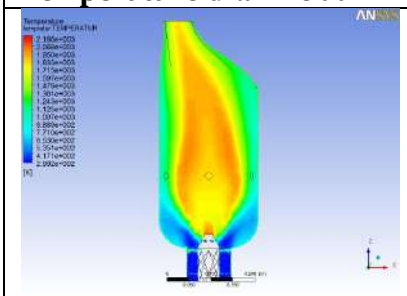
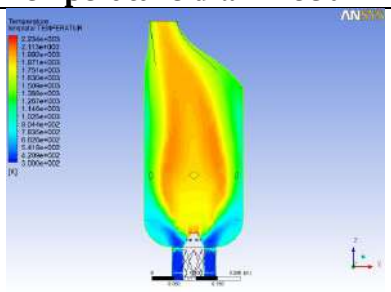
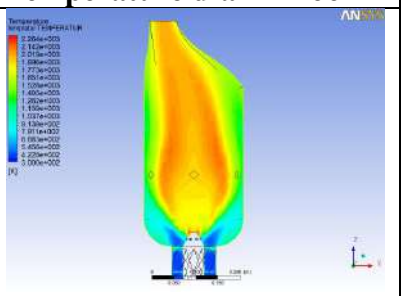
Température d'air= 300 K	Température d'air = 350 K	Température d'air = 400 K
		

Figure V.31 : Champ de température avec la variation de la température d'entrée de l'air

La figure (V.31) présente le champ de température pour différentes valeurs de température d'entrée de l'air. On remarque au début que la température maximale atteinte par la flamme augmente en augmentant la température d'injection de l'air tout en gardant une structure de flamme accrochée au bec. D'autre part, la flamme atteint une valeur maximale de température (1900°K) loin du bruleur dans la zone centrale de la chambre de combustion (graphe 1 de la figure(V.32)) ; ce qui sauvegarde ce dernier du risque de fusion.

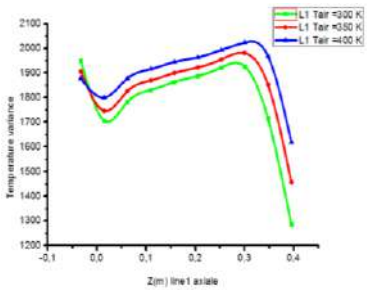
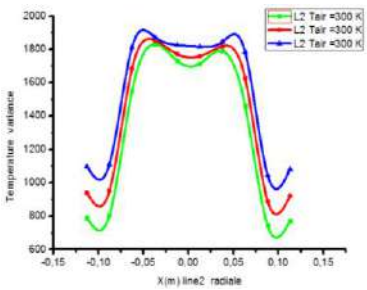
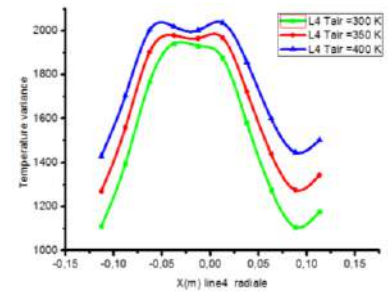
		
Evolution de la Température suivant la ligne 1 axiale	Evolution de la Température suivant la ligne 2 radial	Evolution de la Température suivant la ligne 4 radial

Figure V.32 : Evolution de la Température suivant les lignes axiales et radiales avec la variation de la température d'entrée de l'air

L'évolution de la température dans le sens radial indique qu'elle a des valeurs plus faibles près des parois (environ 700°K) (graphes 2,3 de Figure (V.32)).

V.3.4.d Champ de la fraction massique de NO :

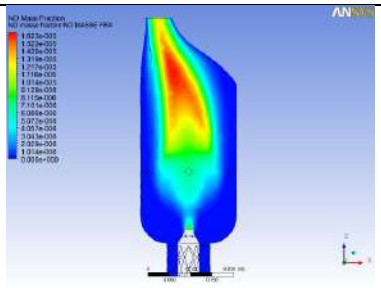
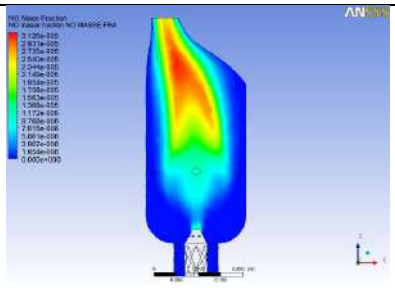
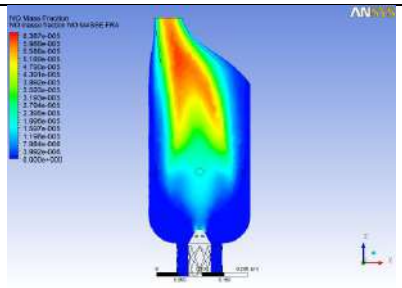
Température d'air = 300 K	Température d'air = 350 K	Température d'air = 400 K
		

Figure V.33 : Champ de NO Masse fraction avec la variation de la température d'air

La Figure(V.33) représente la répartition de la fraction massique de NO dans la chambre de combustion pour différentes valeurs de température d'air à l'entrée.

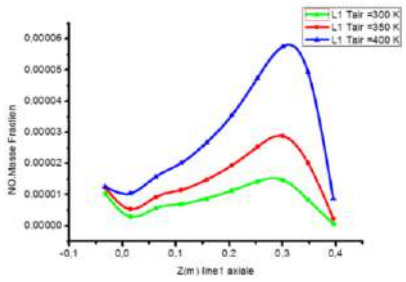
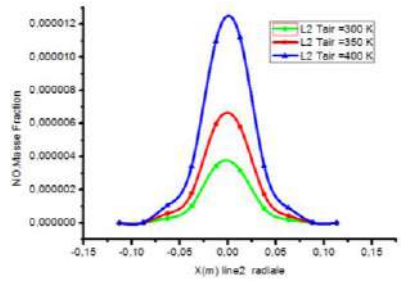
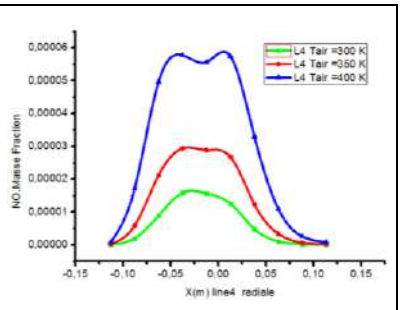
		
Evolution de la fraction massique de NO suivant la ligne 1 axiale	Evolution de la fraction massique de NO suivant la ligne 2 radial	Evolution de la fraction massique de NO suivant la ligne 4 radial

Figure V.34 : Evolution de la fraction massique de NO avec la variation de la température d'air

- Axialement, on remarque que la quantité de concentration de NO devient plus grande si la température d'air prend une valeur élevée (400K).
- Radialement, la représentation des graphes (2 et 3) montre une grande concentration de NO au niveau de l'axe centrale de la chambre près de la sortie convergente.
- On note que l'augmentation de la température d'injection de l'air induit une augmentation dans la température de la flamme dépassant les 2000K ; ce qui favorise le phénomène de dissociation donnant naissance aux radicaux comme le NO.

Conclusions générales :

Depuis plusieurs dizaines d'années, la problématique de l'énergie est devenue un sujet de société essentiel. Les modes de production d'énergie, ainsi que les modes d'utilisation, sont extrêmement nombreux et diversifiés.

Dans cette problématique, les recherches appliquées et fondamentales sont largement mises à contribution afin d'améliorer les systèmes de production d'énergie, dont font partie les systèmes de combustion utilisés dans le secteur des transports ou des procédés industriels.

Le présent travail a porté essentiellement sur la simulation numérique du phénomène de l'aérothemochimie turbulente dans une flamme de non-pré-mélange, utilisant un outil de calcul CFD : le code CFX sous ANSYS 14.0.Le modèle de la turbulence adopté est le modèle deturbulence k-εet le modèle de combustion EDM, et le modèle de rayonnement P1, avec un mécanisme de réaction réduit à une seule étape.

Dans ce travail, nous avons présenté les résultats obtenus par la modélisation d'un écoulement réactif dans la chambre de combustion d'uneturbine à gaz. La configuration étudiée est basée sur un jet axial et turbulent, tel qu'on peut rencontrer dans les flammes de diffusion (non pré-mélange).

Ce travail s'inscritdans lecadre des études fondamentales de combustion turbulente où l'objectif est de comprendre les mécanismes d'interaction entre la flamme et la turbulence. L'intérêt de ce dispositif réside dans le contrôle des conditions initiales (pression, température, richesse du mélange réactif) et des paramètres de la turbulence (intensité et échelle caractéristiquede la turbulence).

Une étude paramétriqueaété menée où on aexaminé l'effet des conditions initiales sur la structure de la flamme en occurrence : la vitesse, température de fuel /air avec de modèle de combustion (Eddy dissipation).

Les résultats de simulation obtenus permettent d'examiner l'évolution axiale et radiale de la température et des fractions massiques des espèces CO2, CH4, H2O, O2, NO, N2).

À la fin de ce travail, nous espérons être utile et enrichit la bibliothèque de l'université que nous voulons poursuivre cette recherche, le spectre de son importance pour suivre le rythme de la recherche scientifique de pointe dans cette spécialité, qui se concentre actuellement sur l'hydrogène de compensation de pétrole qui est extrait à partir d'énergies renouvelables.

Références Bibliographie

[1] DADDIOUAISSA DAOUD, **Etude de la combustion turbulente dans chambre de combustion tridimensionnel d'un moteur diesel**, Mémoire de Magistère Université de MENTOURI –CONSTANTINE, 2013.

[2] Benzerouhk Abdelkader, **simulation numérique du comportement d'une flamme non pré-mélangé hydrogène/air d'un milieu confiné**, Mémoire de Master Université de Médéa, 2013.

[3] Guillaume Albouze, **Simulation aux grandes échelles des écoulements réactifs non-Pré mélangés,** thèse doctorat, université de Toulouse, France, 2009.

[4] BOUKHELEF Mohamed et ALLEG Karima, **Etude du comportement de la flamme d'Hydrogène dans des Canaux en utilisant une Approche CFD,** Mémoire de Master Université de Médéa, 2014.

[5] P. Hollmuller, J.-M. Joubert, B. Lachal et K. Yvon, **Les piles à combustible, état du développement** : PRINGENT. Editions Technip, 2002

[6] NAIL Mohamed, **Caractérisation des paramètres de stabilisation d'une flamme d'un bruleur industriel : Application aux fours de cimenteries,** Mémoire de Magistère Université de Chlef, 2012.

[7] Sabour djihad, **Simulation Numérique du Comportement d'une Flamme Non Pré-mélangée Méthane-Air dans un milieu confiné,** Mémoire de Master Université de Médéa, 2013.

[8] Benjamin Dessus, **Effet de serre : on oublie le méthane, in Alternative Économique**, 2010/4 (n° 290), Wikipédia-Méthane,

[9]J. T. Kiehlet Kevin E. Trenberth, « **Earth's Annual Global Mean Energy Budget** », *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 78, n° 2, février 1997, p. 197-208 (DOI 10.1175/2008BAMS2634.1.

[10]F.Suarez, J.Furne, J. Springfield et M Levitt, « **Insights intohumancolonic physique obtained from the study of flatus composition**), Am J physiology 1997

[11] Présentation du programme MARMESONET par IFREMER

[12] Température d'auto-inflammation du méthane dans l'air

[13] Biogaz issus de déchets alimentaires pour cogénération / CHP

[14] Interview d'Edith Labelle, de l'Institut de technologie des procédés chimiques et de l'environnement du CNRC par nrc-cnrc. 2010-05-19, consulté 2010/07/14

[15] Specht et al., **Storing bioenergy and renewable electricity in the natural gas grid**

[16] Documentation Help Ansys CFX version 14.

[17] D. Dovizio1, E. Giacomazzi2, C. Bruno1, A. Ingenito1, N. Arcidiacono2, (RANS **Study of Hydrogen-Air Turbulent Non-Premixed Flames)**

[18] ZHANG Xin, LI Jun-wei, ZHOU Zhao-qiu, YANG Fei, WANG Ning-fei , (**NUMERICAL STUDY ON LAM INAR NON-PREMIXED COMBUSTION OF N-HEPTANE AND AIR) ,**

[19] A. Benarous1*, A. Liazid, D. Karmed, **H2/O2 Combustion under Supercritical Conditions,**

[20] S. R. Razavi, S. Tabejamaat , **Numerical Simulation of Methane/Air Combustion with CO2 Dilution in A Gas Turbine Combustor ,** Iran University of Science and Technology- Feb. 2014