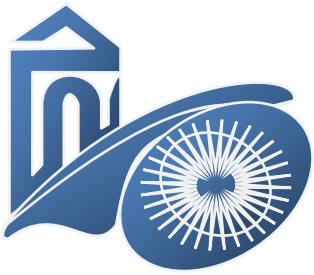
République Algérienne Démocratique et Populaire.
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Faculté **D**es **S**ciences et de la **T**echnologie
Département **G**énie de la **M**atière

MÉMOIRE DE MASTER

Pour obtenir le titre de Master en génie mécanique option Energétique et thermiques des systèmes

THÈME

Simulation Numérique du Comportement d'une Flamme Non–Prémélangée Méthane-Air dans un milieu confiné

Proposé et dirigé par :

Dr ALLICHE Mounir

Présenté par :

SABOUR Djihad

Promotion 2012-2013

Merci ....

Tout d'abord je remercie ALLAH qui m'a donné la volonté, la patience, le succès de bien mener ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à :

Ma mère et mon père pour tous les sacrifices qu'ils ont fait pour moi et pour l'amour qu'ils m'ont donné. C'est ainsi grâce à eux que j'ai pu atteindre mon but. J'espère pouvoir le leur rendre un jour. Je destine mes dédicaces aussi à mon cher frère et à mes chères sœurs.

Monsieur TEKDENTI d'accepter de présider mon jury de thèse. Je remercie également messieurs BOUKHLEF et GUEMANA, de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire.

Mon promoteur Mr. ALLICHE Mounir pour tout ce qu'il m'a appris, pour son humour. Je le remercie aussi pour sa disponibilité, pour sa gentillesse et pour son soutien.

Je remercie également Mr. REBHI Ridha Pour sa disponibilité, son aide précieux en rapport avec le logiciel utilisé, les problèmes d'installation souvent rencontrée ainsi que ses conseils judicieux.

Finalement, toute personne ayant participé de près où de loin dans l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A mes très chers parents,

Auxquels je dois ce que je suis. Que Dieu vous protège

A mes chères sœurs et mon cher frère Taha Pour leur amour et leur incontestable appui

A mes grands (es) pères et mères

A mes oncles et tantes surtout à mon cher Yacine que DIEU exauce vous souhait ; je le considéré comme mon grand frère.

A ma chérie Assia Pour tous les instants inoubliables que j'ai passés avec elle, je t'aime beaucoup.

A tout mes chèrs (es) amis (es) surtout : Mezora, Mimie, Amina, Houda , Hadjira, Baraa, meriem, Nana, Kaouthar, Nesrine, Mebarka, Djoudi, Hannane, Imane.

Djihad

Résumé

Ce travail présente une étude numérique d'une flamme turbulente non-prémélangée 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, pricipalement, 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.

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

Abstract

This work represents a numerical study of a non premixed turbulent flame at the output of a coaxial injector. The considered flow is a turbulent round jet of a fuel mixture « Methane/Air ».This flow is specified with density ratio as well as with the high speed of injection. Combustion is modeled by both of Eddy dissipation model « EDM »and K-ε turbulance model. Chemistry interaction turbulence is represented by PDF model «probability density function ». IT tool which is used in this study is the « ANSYS – CFX » calculation code.

A parametric study has been done. We've mainly examinated the impact of initial conditions about flame structure ; namely : methane injection speed, air injection speed and fuel inlet temperature.

Key words : Combustion, non-premixed turbulent flame, CFD, turbulent reactive flow.

Tables Des Matières

REMERCIEMENT i

DEDICACES ii

RESUME iii

TABLE DES MATIERES viii

LISTE DES FIGURES iv

NOMENCLATURE x

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : Généralités sur les flammes et combustion

I.1 Introduction 3

I.2 Généralités sur la combustion 3

I.3 Les Flammes 4

CHAPITRE II : Généralités sur le Méthane

II.1 Introduction 14

II.2 Recueil Historique 15

II.3 Formation, stockages naturels 16

II.4 Propriétés physico-chimiques 16

II.5 Utilisation 17

II.6 Biocarburant de troisième génération 18

II.7 Un gaz à effet de serre 18

II.8 Origine des émissions 21

II.9 Puits de méthane ……. 24

II.10 Réduire les émissions de méthane …….. 25

CHAPITRE III : Formulation Mathématique

III.1 Introduction ……. 26

III.2 Objectifs du travail …….. 26

III.3 Equations de la combustion gazeuse …….. 26

CHAPITRE VI : Présentation du code ANSYS CFX

IV.1 Approche CFD dans la simulation du problème de combustion …34

IV.1.1 Définition de la "CFD" …… 34

IV.1.2 Contexte historique …… 34

IV.1.3 Méthodologie ……..…35

IV.2 Présentation d'ANSYS CFX …… 35

CHAPITRE V : Résultats du calcul numérique

V.1 Modélisation de la chambre de combustion ……..46

V.1.1 Configuration expérimentale ……46

V.3 Propriétés des mélanges ……48

V.4 Résultats et discussions ……..48

V.4.1 Effet du maillage ……48

V.4.3 Effet de la vitesse du fuel (Méthane) ……..50

V.4.2 Champs de température ……. 51

V.4.4 Effet de la température d'entrée du fuel (Méthane) ……55

V.4.5 Effet de la vitesse de l'air …… **57**

V.4.6 Etude comparative ……..…..**59**

CONCLUSION GENERALE ……..… **61**

Liste Des Figures

Fig. (I.1) Triangle de feu **4**

Fig. (I.2) Différents régimes de flammes et applications **6**

Fig. (I.3) Schéma du principe de la flamme 1D prémélangée **7**

Fig. (I.4) Structure d'une flamme de diffusion **9**

Fig. (I.5) Stabilisation d'une flamme de diffusion sur la lèvre d'un Brûleur **9**

Fig. (I.6) Stabilisation d'une flamme de diffusion suspendue et apparition de la Flamme partiellement prémélangée **9**

Fig. (I.7) Représentation de flamme triple, résultats de calcul DNS **11**

Fig. (II.1) Combustion du méthane dans le dioxygène **14**

Fig. (II.2) Structure de la molécule de méthane **16**

Fig. (II.3) Augmentation du taux de méthane atmosphérique, en ppb ...**20**

Fig. (II.4) Taux de méthane à la limite supérieure de la troposphère..**20**

Fig. (II.5) Saisonnalité relevée par la NOAA **20**

Fig. (II.6) Analyse par montrant les concentrations de méthane (parties par million en volume) en surface (en haut) et dans la stratosphère (en bas) **22**

Fig. (V.1) Configuration expérimentale (Spadaccini et al 1976) **47**

Fig. (V.2) Effet de maillage sur le profil de vitesse axiale **49**

Fig. (V.10) Champs de température à v=0.5m/s à T=300 K **50**

Fig. (V.11) Champs de température à v=0.92m/s à T=300 K ……**50**

Fig. (V.12) Champs de température à v=1m/s à T=300 K ……**50**

Fig. (V.13) Champs de température à v=2 m/s à T=300 K ……**50**

Fig. (V.14) L'effet de la vitesse d'entrée (méthane) suivant l'axe Y……**51**

Fig. (V.3) Champs de température [k] ……**52**

Fig. (V.4) Profile radiale de Température dans différentes sections Y dans le champ d'écoulement ……**52**

Fig. (V.5) Fraction molaire de CH4 dans différentes sections Y dans le champ d'écoulement ……**53**

Fig. (V.6) Fraction molaire de CO2 dans différentes Sections Y dans le champ d'écoulement ……**53**

Fig. (V.7) Fraction molaire de N2 dans différentes sections Y dans le champ d'écoulement ……**53**

Fig. (V.8) Fraction molaire de H2O dans différentes Sections Y dans le champ d'écoulement ……**54**

Fig. (V.9) Fraction molaire de O2 dans différentes sections Y dans le champ d'écoulement ……**54**

Fig. (V.15) Champs de température à v=0.92m/s à T=100K ……**55**

Fig. (V.16) Champs de température à v=0.92m/s à T=200K ……**55**

Fig. (V.17) Champs de température à v=0.92m/s à T=300K ……**55**

Fig. (V.18) Champs de température à v=0.92m/s à T=400K ……**55**

Fig. (V.19) L'effet de la température d'entré (fuel) suivant l'axe Y …**56**

Fig. (V.20) Champs de température à V=5m/s à T=750K ……**57**

Fig. (V.21) Champs de température à V=10m/s à T=750K ……**57**

Fig. (V.22) Champs de température à V=30m/s à T=750K ……**57**

Fig. (V.23) Champs de température à V=20m/s à T=750K ……**57**

Fig. (V.24) Hauteurs de la flamme pour différentes de température….**58**

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]
$l\delta$	Epaisseur de la couche interne de la flamme	[m]
lf	Epaisseur de la flamme laminaire	[m]
$lfspa$	Epaisseur de la flamme laminaire (Spalding)	[m]
L_{fzel}	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)]

Re_t	Nombre de Reynolds de la turbulence	[--]
S	Rapport stœchiométrique	[--]
S_L	Vitesse de la flamme laminaire	[m/s]
S_c	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	[--]

Introduction générale

La combustion est l'un des procédés les plus importants dans la transformation de l'énergie ; elle permet de convertir l'énergie chimique contenue dans les combustibles en chaleur. En effet, la combustion est nécessaire pour le transport, la génération d'énergie électrique, les procédés de fabrication, les moyens de chauffage,…

Malgré ces bienfaits de la combustion, elle reste le plus grand pollueur de notre planète. En plus de la chaleur, la combustion produit des émissions nocives pour l'environnement. Cette pollution résulte principalement des gaz et particules jetés dans l'air par les véhicules à moteur, les installations de chauffage, les centrales thermiques et les installations industrielles. Les émissions polluantes sont les oxydes de carbone, de soufre et d'azote, gaz à effet de serre, poussières, particules radioactives, produits chimiques, dioxygène, etc.

Les lois restrictives sur les émissions nocives ont motivés la recherche de nouvelles ressources d'énergies propres et renouvelables ; les plus importantes sont l'énergie solaire et celle du vent. D'autres alternatives moins coûteuses et plus fiables ont fait leurs apparitions, on cite par exemple l'amélioration des systèmes de combustion actuels et l'utilisation des combustibles propres d'origine renouvelable telle que le méthane et l'hydrogène.

Ces alternatives sont nécessaires comme une étape transitoire vers les énergies propres. Ainsi, plusieurs travaux se sont concentrés sur ces sujets.

Dans ces travaux, 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 prémélange) 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 prémélangé EDM : Eddy Dissipation Model

Pour ce faire, on a divisé le mémoire en cinq chapitres :

- Le premier chapitre présentera les notions sur les combustions et les flammes.
- Le deuxième chapitre présentera les propriétés et caractéristiques du méthane
- Le troisième chapitre présentera la formulation mathématique du problème étudié.
- Le quatrième chapitre donnera une présentation générale du code CFX.
- Le dernier chapitre est consacré au calcul numérique et à la discussion des résultats.

I.1 Introduction

L'étude de la combustion turbulente passe par la connaissance d'un bon nombre de généralités ;nous présenterons les bases théoriques et les différentes approches phénoménologiques des mécanismes physiques mis en jeu dans la combustion turbulente. Nous avons choisi de prendre en compte le caractère turbulent des écoulements en utilisant une approche statistique. Nous présentons les équations de l'aérothermochimie puis les différents modèles de combustion.

I.2 Généralités sur la combustion

L'interaction entre un processus chimique de combustion et la "turbulence" joue un rôle très importantdans 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 turbinesà gaz. L'étude de ces écoulements turbulents de gaz réactifs a conduit à l'introduction de différentesgrandeurs caractéristiques de ces phénomènes physiques. Ces quantités sont issues de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et de la chimie. L'objectif de cette première section est de rappeler les phénomènes physiques mis en jeu et les équations décrivant l'évolution des grandeurs caractéristiques. La résolution de ces équations qui représentent les différents phénomènes physiques et mécaniques et leurs interactions, doit permettre de prédire la structure et l'évolution des écoulements turbulents réactifs.

Compte tenu de la complexité de ces équations et des outils mathématiques,la résolution analytique de ces équations est limitée à des cas très simples.Dans la plupart des configurations, des méthodes numériques de résolution approchées sont alors nécessaires. Toutefois, la résolution directe, sans hypothèses simplificatrices, des équations nécessite une puissance des machines de calcul très importante car les phénomènes physiques étudiés font intervenir un nombre important de variables et un large spectre d'échelles caractéristiques, partant des échelles de la géométrie de la chambre de combustion jusqu'à celles relevant des effets de la cinétique chimique. La puissance de calcul des machines actuelles n'est pas toujours suffisante pour simuler de façon directe des configurations réelles (Wang et *al.* 2007) [1]. Une solution à ce problème consiste à filtrer une partie de la dynamique des phénomènes physiques mis en jeu. Les grandeurs caractéristiques à calculer sont alors des quantités filtrées ou moyennées et l'écriture des équations décrivant leur évolution fait apparaître des termes inconnus qui doivent être modélisés.**[1]**

I.2.1 Définition de la combustion :

La combustion est une réaction exothermique complexe entre un combustible et un comburant (air, oxygène pur, …). Le combustible est oxydé avec en général un dégagement de chaleur et de lumière.

Trois facteurs doivent être réunis pour que la combustion puisse avoir lieu : un combustible, un comburant et de l'énergie. On définit ainsi classiquement le triangle du feu :

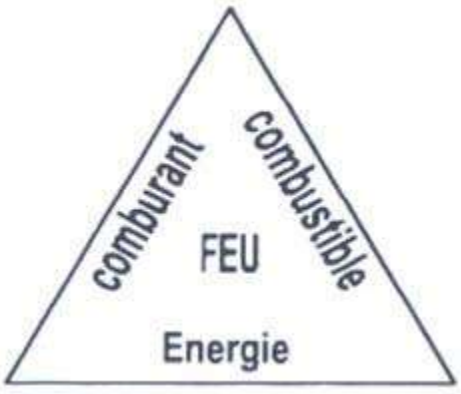


Fig. (I.1) : Triangle de feu

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**. [2]**

I.3 Les Flamme :

1.3.1 Définition :

Physiquement, une flamme est un gaz en feu ;c'est-à-dire un gaz subissant une combustion, ou, encore plus précisément, la région de l'espace où ce gaz subit une combustion. Il s'agit de la transformation fortement exothermique par laquelle un composant organique (composé, entre autres, de carbone et d'hydrogène) se combine avec l'oxygène de l'air pour donner du dioxyde de carbone et de l'eau.

Cette réaction n'a lieu que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant et de l'énergie pour activer la transformation. L'énergie d'activation est souvent la chaleur, produite par une autre flamme (propagation), un câble qui chauffe, un frottement, ou une simple étincelle (pierre de briquet, allume gaz…).

Dans le cas d'un liquide, on peut définir le point d'inflammation, température à laquelle le liquide se vaporise suffisamment pour former avec l'air un mélange inflammable et dont la combustion ne s'entretiendra pas d'elle-même tant que carburant et comburant seront présents en quantité suffisante.

I.3.2 Eteindre une flamme :

La méthode la plus habituelle est de souffler cette flamme. Cet entrainement par l'air éloigne la flamme de la source de carburant, et provoque une dilution autour de la flamme, l'empêchant ainsi de se propager. Cependant, dans le cas d'une bougie, cette méthode n'arrête pas la vaporisation de la stéarine

puisque la mèche reste chaude, c'est pour cela que l'on coupait l'extrémité de la mèche pour éviter que la bougie ne fume (mouchage).

A plus grande échelle, les pompiers utilisent parfois des explosifs pour tenter de souffler une flamme confinée. Prenons ensuite le cas de l'eau. Sa vaporisation est endothermique. Autrement dit, lorsqu'elle se vaporise, elle absorbe beaucoup d'énergie. De plus, elle occupe à l'état gazeux un volume beaucoup plus grand qu'à l'état liquide, ce qui a tendance à chasser l'air. Autrement dit, l'eau étouffe la flamme et refroidit l'espace, et c'est cette combinaison qui permet d'éteindre certains feux.

Une autre méthode serait d'empêcher les vapeurs de carburant de se diffuser. C'est le cas des extincteurs à mousse et à poudre, très efficaces sur les feux de liquides. L'énergie produite est émise sous forme de rayonnements, donc d'ondes électromagnétiques, et si la plupart de ces émissions se font dans l'infrarouge, certaines se font dans le spectre visible. C'est le principe de l'incandescence. La couleur de la flamme dépend de la température de celle-ci, ainsi que de sa composition**. [3]**

I.3.3 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 lecombustible, ce qui donne une combustion complète et moins d'imbrûlés.

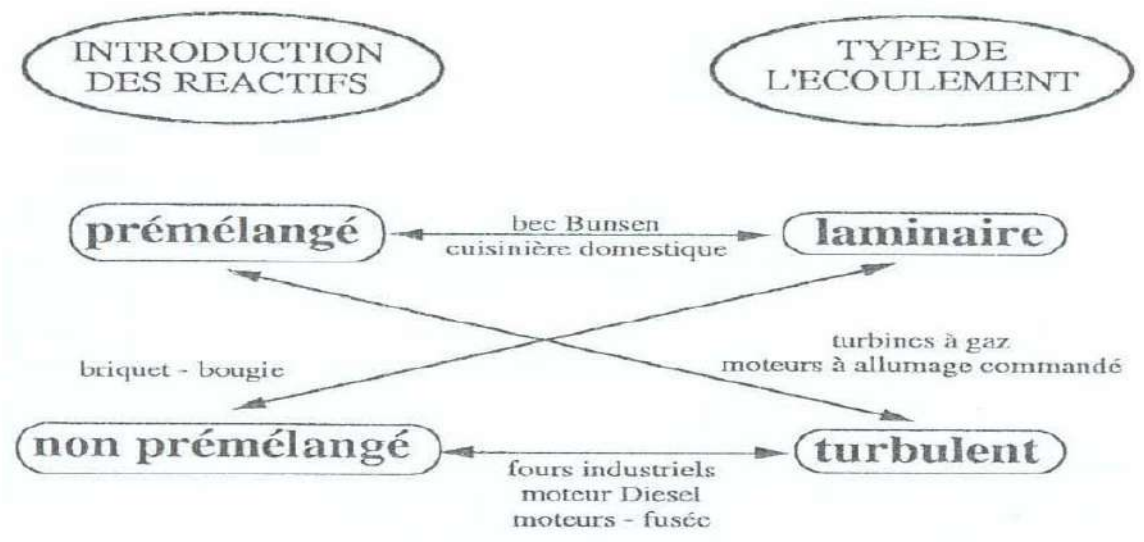
Ce mode de combustion favorise cependant l'apparition des instabilités, par exemple : « le décrochage », « le soufflage » et même « l'extinction » de la flamme.

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'éviterson extinction.**[4]**

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 dumélange des réactifs. Les scénarios régissant la stabilisation des flammes ne sont pas encorebien identifiés à ce jour.

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



Fig(I.2): Différents régimes de flammes et applications.

I.3.4 Flammes prémélangées

Dans le cas de la flamme prémélangée, comme le montre la figure **(I.3)**, carburant et oxydantsont mélangés initialement avant la zone de réaction et la combustion a lieu lorsque ces réactifsatteignent une température suffisante dite température d'auto-inflammation.

Ces flammes ont la capacité de se propager dans l'espace des gaz frais. La vitesse de flammelaminaire (notée S_L) caractérise ce déplacement. En effet, la zone de flamme en cours de combustionfournit de la chaleur aux gaz frais voisins permettant ainsi leur inflammation. L'étudede ces caractéristiques propagatrices du front de flamme présente un intérêt particulier dans lecadre d'une étude de stabilité, puisque l'aptitude de la flamme à se propager avec une vitesseplus ou moins importante est un des mécanismes mis en jeu dans le processus de stabilisation.

Le mode prémélangé est souvent utilisé en régime pauvre (le carburant est en quantité inférieure aux conditions stœchiométriques) permettant de réduire la production d'oxyde d'azote.

En contrepartie, les flammes obtenues sont souvent difficiles à maîtriser (instabilités). De plus, dans un contexte industriel, la question du stockage d'un mélange air/carburant dans la gamme de flammabilité, qui est essentielle pour ce régime de combustion, n'est pas envisageable.

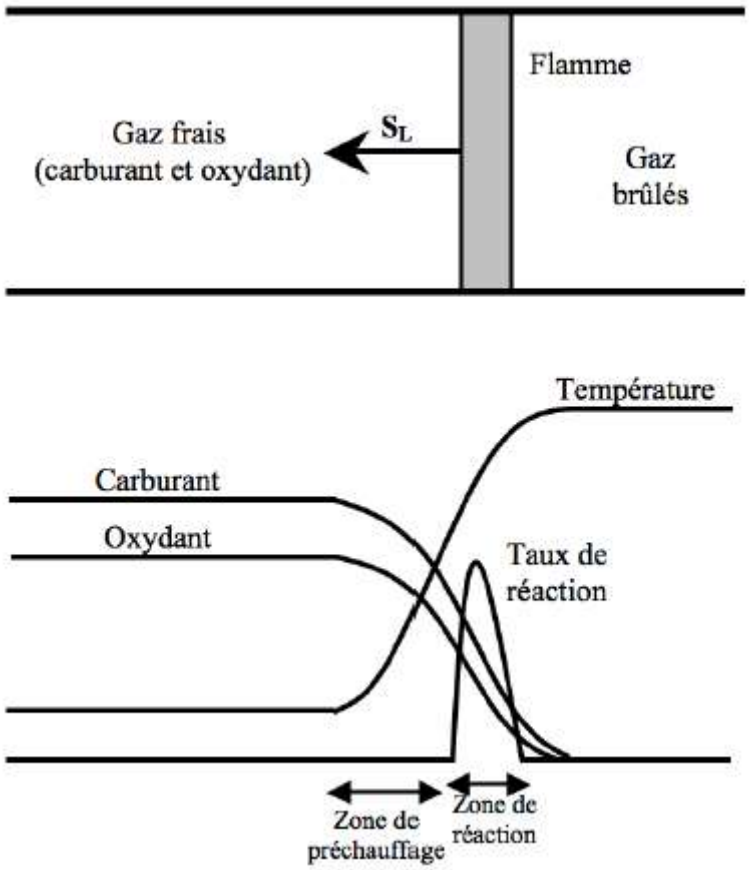


Fig.(I.3)Schéma du principe de la flamme prémélangée (1D)

Pour décrire les flammes prémélangées, on fait souvent appel à la variable de progrès (notée*c*). Celle-ci peut être définie à l'aide de grandeurs comme la température, *T*, ou bien certainesfractions massiques d'espèces, *Y*. En utilisant les indices *u* et *b* pour caractériser, respectivement,les zones de gaz frais et de gaz brûlés, on peut écrire :

$$C = \frac{T - T_u}{T_b - T_u} \qquad (1.1)$$

On pourra ainsi définir une variable d'avancement, Y_c, qui sera abordée dans la suite du manuscrit dans un contexte de chimie tabulée.

Un autre paramètre incontournable pour décrire une flamme prémélangée est sa richesse ;elle présente une grandeur fondamentale influant notamment sur les vitesses et les épaisseurs caractéristiques des flammes. La richesse d'une flamme est égale à l'unité dans un mélangestœchiométrique, supérieure à 1 en mélange riche en carburant et inférieure à 1 dans les flammes dites pauvres. Elle est définie ainsi

$$\phi = \frac{sY_{F,0}}{Y_{O,0}} \qquad (1.2)$$

où $Y_{F,0}$et $Y_{O,0}$ sont les fractions massiques de fuel et d'oxydant initiales, tandis que s est lerapport de mélange stœchiométrique caractérisant la réaction globale de combustion : $v_F F + v_0 O \rightarrow$Produits; il est défini comme suit : $\boldsymbol{s = \frac{v_0 W_0}{v_F W_F}}$avec $v_F$et $v_O$les coefficients molaires stoechiométriques, W_F et W_O les masses molaires.

En effet, on parle de stabilisation de flamme en milieu prémélangé, lorsque le flux de gaz frais s'écoulant dans une direction opposée à la propagation de l'onde de combustion a une vitesse égale à la vitesse de propagation dela flamme **[5]**.La flamme devient alors stationnaire relativement au brûleur. Pour schématiser,on peut dire que la flamme est maintenue stable si sa vitesse de propagation est localementéquivalente à la vitesse de l'écoulement. Etant donné que la richesse est un paramètre fondamentalpour contrôler la vitesse de propagation du front de flamme, sa valeur influence doncnaturellement la stabilité des flammes. De même, la courbure et l'étirement, qui sont des paramètresinfluençant la structure du front de flamme et donc sa vitesse de propagation, jouentun rôle important dans le mécanisme de stabilisation.

I.3.5 : Flammes de diffusion

La flamme de diffusion, appelée aussi flamme non-prémélangée, se forme lorsque l'oxydantet le carburant sont introduits séparément comme illustré sur la **figure (I.4)**

Une configurationsimple de telles flammes est celle où seul le combustible est issu d'un injecteur ; le comburantnécessaire à la réaction est alors fourni par l'air ambiant.

Ces flammes ne bénéficient d'aucun mécanisme d'auto-propagation, puisqu'elles ne peuventexister que dans la zone où le combustible et le comburant coexistent en proportions équivalentes.

Ce mode de combustion, qui est plus facile à maîtriser, a le désavantage de former plusde polluants, à cause des hautes températures atteintes dans le front de flamme.

Les flammes de ce régime de combustion sont essentiellement contrôlées par l'intensité dumélange qui est à son tour contrôlée par la diffusion. L'étude de la structure interne de ce typede flammes implique donc la caractérisation du mélange. Dans ce contexte, il est primordial d'introduire la notion de la fraction de mélange (notée Z) : c'est un scalaire passif, qui évolue entre 0 et 1 selon que l'on se situe dans l'écoulement d'air ou de carburant pur, correspondant à la définition suivante :

$$\boldsymbol{Z = \frac{\phi \frac{Y_F}{Y_{F,0}} - \frac{Y_O}{Y_{O,0}} + 1}{\phi + 1}} \qquad \textbf{(1.3)}$$

où $Y_{F,0}$et $Y_{O,0}$ sont les fractions massiques de fuel et d'oxydant dans les flux initiaux, tandis que Y_F et Y_O sont les fractions massiques locales. La fraction de mélange à la stœchiométrie, équivalente à la richesse : ϕ= 1, est définie par :

$$Z_{st} = \frac{Y_{O,0}}{Y_{O,0}+sY_{F,0}} \qquad (1.4)$$

De manière analogue à la richesse, quand Z <Z_{st}, on se situe du côté pauvre ; et du côté riche lorsque $Z > Z_{st}$. En réalité, la combustion ne se produit pas uniquement à la stœchiométrie mais aussi dans la zone d'inflammabilité de part et d'autre (pauvre et riche).

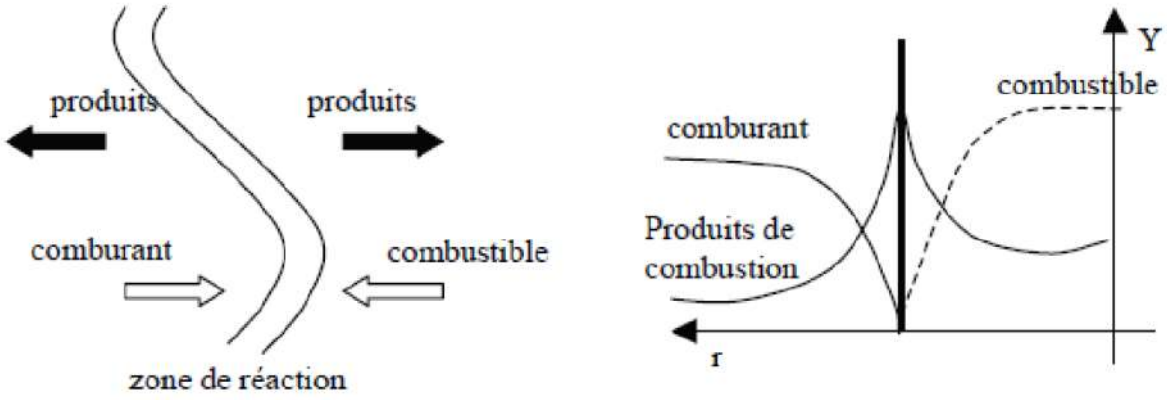
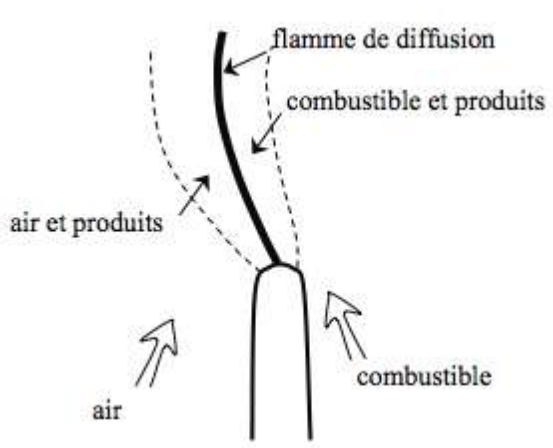


Fig. (I.4)Structure d'une flamme de diffusion.

La flamme de diffusion s'accroche au brûleur, comme le montre la figure**(I.5)**, si les échangesthermiques avec la flamme permettent à la lèvre du brûleur de rester suffisamment chaude.Cependant, une augmentation de la vitesse du jet de combustible peut conduire au décrochageou l'extinction par diminution de la température de la lèvre du brûleur. En effet, le comportement des flammes suspendues dépend essentiellement de la vitesse du jet. Par exemple, selon Kalghatgi**[5],** l'évolution de la hauteur moyenne de flamme est quasi-linéaire en fonction de la vitesse de sortie des gaz quelle que soit la nature du gaz.



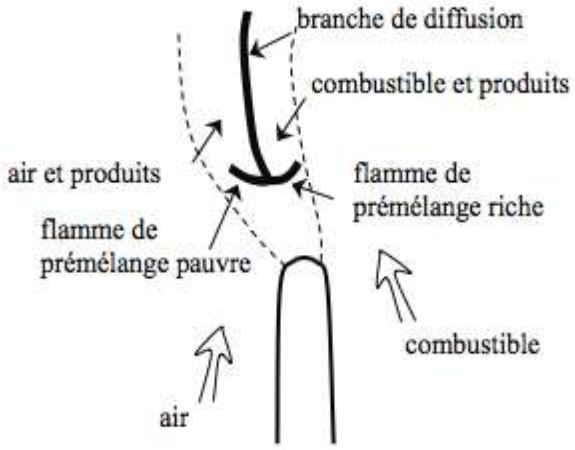


Fig. (I.5)Stabilisation d'une flamme de diffusion sur la lèvre d'un brûleur.[6]

Fig.(I.6)Stabilisation d'une flamme de Diffusion suspendue et apparition de la Flamme partiellement prémélangée.[6]

Donc, à partir d'une flamme de diffusion accrochée au brûleur, lorsque l'on augmente lavitesse jusqu'à une certaine valeur critique dite « vitesse de décrochage », la flamme se décroche de l'injecteur et se place en aval à une hauteur où les conditions locales d'écoulement et de richesse lui permettent de se stabiliser. La figure (**I.6)**montre la structure générale d'une flamme suspendue et stabilisée. Si la vitesse devient très importante, la flamme se souffle. A l'inverse, lorsque l'on diminue la vitesse débitante jusqu'à une valeur appelée « vitesse de raccrochage », la hauteur diminue jusqu'à ce que la flamme se raccroche à l'injecteur. Il convient de noter que la vitesse limite de raccrochage est plus faible que la vitesse de décrochage. C'est le phénomène d'hystérésis.

À des hauteurs de suspension importantes, la flamme devient très instable. La hauteur de suspension de la flamme, appelée aussi hauteur d'accrochage ou hauteur de stabilisation, qui est la distance entre la sortie de l'injecteur et la base de la flamme, est donc un paramètre important pour étudier la stabilité des flammes.

Lorsque la flamme est décrochée et stabilisée, des zones de combustion de prémélange et de diffusion coexistent introduisant un autre mode de combustion appelé partiellement prémélangée.

I.3.6 Flammes partiellement prémélangées

La combustion partiellement prémélangée est un mode de combustion intermédiaire retrouvéfréquemment dans les applications industrielles. Il est établi lorsque les deux régimes canoniques(prémélange et diffusion) de combustion coexistent. En réalité, les caractéristiques propres àces deux régimes, c'est-à-dire soit un mélange parfait soit une absence totale de mélange, sont trop restrictives pour s'appliquer à la majorité des flammes rencontrées dans les laboratoires ou les installations industrielles.

Dans de nombreuses configurations de flamme de diffusion, une zone de mélange peut avoir lieu avant la zone de réaction **[7].**Dans ces conditions, il s'agit de combustion partiellement prémélangée. Cette dernière peut être également présente dans des configurations initialement de prémélange **[8]**. En effet, lorsque le mélange initial des réactifs est riche, une seconde zone de combustion de nature non prémélangée peut entourer la zone de combustion prémélangée. Dans ce cas, la présence simultanée des deux régimes classiques de flammes est favorable.

La base de la flamme de diffusion suspendue présente une région à caractère propagatif se caractérisant par une réactivité plus importante que les autres régions de la flamme **[9].** Cette partie propagative de la flamme se stabilise en équilibre avec la vitesse locale de l'écoulement et adapte sa structure en fonction de l'écoulement **[10].** Les caractéristiques dynamiques du mélange dans cette zone

sont donc mises en avant pour étudier la stabilisation des flammes décrochées partiellement prémélangées.

Les flammes partiellement prémélangées sont souvent abordées selon le terme de « flamme triple ».

Ce terme provient de sa structure spatiale caractéristique qui est composée de deux branches prémélangées (l'une riche, l'autre pauvre) et une branche de diffusion de queue. Une représentation classique (figure **I.7**) est fournie par Ruetsch et al. **[7].**

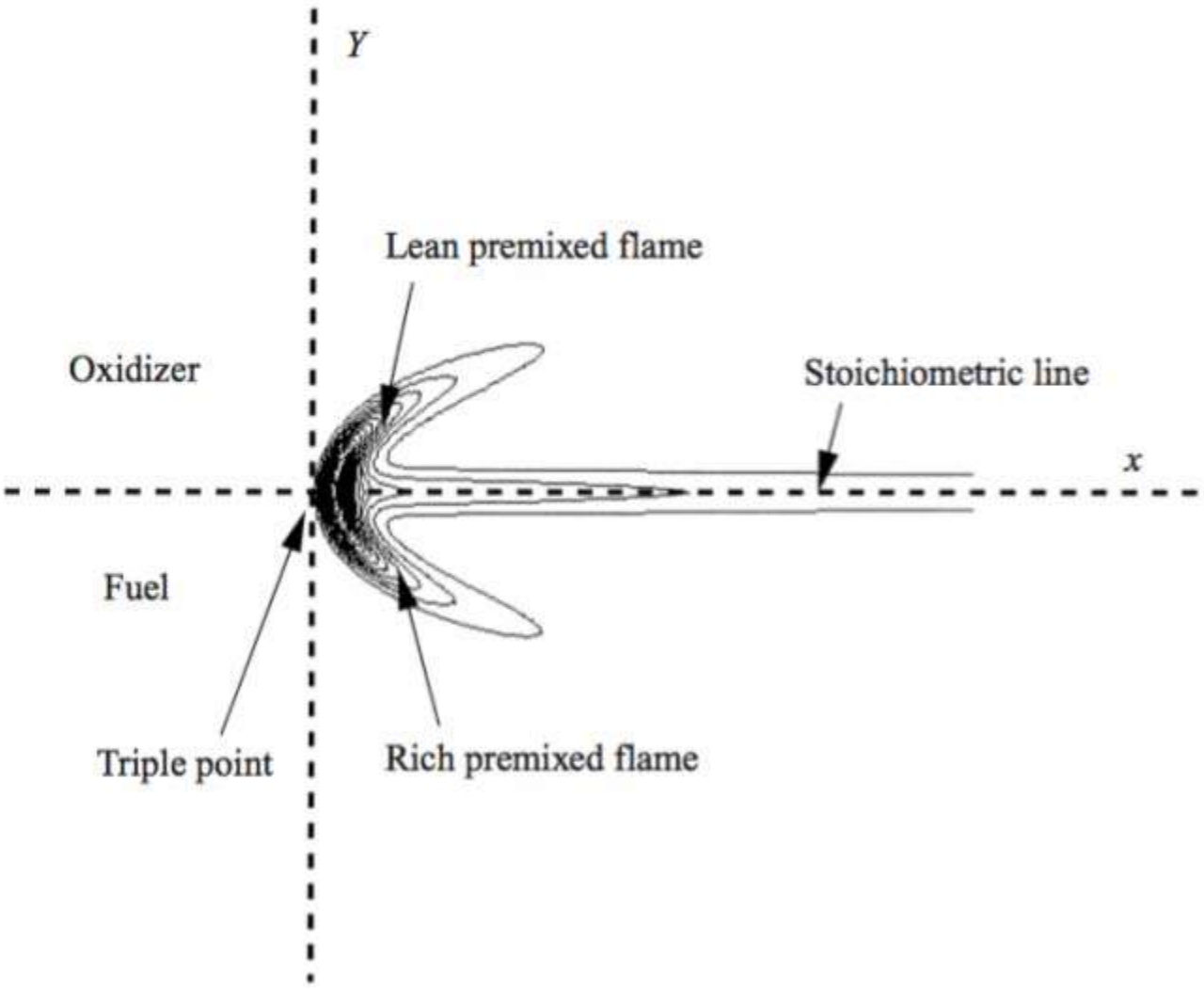


Fig.(I.7)Représentation de flamme triple, résultats de calcul DNS

Cette structure de flamme triple joue un rôle capital dans la propagation et la stabilisation des flammes non-prémélangées. Sa caractérisation peut donc être une première étape pour la compréhension du mécanisme de stabilité des flammes partiellement prémélangées. L'importance des flammes triples pour étudier les mécanismes de stabilité des flammes, notamment dans des problématiques de vitesse de propagation et d'accrochage de flamme, a été largement mise en évidence dans la littérature **[12].** Selon

plusieurs études**[13]**, la base de la flamme triple (le point triple) se propage le long de la ligne stœchiométrique ; la flamme suspendue devrait donc se stabiliser lorsque la vitesse d'écoulement est proche de la vitesse de propagation d'un prémélange stœchiométrique**[14].**

II.1- Introduction

Le **méthane** est un composé chimique de formule chimique CH_4. Il a été découvert et isolé par 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. La combustion du méthane dans le dioxygène pur produit du dioxyde de carbone CO_2 et de l'eau H_2O avec une importante libération d'énergie :

$$CH_4 + 2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O : \Delta H = -891\ kJ{\cdot}mol. \qquad (2.1)$$

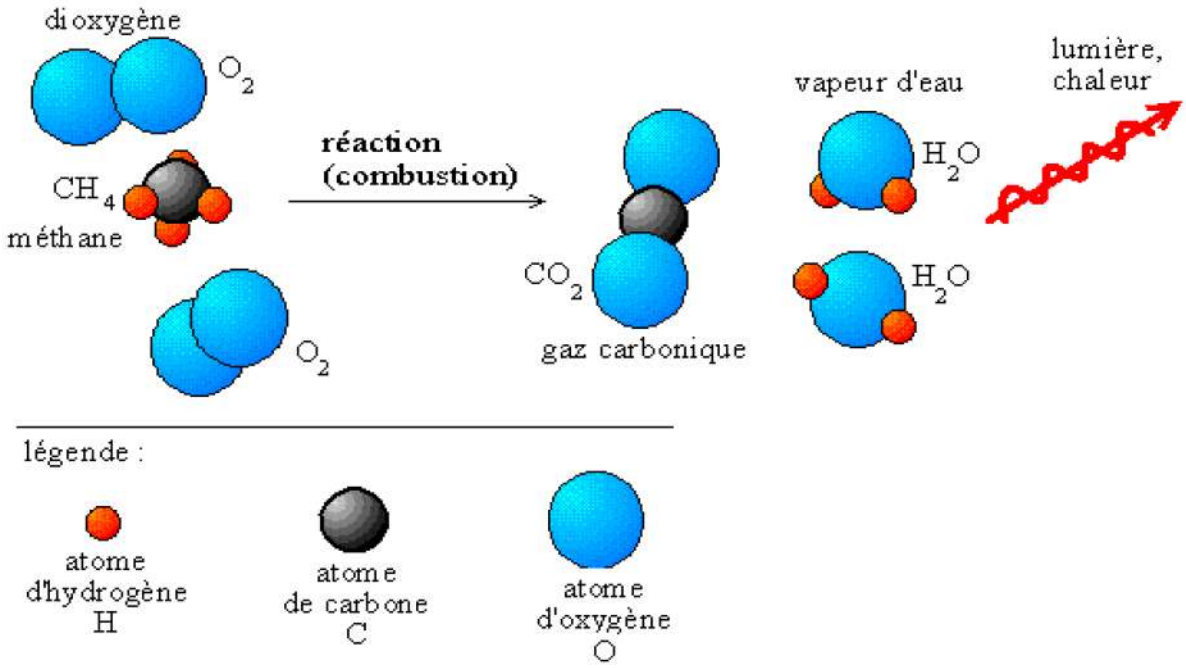


Fig. (II.1) : Combustion du méthane dans le dioxygène **[15]**

Il se présente à l'état gazeux aux conditions normales de température et de pression. Il peut être transporté sous forme gazeuse, généralement par gazoduc, ou à l'état liquéfié par méthaniers, plus rarement par camions.

Les archées dites *méthanogènes* produisent de façon anaérobie pratiquement tout le méthane gardé dans les terrains sédimentaires. Le méthane produit par la

réaction de serpentinisation entre les péridotites et l'eau de mer dans les dorsales océaniques s'échappe normalement et est oxydé dans l'atmosphère.

D'énormes quantités de méthane sont enfouies dans le sous-sol sous forme de gaz naturel. De grandes quantités, difficiles à évaluer, sont également présentes sur le plancher océanique sous forme d'hydrates de méthane, stables à basse température et haute pression. . Les volcans de boue, les décharges publiques et la digestion du bétail, notamment des ruminants dégagent du méthane.

Le méthane est naturellement présent dans l'atmosphère terrestre à des concentrations très faibles, de l'ordre de1,75 ppm (précisément de 1 748 ppb en 1998). Sa concentration tend à se stabiliser un peu au-dessus de cette valeur, après avoir connu une forte augmentation au cours des dernières décennies. Le méthane a en effet une durée de vie assez brève moins de dix ans dans l'atmosphère, où il est détruit par des radicaux hydroxyle OH.

C'est un gaz à effet de serre considérablement plus puissant que le CO_2, responsable, au niveau actuel de sa concentration, de quelques pourcents 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).**[16]**

II.2- Recueil Historique

Alessandro Volta découvre le méthane en 1776 en étudiant le « gaz inflammable des marais ». C'est à cause du grisou, responsable (encore de nos jours) de nombreuses catastrophes minières, que furent mises au point les lampes de sûreté dans les mines de charbon, et notamment la lampe de Davy.

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. Ce n'est qu'avec l'exploration spatiale que l'on a découvert l'omniprésence de ce corps dans l'Univers. **[17]**

2.3- Formation, stockages naturels

C'est le principal constituant du biogaz issu de la fermentation de matières organiques animales ou végétales en l'absence d'oxygène. Il est fabriqué par des archées méthanogènes qui vivent dans des milieux anaérobies c'est-à-dire sans oxygène. **[18]**

Le méthane est ainsi 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…

Le méthane se dégage naturellement des zones humides peu oxygénées comme les marais et certains sols longuement inondés. Des quantités importantes de méthane sont piégées sous forme d'hydrates de méthane au fond des océans (où leur exploitation est envisagée) et dans les pergélisols. Ces deux réservoirs pourraient jouer un rôle important dans les cycles climatiques.**[19]**

2.4- Propriétés physico-chimiques [20]

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.

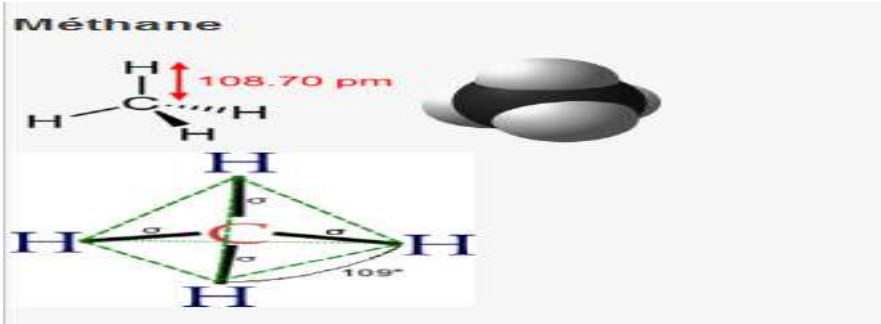


Fig. (II.2) Structure de la molécule de méthane

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.

La réaction de combustion du méthane s'écrit :

$$CH_4 + 2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O.$$

(2.2)

- La combustion d'1 m de méthane à 15 °C (gaz naturel) libère une énergie de 9,89 kWh (35,6 MJ).
- 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 de gaz liquide par réservoir. Un méthanier comportant plusieurs réservoirs, sa cargaison peut actuellement atteindre154 000 m de GNL, Gaz Naturel Liquéfié. Les futurs méthaniers pourront transporter jusqu'à 260 000 m de GNL. Le volume du méthane à l'état gazeux est égal à 600 fois son volume à l'état liquide, à pression atmosphérique.
- 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.

2.5- 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.

Le méthane « biologique » ou biogénique, ou biogaz, qui est produit 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. Pour l'instant, seules quelques expériences isolées (dans des fermes, des déchèteries…) ont vu le jour, spécialement dans les régions les plus froides (nord de l'Allemagne, de la

France, Scandinavie…), mais la rentabilité économique de ces installations est loin d'être acquise. (voir l'expérience en prison rwandaise).

Le 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 carbène (composé très réactif) a été introduit dans une liaison du méthane via un catalyseur organométallique. **[21]**

2.6- 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.**[22]**

2.7- Un gaz à effet de serre

Le méthane est un gaz à effet de serre qui influe sur le climat, pris en compte en tant que tel par la directive 2003/87/CE. Il absorbe une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre, et l'empêche ainsi de s'échapper vers l'espace. Ce phénomène contribue au réchauffement de la Terre**. [23]**

De plus, il contribue aussi indirectement à l'effet de serre en diminuant la capacité de l'atmosphère à oxyder d'autres gaz à effet de serre (comme les fréons). Son utilisation comme combustible émet du CO_2 à hauteur de 380 Mt/an (les émissions industrielles avoisinent 6 000 Mt/an).

L'influence du méthane sur le climat est moins importante que celle du dioxyde de carbone mais elle est quand même préoccupante. Une molécule de méthane absorbe en moyenne 23 fois plus de rayonnement qu'une molécule

de dioxyde de carbone sur une période de 100 ans, son potentiel de réchauffement global (PRG) est donc de 23 ; à échéance 20 ans, son PRG est même de 62. Le méthane est considéré comme le 3 gaz responsable du dérèglement climatique, après le CO_2 et les fréons).

Méthane et ozone

Le méthane interagit avec l'ozone, différemment dans les hautes et les basses couches de l'atmosphère. Selon les modélisations tridimensionnelles disponibles en chimie de la troposphère, diminuer les émissions anthropiques de CH_4 pourrait être « un puissant levier pour réduire à la fois le réchauffement climatique et la pollution de l'air par l'ozone de fond troposphérique ». **[24]**

Variations récentes de teneur de l'air

Le taux de méthane actuel dans l'atmosphère terrestre est d'environ 1 800 ppb, soit 0,00018 %. Il s'est maintenu entre 1780 et 1810 ppb de 2000 à 2010 avec une grande variation suivant la latitude.

Dans le passé, le taux de méthane dans l'atmosphère a varié souvent parallèlement à la température. Ce taux a augmenté d'environ 150 % depuis 1750 et atteint aujourd'hui un taux inégalé dans l'histoire, principalement en raison des activités humaines. Une augmentation des teneurs a été constatée en 2008/2009. Les modélisations informatiques de la cinétique du CH_4 dans l'air ont permis de remonter à la source des émissions pour les 20 dernières années de mesures atmosphériques. Selon ces travaux, la réduction des émissions et/ou une utilisation plus efficace du gaz naturel dans l'hémisphère Nord (amélioration de l'étanchéité des tuyaux de gaz, récupération du grisou ou du gaz de décharge pour produire de l'électricité..) ont permis une baisse des émissions dans les années 1990, mais une nette augmentation des émissions provenant de combustibles fossiles dans le nord de l'Asie a ensuite de nouveau été constatée (2006…) **[25].**

Le méthane serait responsable d'environ 20 % du réchauffement moyen enregistré depuis le début de la révolution industrielle. On estime que sans sa présence, la température moyenne de surface de la Terre serait plus basse de 1,3 °C.

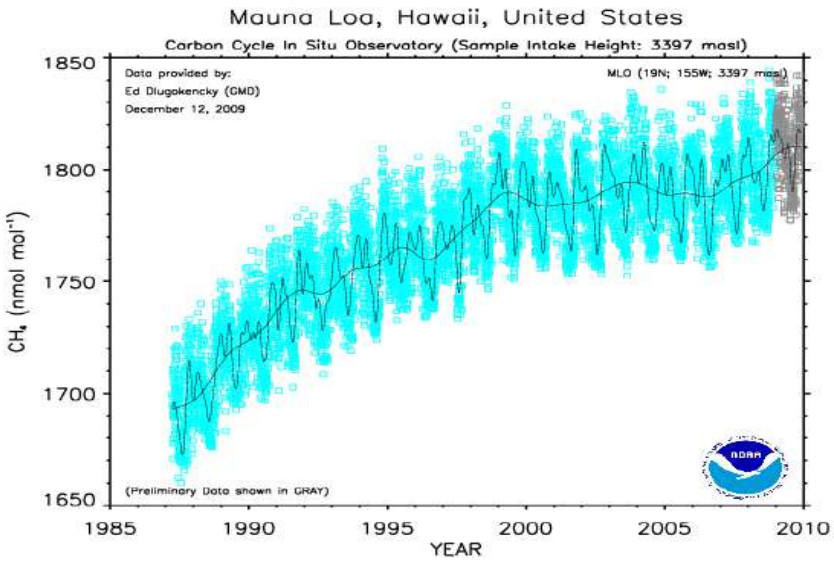


Fig. (II.3) Augmentation du taux de méthane atmosphérique, en ppb **[26]**

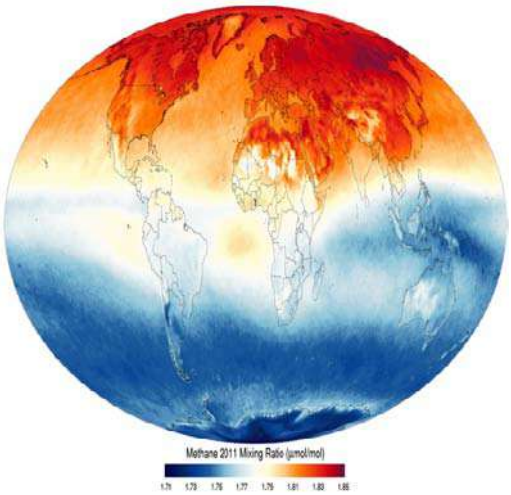


Fig. (II.4) Taux de méthane à la limite supérieure de la troposphère

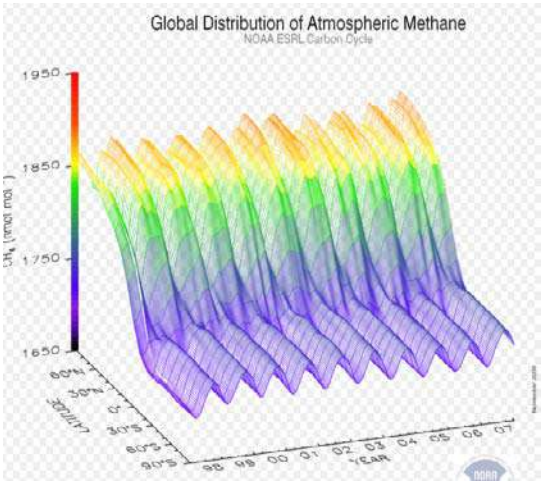


Fig. (II.5) Saisonnalité relevée par la **NOAA**

2.8- Origine des émissions

Globalement, les émissions de méthane vers l'atmosphère sont estimées à 500 Mt/an, dont les trois quarts d'origine anthropique. Les principales sources (par ordre d'importance quantitative estimée) sont :

- ***La fermentation anaérobie sous l'eau : 32 % des émissions.***

Elles ont surtout lieu dans les zones humides (naturelles ou artificielles avec en particulier les rizières et barrages hydroélectriques qui ont inondé des forêts ou accumulé une importante charge organique. Il peut aussi s'agir d'estuaires devenus dystrophes ou de n'importe quelle zone d'accumulation de pollution organique, décharge par exemple). Les marais, les mangroves tropicales et les rizières sont sujets à l'action de bactéries méthanogènes en milieu anaérobie. La température agit sur les émissions, qui atteignent leur valeur maximale entre 37 °C et 48 °C, d'où une amplification des émissions en cas de réchauffement. En présence d'une quantité suffisante d'oxygène, l'activité bactérienne elle-même contribue à échauffer le matériau, mais avec émission de CO_2. L'analyse des gaz piégés il y a 10 000 ans dans les glaces polaires et l'étude du rapport isotopique carbone 13/carbone 12 du carbone de ces molécules de méthane ($\delta^{13}CH_4$) ont montré un doublement des taux de CH_4 lors de la dernière transition glaciaire-interglaciaire. Ce doublement est dû, à près de 50 %, aux régions marécageuses tropicales, renforcées par les émissions des tourbières boréales favorisées par la transition climatique.

- ***Les énergies fossiles : 21 % des émissions.***

Le gaz naturel est composé à 90 % de méthane. Les fuites dans l'atmosphère lors de son extraction, de son transport, de son traitement et de sa distribution pourraient représenter jusqu'à 2 % de la production de gaz naturel, les 3/4 de ces fuites ayant lieu chez le client, après le compteur. Le graphe ci-contre montre également l'importance des pertes lors de la production : on distingue clairement certains champs gaziers de grande taille, entre autres la mer Caspienne et la Sibérie. De même, le gaz piégé dans les filons de charbon lors de sa formation (le grisou) est relâché lors de l'extraction du minerai. Si l'on ne veut pas réduire l'utilisation de ces énergies fossiles et sans un

investissement massif dans les énergies alternatives, il faut donc rechercher des solutions pour limiter les fuites.

- ***Les ruminants : 16 % des émissions.***

Le méthane est un produit de la digestion incomplète lors de la fermentation gastro-entérique des ruminants. Une seule vache peut émettre 100 à 500 litres de méthane par jour. À cela s'ajoutent les émissions liées aux déchets (excréments, fumier d'étable) qui continuent leur décomposition avec une méthanisation plus ou moins marquée selon le contexte. Parmi les solutions étudiées : améliorer l'alimentation animale, éviter le stockage des déchets qui ne produisent du méthane qu'à l'abri de l'air, ou au contraire récupérer ce méthane et le valoriser énergétiquement. L'apport de lipides alimentaires riches en acides gras polyinsaturés dans la ration des ruminants est une piste prometteuse. Des essais menés sur vaches laitières au centre INRA de Clermont ont montré qu'un apport de 6 % de lipides issus de la graine de lin a diminué la production de méthane des animaux de 27 à 37 %.

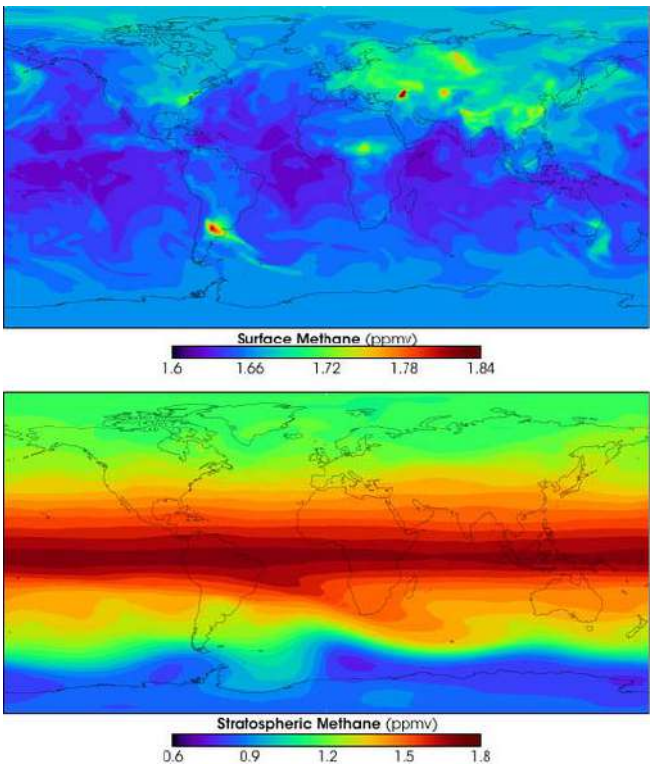


Fig. (II.6) Analyse par montrant les concentrations de méthane (parties par million en volume) en surface (en haut) et dans la stratosphère (en bas). **[27]**

- ***Les déchets humains : 12 % des émissions.***

  Les décharges fermentent et émettent de grandes quantité de méthane ; ce gaz pourrait être réutilisé comme source d'énergie.

- ***La biomasse : 10 % des émissions.***

  Le méthane émis provient surtout de l'oxydation incomplète des végétaux, lors de certains processus de décomposition organique naturelle (comme les feuilles mortes des sous-bois accumulées sous l'eau, fermentation de vases riches en matière organique). Certaines espèces (Termites) peuvent produire des quantités significatives de méthane.

- ***Les sédiments et océans : 4 % des émissions, (pourrait fortement augmenter)*** Les hydrates contenant du méthane (clathrates) pourraient émettre du gaz en cas de perturbation de la température océanique et/ou du dégel de certains sols riches de la toundra sibérienne et canadienne, mais ces émissions sont limitées actuellement. Toutefois, une augmentation de température entraine une augmentation de l'émission de CH_4 par les clathrates. Cette source pourrait donc constituer une véritable bombe à retardement climatique en cas de réchauffement des fonds océaniques.

- ***Les pergélisols*** :

  Ils contiennent du méthane qu'ils libèrent en fondant quand le climat se réchauffe. Dans les années 2000, une étude internationale (2003 - 2008) dans les eaux du plateau arctique de Sibérie orientale (plus de 2 millions de km2) a montré que les pergélisols immergés perdaient des quantités significatives de méthane, plus et plus rapidement qu'il n'était prévu par les modèles existants. Sur les sites étudiés durant ces 5 ans, plus de 50 % des eaux de surface et plus de 80 % des eaux profondes présentaient un taux de méthane environ huit fois supérieur à la normale. Le taux actuel moyen de CH_4 en Arctique est d'environ 1,85 ppm, soit la plus élevée depuis 400 000 ans alerte Natalia Chakhova. Ce taux est encore plus élevé au-dessus du plateau arctique de Sibérie orientale et N Chakhova parle de signes d'instabilité

dans le permafrost immergé "S'il continue à se déstabiliser, les émissions de méthane (…) seront beaucoup plus importantes".

Les variations futures de ces émissions sont incertaines, mais on prévoit une augmentation des apports de l'énergie fossile, des déchets, des sources agricoles et marines du fait du développement de la population mondiale, de l'industrialisation de certains pays et de la demande croissante en énergie, ainsi que du réchauffement climatique. Mais, comme indiqué plus haut, le fait est, en contradiction avec ces « prévisions », que la concentration du méthane n'augmente plus.

2.9- Puits de méthane

Ils sont encore mal cernés, mais on sait que

- Les différents mécanismes d'élimination du méthane atmosphérique retirent environ 515 Mt/an.
- Le principal puits à CH_4 est le radical hydroxyle **OH** contenu dans l'atmosphère, qui contribue à 90 % de la disparition de CH_4. Le radical OH, agent oxydant des principaux polluants de l'atmosphère (CH_4, CO, NOx, composés organiques), provient de la dissociation photochimique de O_3 et de H_2O. La teneur en radical hydroxyle est donc influencée par la concentration atmosphérique en CH_4 mais aussi par celle de ses produits, dont CO. De même, divers mécanismes affectent la teneur en OH :
- l'augmentation de concentration urbaine en NOx engendre plus de formation d'O_3 et donc plus de dissociation en OH ;
- la chute de la concentration d'O_3 stratosphérique induit plus de rayonnement UV atteignant la troposphère et donc plus de dissociation d'O_3 troposphérique ;
- l'augmentation de la vapeur d'eau résultant de l'augmentation de la température moyenne produit plus de nuages bloquant les flux de protons, effet réduisant la formation d'OH, et plus de vapeur d'eau, réactif de formation d'OH. On a constaté que depuis 1750, le niveau d'OH a diminué d'environ 20 % du fait de l'augmentation en CO et CH_4, et est aujourd'hui stable. D'ici 2050, ce niveau devrait encore diminuer de 25 %, ce qui aura un impact important sur les teneurs en éléments traces gazeux. Les 10 % restants sont dus à l'oxydation du méthane en terrain sec par

des bactéries méthanotrophes qui l'utilisent comme source de carbone, ainsi que par son transfert vers la stratosphère.

- Dans le sol et les nappes, les sédiments marins ou de zones humides existent des bactéries qui consomment du méthane. Le méthane est souvent associé à des HAP toxiques. Certaines des bactéries méthanotrophes sont mobiles et on a montré qu'elles pouvaient améliorer le transport des HAP dans le sous-sol. Cette qualité peut être utilisée pour épurer une nappe polluée par les HAP, mais peut aussi expliquer la pollution de nappes ou certaines distribution ou dispersion de HAP.

L'évolution de la concentration de l'air en méthane semble marquer le pas (2007) ; cela pourrait s'expliquer par une destruction accélérée de molécules d'ozone O_3, catalysée par des radicaux NO en plus grande quantité.

2.10- Réduire les émissions de méthane

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

- 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.

- au niveau personnel :
  - réduire sa consommation de viande (en particulier bovine).
  - réduire sa consommation de riz.
  - composter ses déchets en veillant à ce que le compost soit suffisamment aéré et drainé.

III.1.Introduction

La modélisation mathématique d'un écoulement turbulent avec ou sans réaction chimique est classiquement menée à l'aide de la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles du type elliptique non linéaire. Ces équationsexpriment les principes de conservation de masse, de quantité de mouvement et des espaces chimique dans un volume élémentaire de fluide (gaz, en général).

III.2 Objectifs du travail

L'objectif principal du présent travail est la simulation numérique d'une flamme de diffusion (non prémélange) 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 prémélangé **EDM** (Modèle Eddy Dissipation).

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-prémélangée 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 :

L'équation qui exprime la conservation de masse est donnée comme suit :

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

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

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 :

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

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 **[28]** qui permet de les exprimer en fonction des gradients des vitesses moyennes :

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

F_i sont les forces de volume.

III.3.3. Equations de conservation de l'énergie

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

Avec :

$$j_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu t}{sct})\frac{\partial y}{\partial x} \qquad III.5$$

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

Dans cette équation :

$$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{u^2 i}{2} \qquad III.7$$

$\vec{j}$: 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 :

$$\frac{\partial(\rho Y)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \upsilon Y)}{\partial x}=-\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\left(\rho D\mathrm{i,m}+\frac{\mu t}{sct}\right)Y\right)+R \qquad III.8$$

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 :

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

R :est la constant universelle des gaz

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

p_{op} :est la préssion de référence

III.3.5.Equations d'état

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

$$p = \rho RT \sum \frac{Y}{M} \qquad III.10$$

$$h = \sum h(T) y \qquad III.11$$

$$h_i = \int_{T_{r,f}}^{T} cp dT \qquad III.12$$

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

C_p: est la capacité calorifique du mélange.

M_i : est la fraction massique de l'espace

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.

Pour la turbulence, plusieurs modèles sont proposés**[29]. Le modèle k-ε** standard (qu'on a adopté pour cette étude) est un modèle semi empirique basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente k et de sa dissipation ε. L'équation modélisée de l'énergie turbulente est dérivée de l'équation exacte. Celle de la dissipation est obtenue sur la base d'un raisonnement physique. Dans ce modèle, l'écoulement est supposé complètement turbulent.

III.3.6.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente

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

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

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

Ce terme est difinit par :

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

$\beta = \frac{1}{\partial}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$ ou :G_b 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 :

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

Pour la conctant c_μ: c_μ=0.09

III.3.6.2. Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente

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

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 (valeur par défaut de CFX)

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.

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.3.7.1. Modèle Eddy Dissipation :

Le modèle Eddy Dissipation qui est basé sur les travaux de Magnussen et Hjertager dans lequel la chimie est considérée très rapide par rapport à la turbulence**.[29]**

Dans ce cas, la combustion qui n'est controlée que par la turbulence, transporte le mélange des gaz frais avec les produits chauds dans la zone de réaction où s'effectue rapidement la cinétique chimique. Cette dernière peut être négligée.

Le taux de réaction $R_{i,r}$ de l'espace i du à la réaction est donné par le minimum des expressions suivantes :

$$R_{i,r} = \dot{v}_{i,r} M_{w,i} A\rho \frac{\varepsilon}{k} \, min \left(\frac{Y_R}{R,r M_{w,R}}\right) \qquad III.17$$

$$R_{i,r} = {}_{i,r} M_{w,i} AB\rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\sum Y_P}{\sum_J^N {}_{j,r} M_{w,j}}\right) \qquad III.18$$

Où :

Y_P : est la fraction massique d'une espace p dans les produits ;

Y_r : est la fraction massique d'une espace r dans les réactifs ;

A et B : sont des constantes empiriques qui ont respectivement des valeurs 4 et 5 ;

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

Reaction progress:

Une variable, c, est employée pour décrire la progression simple de la réaction globale:

Combustible +comburant ⟶ produits

La composition du fluide est déterminée en mélangeant les compositions de l'état non-réagi (gaz frais) et celles de l'état réagi (gaz brûlés), où **C=0** correspond aux mélanges frais et **C=1**correspond aux mélanges entièrement réagis.

Dans l'écoulement turbulent, une distribution bimodale de **c** est estimée à n'importe quelle position en temps et en espace, que le fluide soit considéré comme frais ou entièrement réagi. Ainsi, la réaction chimique est comparée aux échelles de temps turbulentes intégrales de l'écoulement. Puis, la variable **c** ramenée à une moyenne de progression de réaction$\bar{c}$, est la probabilité pour que l'état instantanées du fluide soit une composition moyenne d'espèces réagis du fluide ;

$$\bar{Y}_i = (1-\bar{c})\,\bar{Y}_{i,fresh} + \bar{c}\,\bar{Y}_{i,burned} \qquad III.19$$

Par exemple, si $\bar{c}$ =0.6 alors le fluide à la position donnée sera entièrement réagi pendant 60%du temps et non-réagi le reste du temps40%.La variable de progression de réaction est calculée en résolvant l'équation de transport suivante :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{c})}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{c}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\overline{\rho D} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right)\frac{\partial \tilde{c}}{\partial x_j}\right] + \overline{w_c} \qquad III.20$$

La valeur par défaut du nombre turbulent de Schmidtσ_c pour la variable de progrès de réaction est σ_c=0.9.Dans les limites du carburant pur et de l'oxydant pur, le progrès de réaction n'est pas bien défini parce que les conditions brûlées et non-brûlées correspondent au même état physique:

$$\bar{Y}_{i,burened}\,(\bar{Z}=0) = \bar{Y}_{i,fresh}\,(\bar{Z}=0) \qquad III.21$$

$$\bar{Y}_{i,burned}(\bar{Z}=1) = \bar{Y}_{i,fresh}(\bar{z}=1) \qquad III.22$$

Quoique différentes valeurs de$\bar{c}$correspond à la même composition du mélange, il est encore important pour imposer la valeur appropriée à la frontière, parce qu'elle commande le régime de combustion dans le domaine:

$\bar{c}$ **=0**correspond à la combustion pré-mélangée

$\bar{c}$**=1**correspond à la combustion non-pré-mélangée (flamme de diffusion)

Dans la plupart des cas $\bar{c}$=0 est approprié pour des prises de carburant (en fait, si $\bar{c}$=1, pour le carburant le modèle de flamelet a pu être employé et non résolu pour $\bar{c}$ du tout). **[30]**

Pour des admissions d'oxydant, la valeur appropriée dépend du processus de mélange dans le domaine:

- $\bar{c}$=0 pour l'oxydant prémélangeant avec (par exemple air primaire)
- $\bar{c}$=1 pour l'oxydant se mélangeant aux produits (par exemple, air secondaire)

III.3.8.Rayonnement

III.3.8.1. P1

L'approximation différentielle (ou P1) est également une simplification du transport de l'Équation de rayonnement, qui suppose que l'intensité de rayonnement est isotrope ou direction indépendante à un endroit indiqué dans l'espace. La forme pleine de l'équation radiante d'énergie et la dérivation du modèle P1 pour le rayonnement sont brièvement donnés ici. Le flux spectral de chaleur rayonnante dans la limite de diffusion pour une émission, absorbant, et dispersant linéairement le milieu, peut être calculé comme:

$$P_1 = q_{rv} = -\frac{1}{3(K_{ar} - k_{sv})AK_{sr}} \nabla G_r \qquad III.23$$

Après substitution dans l'équation de transport de rayonnement, l'équation pour le rayonnement spectral d'incident prend la forme suivante :

$$-\nabla_0\left(\frac{1}{3(K_{ar} - k_{sv})AK_{sr}} \nabla G_r\right) = k_{ar}(E_{bv} - G_v) \qquad III.24$$

Où A est le coefficient linéaire d'anisotropie.

On note que plusieurs autres modèles de rayonnement sont implémentés dans CFX. Le modèle P1 est adopté dans cette étude comme première tentative d'une étude couplant : l'Ecoulement, la réaction de Combustion, la Turbulence et le Rayonnement **[30].**

IV.1 Approche CFD dans la simulation du problème de combustion

IV.1.1 Définition de la "CFD" :

Computational fluid dynamics, généralement abrégé en CFD , est une branche de la mécanique des fluides qui utilise des méthodes numériques et des 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. En cours de recherche des rendements élevés, les logiciels de CFD visent à améliorer la précision et la vitesse de scénarios de simulation complexes tels que les écoulements transsoniques ou turbulent. La validation initiale d'un tel logiciel est effectuée à l'aide d'une soufflerie avec la validation finale à venir en essais à grande échelle, par exemple, tests en vol.

IV.1.2 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 les termes décrivant les rendements les équations de vorticité plein potentiel. 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.

La puissance informatique disponible rythmée développement de méthode trois dimensions. 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. Ce papier utilisé la méthode des fonctions de vorticité flux, développé par Jake Frommau LAN.

IV.1.3 Méthodologie :

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

- Lors du prétraitement

- La géométrie du problème est définie (limites physiques).
- 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, d'enthalpie, de rayonnement, ou de 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.

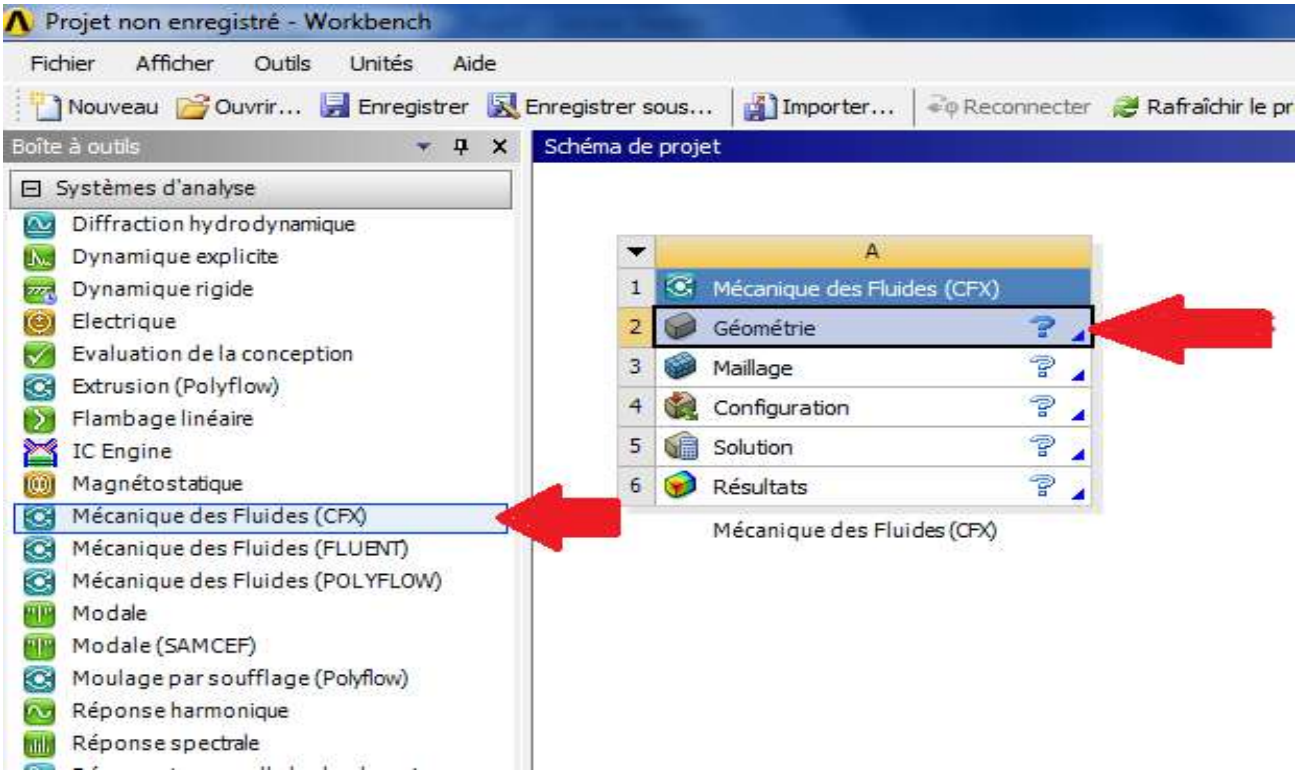
IV.2 Présentation d'ANSYS CFX

CFX-14.0 est un logiciel général de simulation numérique d'écoulement en mécanique des fluides et transfert thermique.

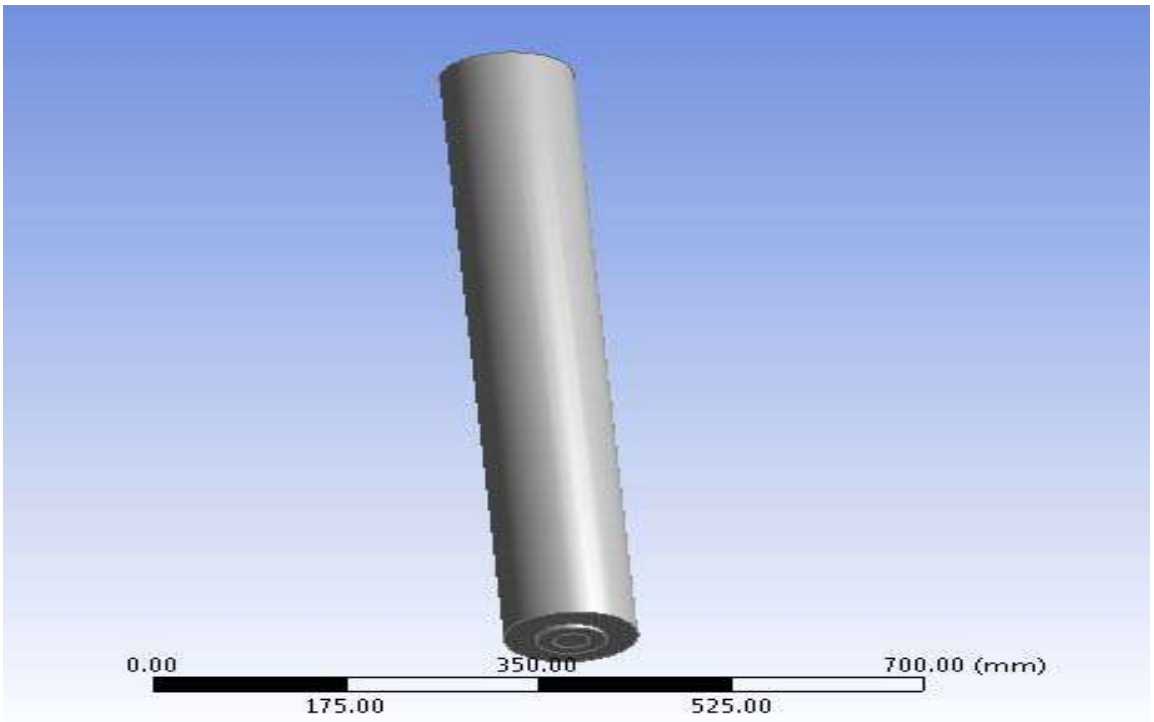
Ce logiciel permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète de la modélisation, de la création géométrique, et la visualisation des résultats, en passant par la création du maillage et le calcul.

Les étapes à suivre :

1. Allez dans le menu, programmes : choisis> Ansys > Workbench
2. Sélectionnez le système d'analyse CFX (à gauche), glissez-le dans le schéma de projet (à droite), et lâchez-le dans le rectangle en surbrillance.
3. Double-clique sur l'installation pour lancer CFX :



On présente ici la géométrie crée respectant les consignes et faisant apparaitre "révolution"

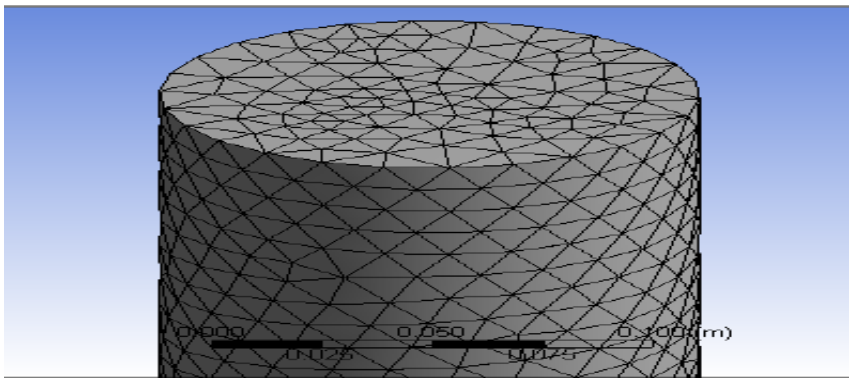


➢ MAILLAGE :

La troisième étape double-clique sur l'icône de maillage

Le choix du maillage est déterminant. Il joue un rôle important sur l'exactitude des résultats et nous jugerons d'ailleurs son impact par la suite grâce à la comparaison de plusieurs retours de simulation. Les conditions de maillage sont donc amenées à être modifiées au cours du projet.

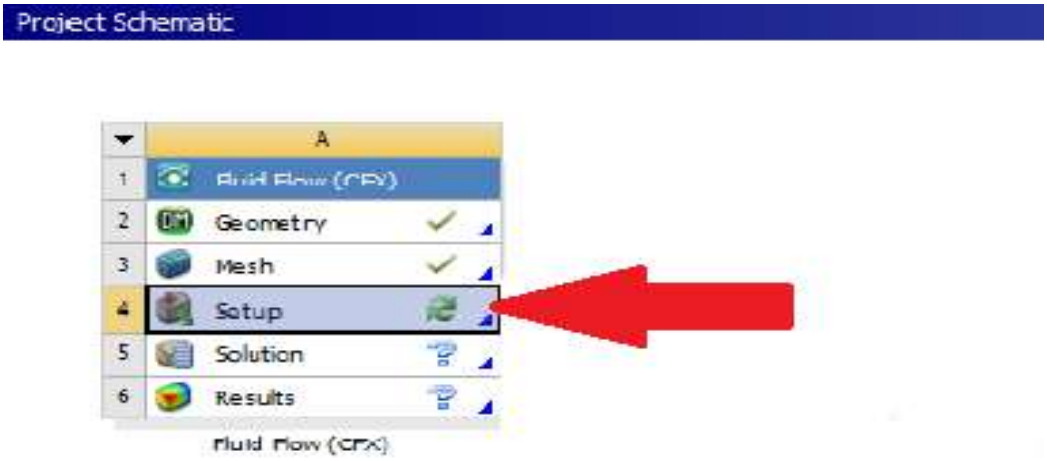
Le maillage réalisé est le suivant :

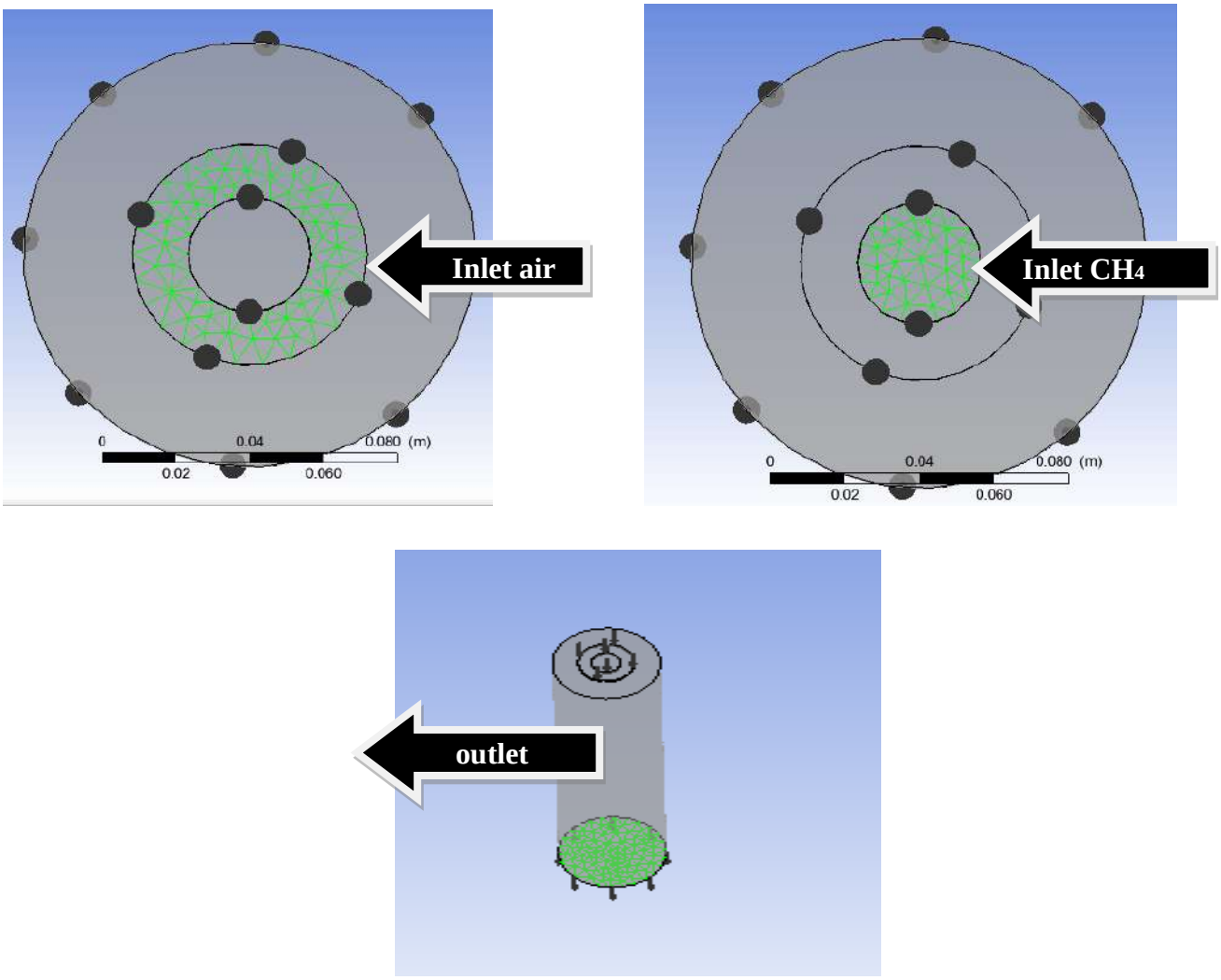


Ce maillage est définit de la manière suivante :

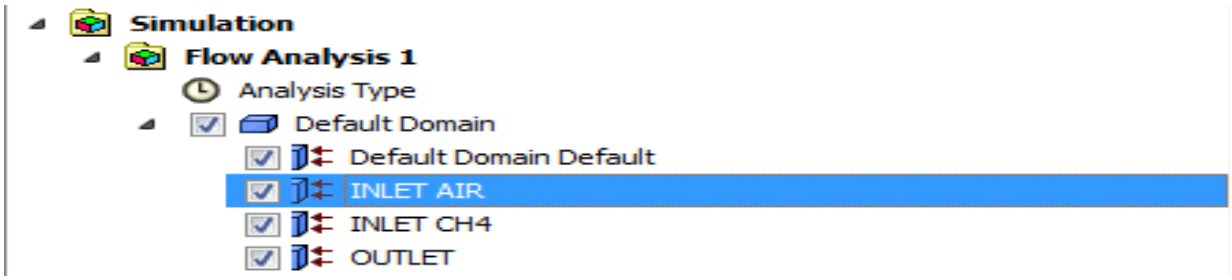
Noeuds	7619
Eléments	37669
Paramètres de maillage	Aucun

La quatrième étape double-clique sur l'icône de setup

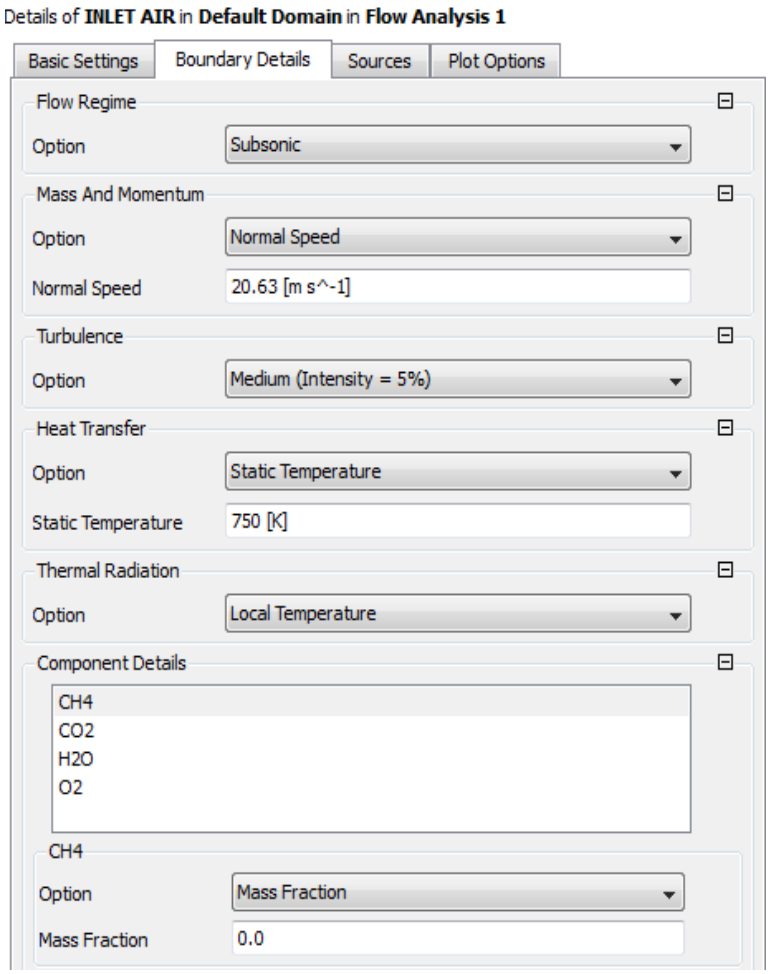




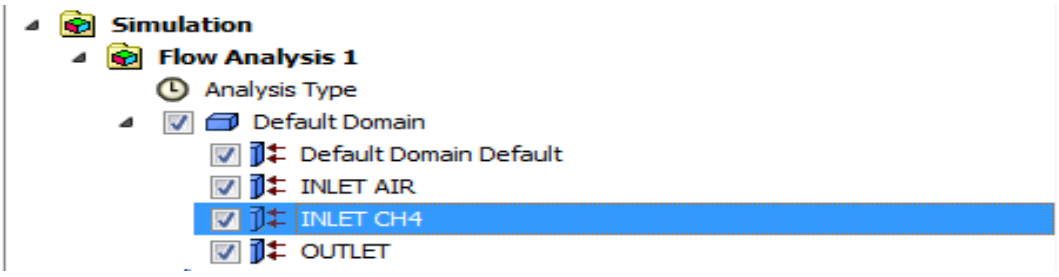
- Double–clique sur inlet air :



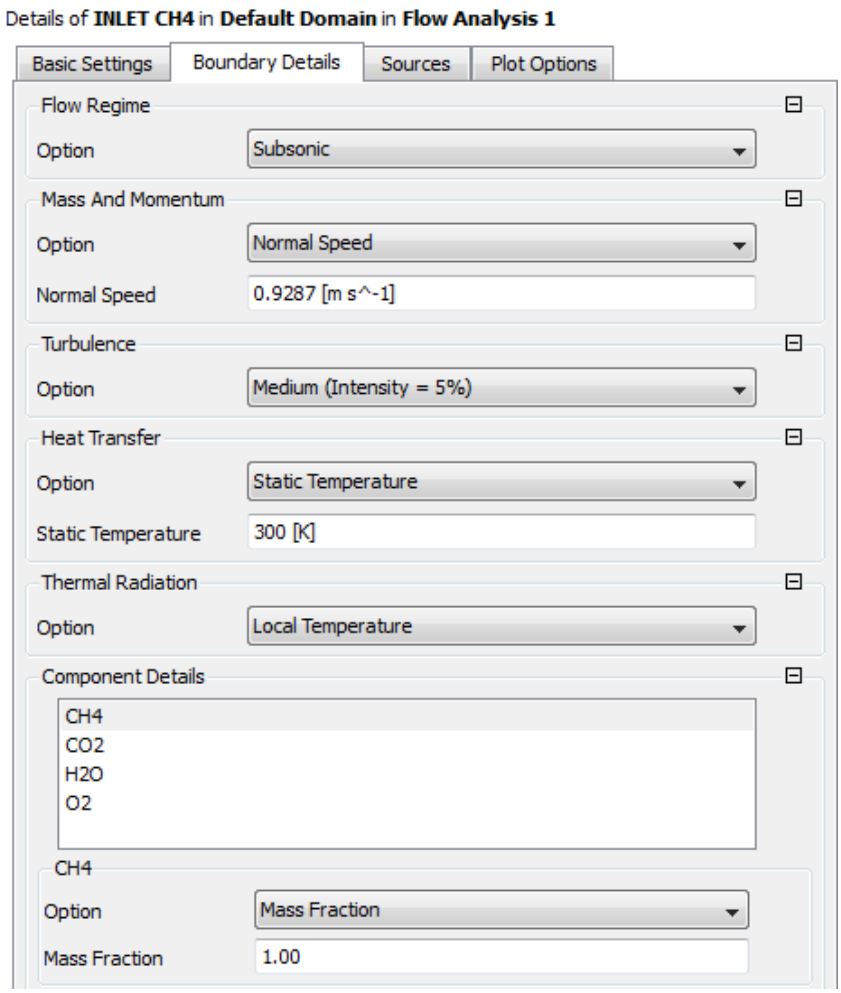
- Allez à "boundary details" et à partir de la liste déroulante sélectionnez l'option "Normal Speed " et attribuer une valeur de vitesse 20,63 m/s et la température d'entrée d'aire est 750 K.



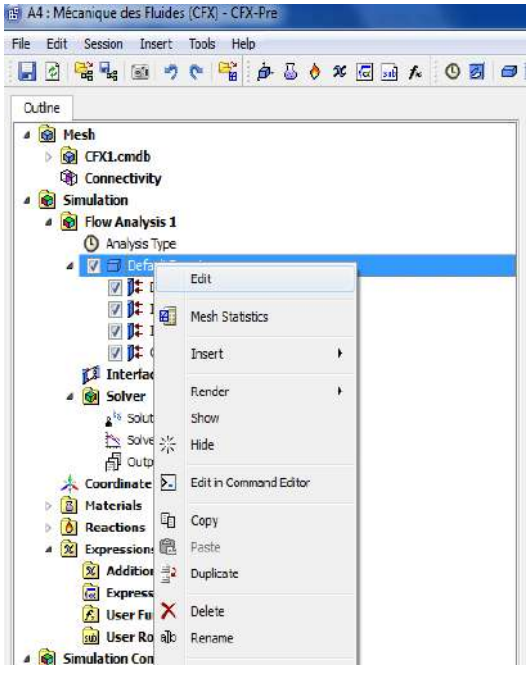
- Double-clique sur inlet CH_4 :

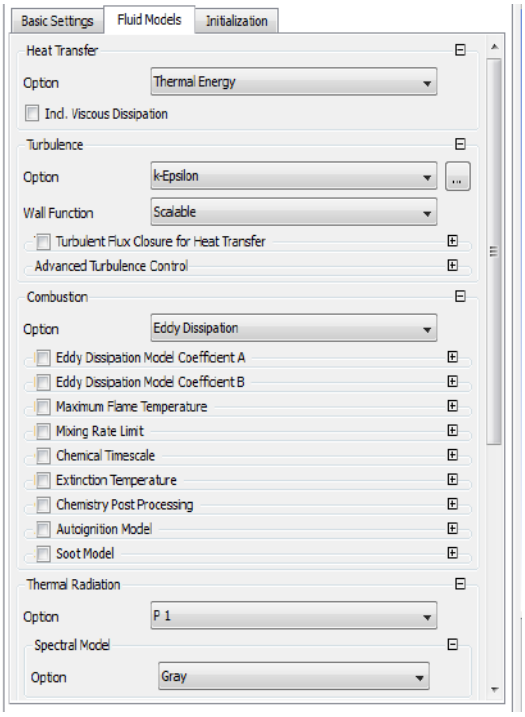


- Allez à "boundary details" et à partir de la liste déroulante sélectionnez l'option "Normal Speed " et attribuer une valeur de vitesse 0.9287 m/s et la température d'entrée d'aire est 300 K.

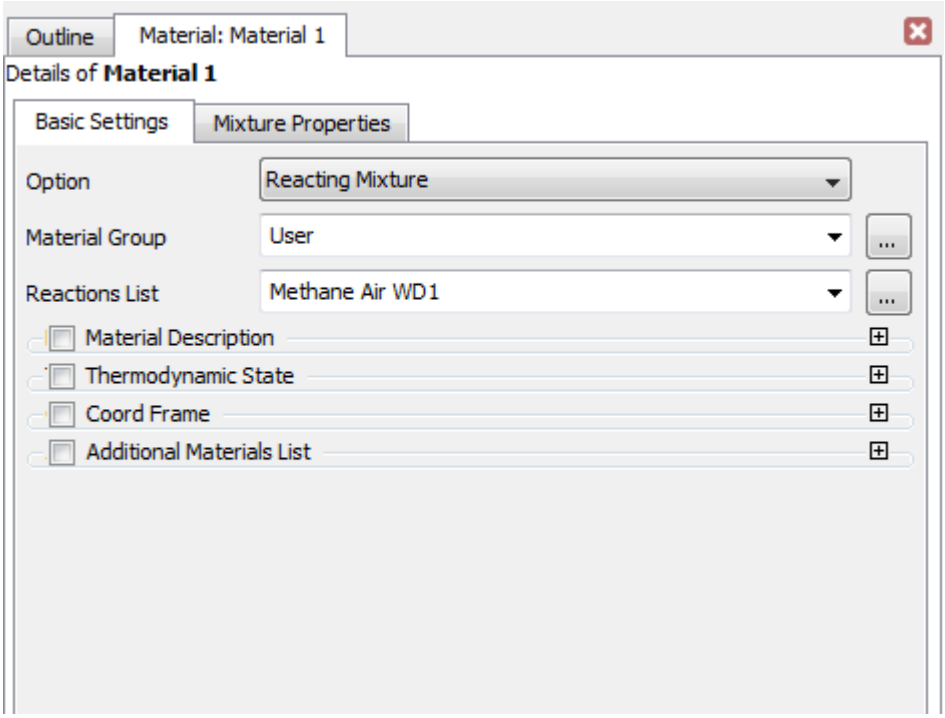


Clique droit sur l'icône "Défault domain" ce qui vient ensuite est de choisir l'option "Edit"

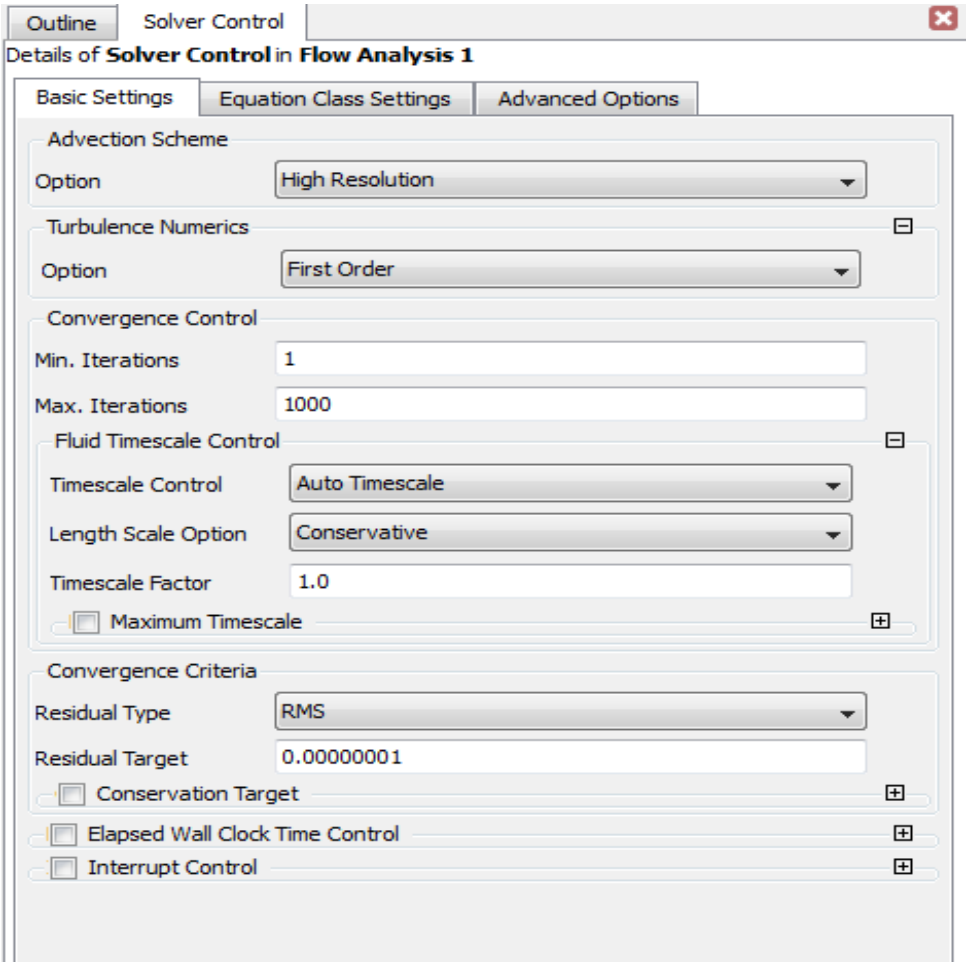




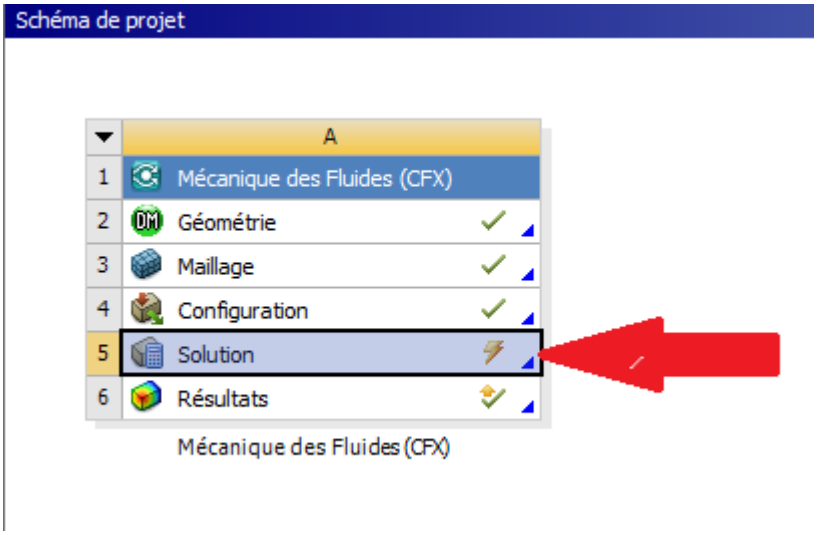
Le matériel choisi est Méthane AirWD1



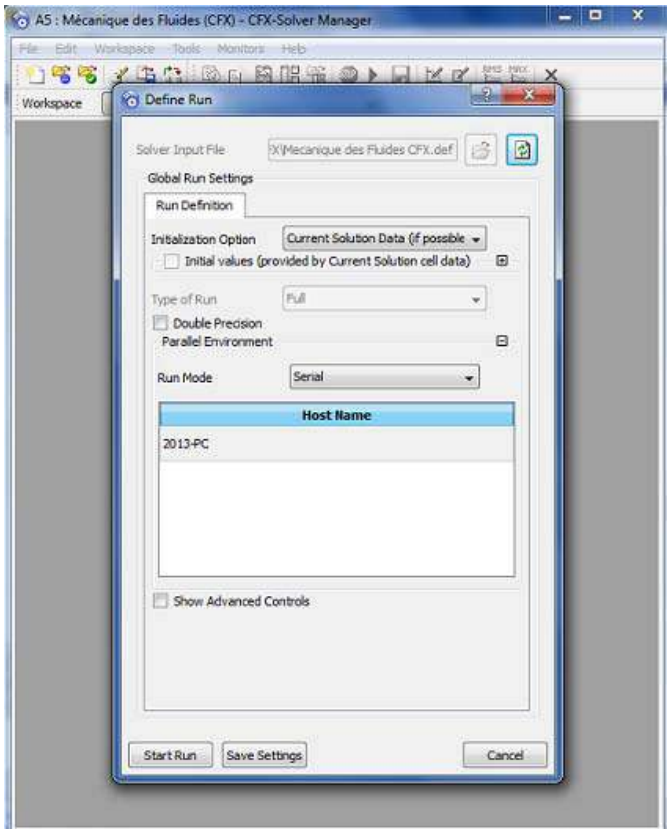
L'itération de la simulation est 1000



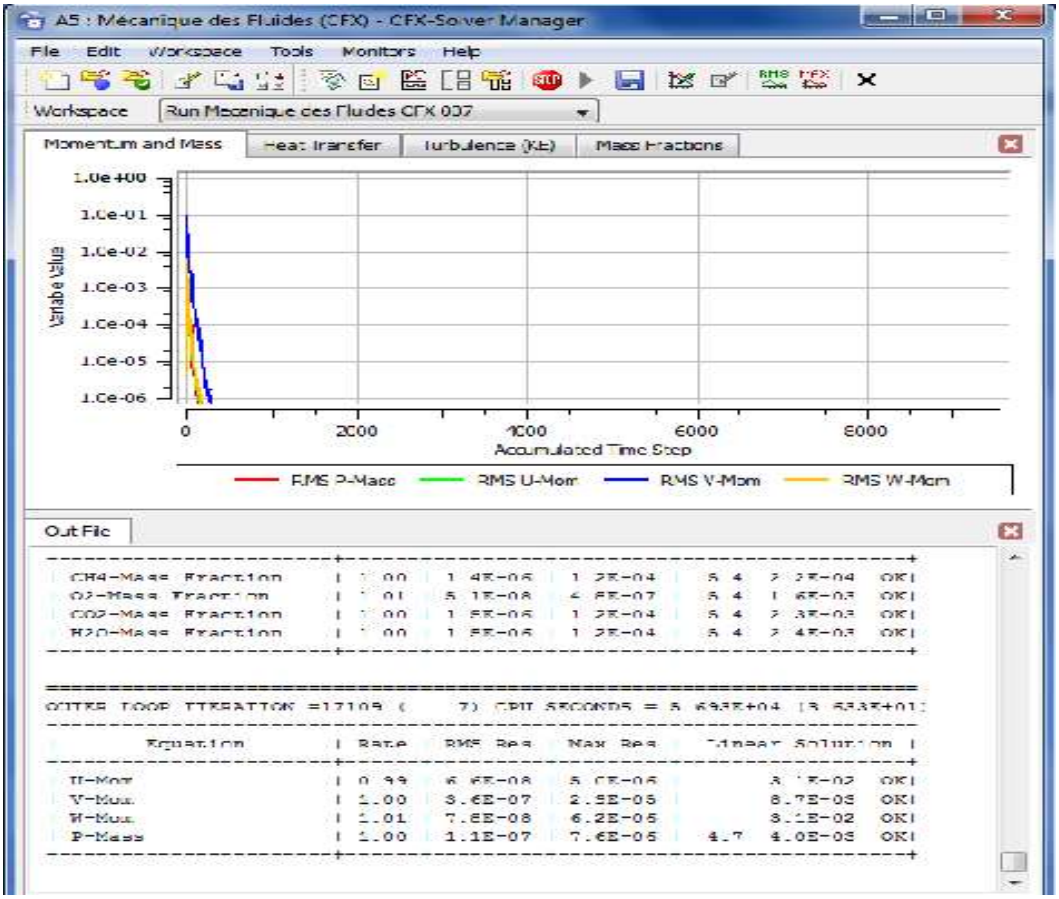
La cinquième étape double-clique sur l'icône de " Solution"



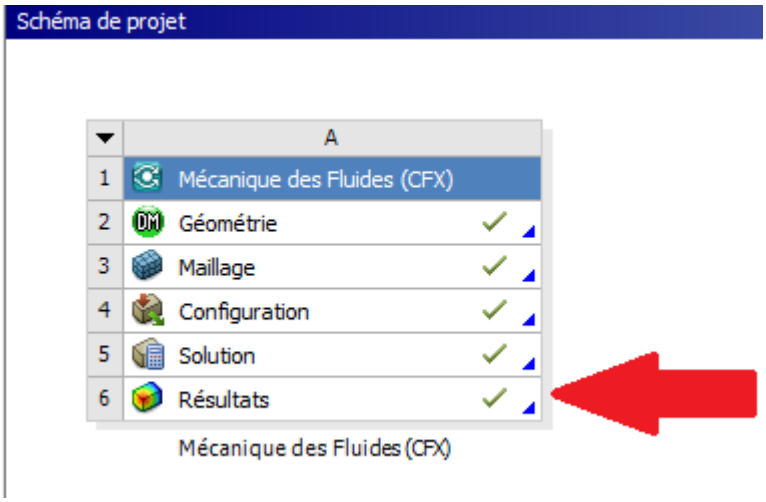
Cliquer sur "Start Run"



En exécution d'une simulation l'utilisateur peut initialement préciser que le domaine est applicable d'exécuter une simulation de la combustion.



La sixième étape double clique sur "Résultats"



C'est la dernière étape du projet de simulation. ANSYS (CFX), propose plusieurs objets de traçage prévus surface, vecteurs, lignes profilées, découpes animations …

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

Le menu d'insertion montre une liste de choix, mais il y a des raccourcis pour tous les articles. Un certain objet commun est:

- location de : Points, Lignes, plantes, Surfaces, Volumes
- vector plots
- contour plots
- streamlines

V.1. Modélisation de la chambre de combustion

On présente dans ce chapitre les résultats de simulations effectuées de l'écoulement réactif de combustion Méthane-Air. Les jets du Méthane et de l'air sont coaxiaux conformément à la configuration de Spadiccini reportée par Medguedam [31] en vue d'une comparaison des résultats et validation.

V.1.1.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 d'Owen et al (1976).

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

L'étude expérimentale s'est composée en six cas de test conduits dans de diverses conditions de fonctionnement et modifications géométriques. La configuration a un diamètre relativement grand, port central à vitesse réduite de carburant, avec une vitesse plus élevée. L'air a été préchauffé à 750K, le carburant était à 300K.

Pour les calculs concernant les énergies et les concentrations chimiques, on prend le test de (Pitsch et Matthias, 2005) de même configuration expérimentale de Spadaccini et mêmes conditions thermodynamiques sauf que l'essai se fait à pression atmosphérique.

Le carburant utilisé dans l'expérience était le gaz naturel mais, pour la présente étude, on a choisile méthane pur. Les données expérimentales incluent des profils radiaux pris habituellement quatre points de références axiaux, les fractions de masse (mesurées par une sonde prélèvement traversant le gaz) la température (mesurée par un thermocouple), et de vitesse axiale (mesurée par laser Doppler vélocimétrie).**[31]**

V.2. Configuration adoptée pour l'étude numérique :

On présente dans le tableau 1 les principales caractéristiques géométriques de la chambre à combustion adoptée pour la présente étude ainsi que les conditions initiales de l'écoulement.

Table 1 : PARAMETRES CARACTERISANT LA CHAMBRE DE COMBUSTION METHANE/AIR. **[31]**

Paramètres	*Valeur*
Rayon intérieur de jet central (R1)	31.57mm
Rayon extérieur de jet central (R2)	31.75mm
Rayon de jet annulaire (R3) ≡ R	46.85mm
Rayon de la chambre de combustion (R4)	61.15mm
Longueur de la chambre de combustion	1000 mm
Débit massique de carburant « Méthane »	0.0072 kg/s
Débit massique de comburant « Air »	0.137 kg/s
Vitesse d'entrée de (V1) CH4	0.9287 m/s
Vitesse d'entrée de (V2) d'air	20.63 m/s
Température d'entrée de Méthane	300 K
Température d'entrée d'air	750 K

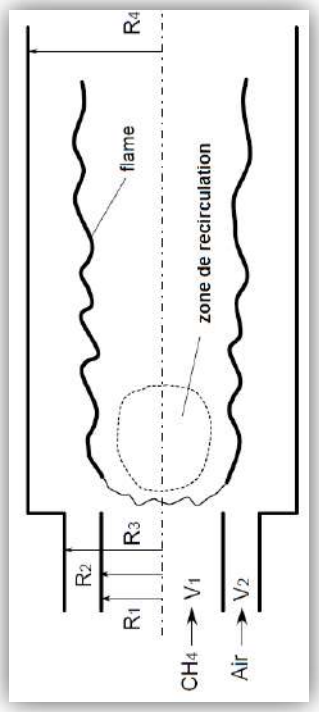


Fig. (V.1) Configuration expérimentale (Spadaccini et al 1976)**[31]**

Le schéma précédent montre également un schéma de la configuration de flamme observée dans l'expérience. En raison du rapport carburant/air élevé de vitesse et des tourbillons, une zone de recirculation centrale forte est formée directement devant la sortie du carburant. La flamme apparaît à l'entourage du jet d'air.

La zone de flamme est représentée par une ligne épaisse les produits de combustion fournissent une source d'allumage continu et servent à stabiliser la flamme "test 1".

V.3.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).

V.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les figures de ce chapitre montrent également les profils de densité, vitesse, température, et concentration de flamme observée dans l'expérience.

Les résultats qualitatifs sont relativement en bonne adéquation avec les données expérimentales de (Pitsch et Mathias,2005), pour autant que les hypothèses en rapport avec les différences de géométrie entre les expériences et les simulations soient vérifiées.

V.4.1. Effet du maillage

Après le test de plusieurs maillages, la Figure (V.2) montre une convergence des résultats (profil des vitesses axiales) pour un raffinement donné au-delà duquel les résultats ne présentent aucune variation sensible. Ainsi, on adopte un maillage formé par 7619 nœuds et 73669 éléments dans toute la suite de l'étude.

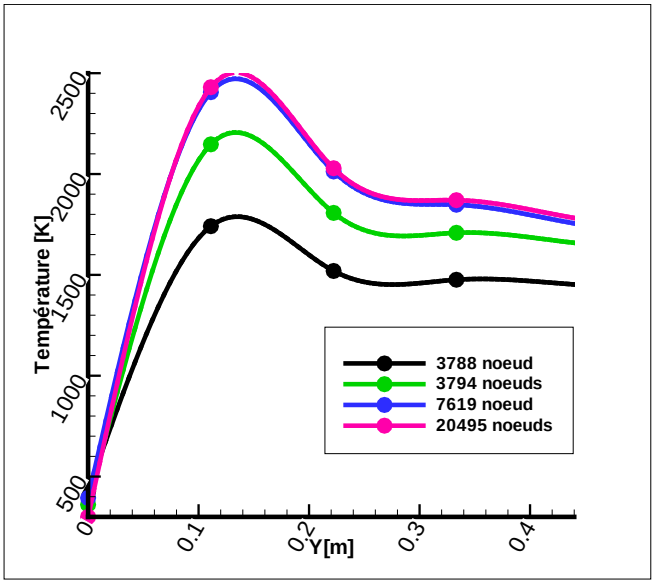


Fig. (V.2) Effet de maillage sur le profil de vitesse axiale

V.4.2. Effet de la vitesse du fuel (Méthane)

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

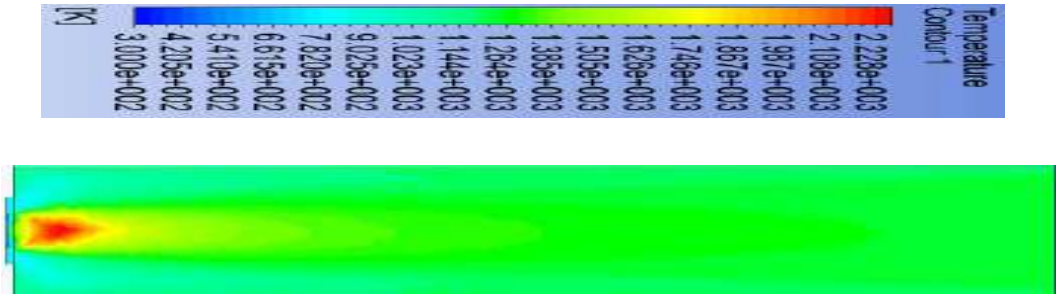


Fig. V.3. Champs de température à v=0.5m/s à T=300 K

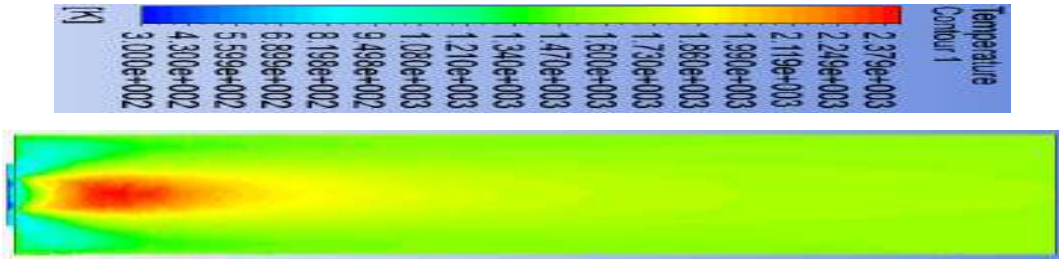


Fig.V.4. Champs de température à v=0.92m/s à T=300 K

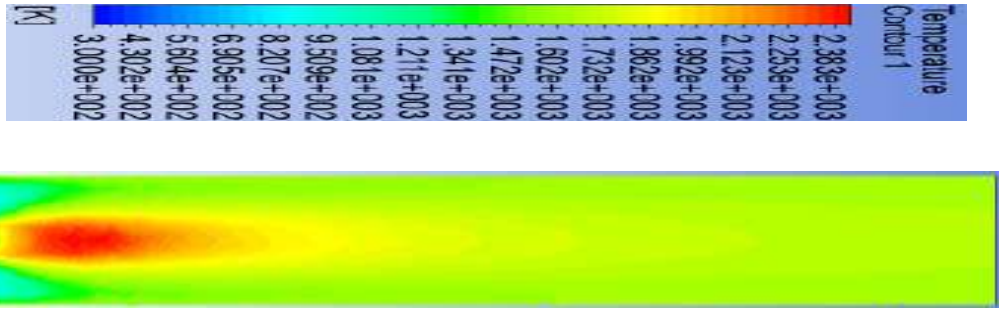


Fig. V.5. Champs de température à v=1m/s à T=300 K

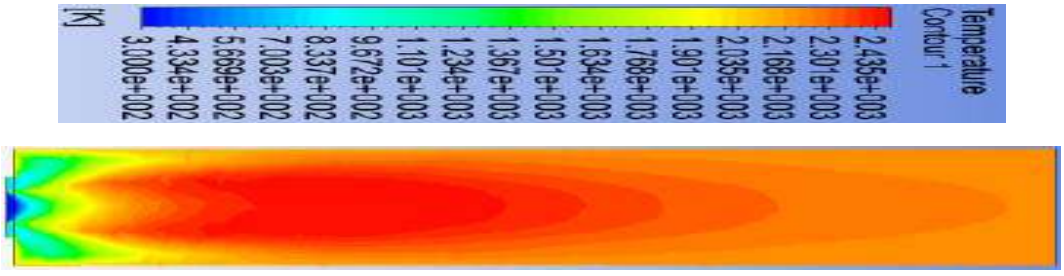


Fig.V.6. Champs de température à v=2 m/s à T=300 K

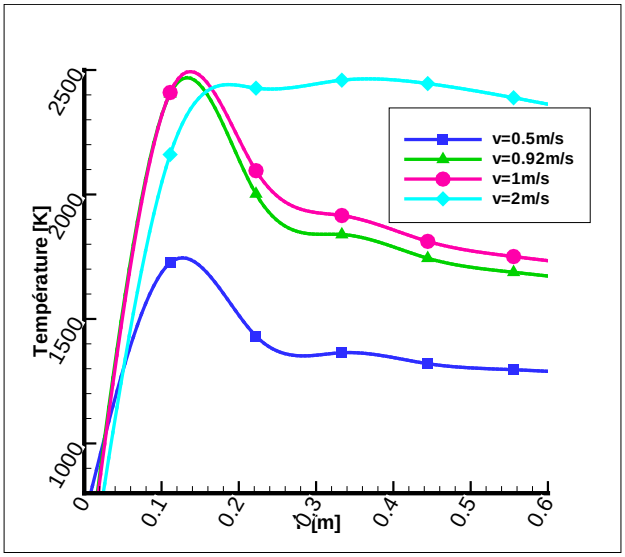


Fig.V.7. L'effet de la vitesse d'entrée (méthane) suivant l'axe Y.

Les figures (V.3) à (V.6) montrent l'effet de la vitesse d'injection du méthane. On a testé les valeurs suivantes 0.5, 0.92, 1.00 et 2.00 m/s. On remarque bien que la longueur et l'épaisseur de flamme augmentent avec l'augmentation de V_{fuel}. Ceci est dû à l'augmentation du débit proportionnellement à la vitesse.

La figure (V.7) confirme ces constatations. Elle indique aussi le comportement stable de la flamme dans un milieu confiné au-delà de la limite du front de flamme. Ceci illustre l'équilibre thermique dans le tube.

En outre, pour ces valeurs de vitesse d'entrée du fuel, la flamme est toujours accrochée au bec d'injection malgré la présence d'une zone de mélange de température plus au moins basse relativement à T_{max} .

V.4.3. Champs de température

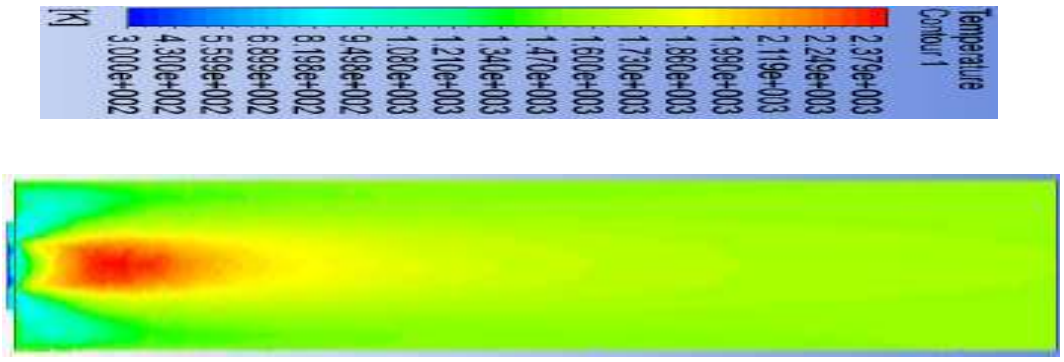


Fig. (V.8) Champs de température [k]

La figure (V.8) montre une augmentation de la température suivant la direction axiale de la chambre de combustion, qui est l'une des manifestations les plus importantes de la combustion dans la zone de réaction. La température maximale atteinte est de l'ordre 2422°K.

En allant vers l'aval, à partir du nez du bruleur, la température augmente de façon régulière jusqu' à une distance égale à z= 0.17 m pour laquelle la température atteint sa valeur maximale (appelé longueur de flamme) et qui se situe sur l'axe du jet (l'axe de symétrie) avant qu'elle diminue progressivement.

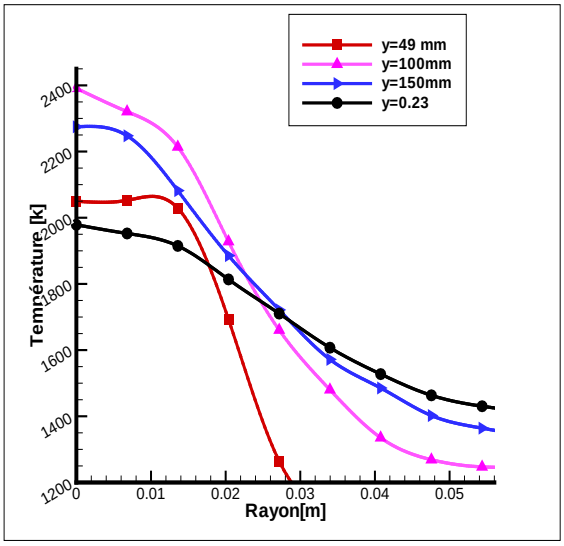


Fig. (V.9) Profile radiale de Température dans différentes sections Y dans le champ d'écoulement

- Les évolutions radiales de la température sont représentées sur la (**fig. V.9).**Dans la position Y=49mm, les calculs donnent lieu à un épanouissement plus large du fait de la présence, dans cette zone, de forts gradients de densité et de vitesse. La précision des résultats s'améliore en direction de l'intérieur de la flamme du fait de l'atténuation des effets des gradients de densité et de vitesses.

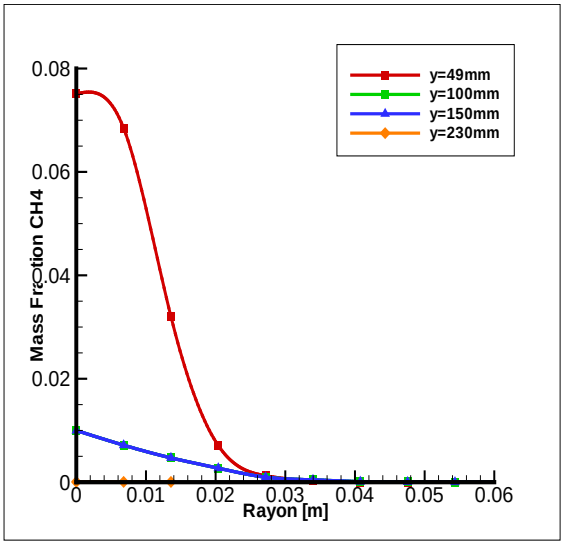


Fig. (V.3) Fraction molaire de CH_4dans différentes sections Y dans le champ d'écoulement

- Le champ de la fraction molaire de méthane est représenté sur la (**fig. V.3)** sous forme de profile en différentes positions Y loin de l'injection. La consommation du combustible est clairement illustrée. En effet, sa fraction molaire diminue progressivement de la valeur initiale pour disparaitre complètement à la fin de la zone de réaction.

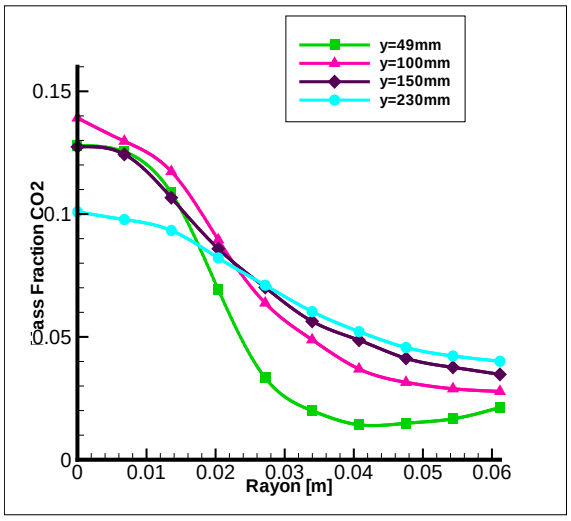


Fig. (V.11) Fraction molaire de CO2 dans différentes Sections Y dans le champ d'écoulement

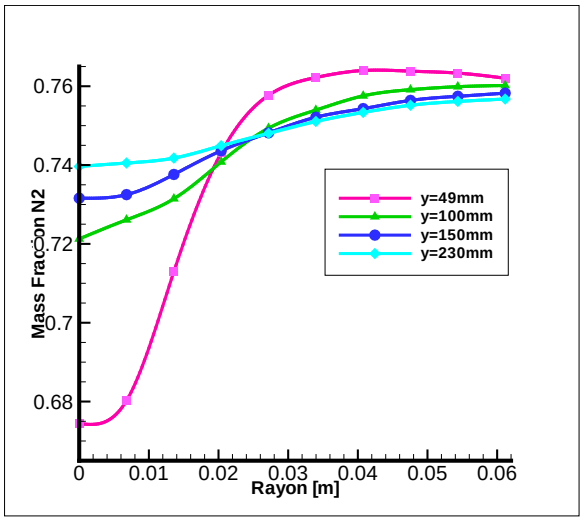


Fig. (V.12) Fraction molaire de N_2 dans différentes sections Y dans le champ d'écoulement

- La **fig. V.11.** représente la fraction molaire de CO_2 dans les différentes positions. On remarque que, pour une position donnée, la fraction molaire diminue progressivement de la valeur initiale au niveau de l'axe centrale du tube jusqu'à une faible valeur prés des parois loin de l'axe de l'injecteur. D'autre part, plus on s'éloigne axialement de l'injecteur

(exemple position Y=230 mm), on remarque une faible variation de la fraction massique dans la direction radiale car on est loin de la zone d'influence et d'existence du front de flamme.

- La **fig. V.12.** représente la fraction la fraction molaire de N_2. On remarque un comportement similaire à celui du CO2 et du O2 mais dans le sens contraire. Ceci est due au fait que le N2 est un élément neutre dans la réaction de combustion et il n'est ni consommé ni transformé quoiqu'il est réchauffé par la combustion.

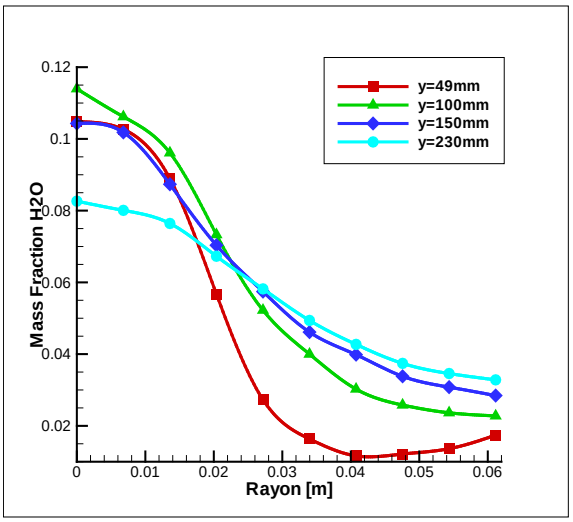


Fig. V.13. Fraction molaire de H_2O dans différentes Sections Y dans le champ d'écoulement

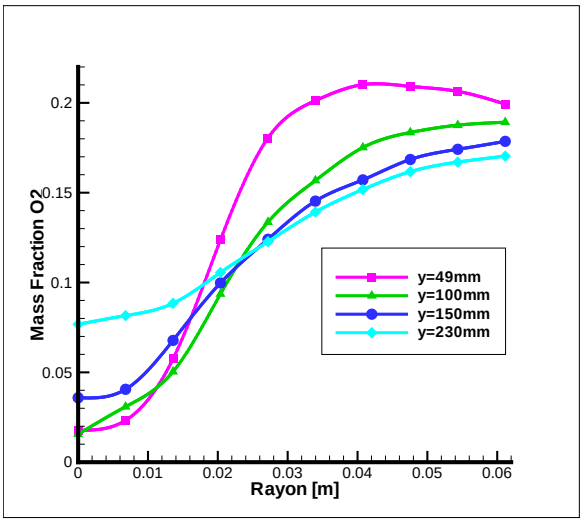


Fig. V.14. Fraction molaire de O_2 dans différentes sections Y dans le champ d'écoulement

- Comme produit de combustion, le H_2O présente un comportement similaire à celui du CO2. On remarque dans la **fig (V.13)** que, pour une position donnée, sa fraction molaire diminue progressivement de la valeur initiale au niveau de l'axe centrale du tube (lieu d'expansion de la flamme) jusqu'à une faible valeur prés des parois loin de l'axe de l'injecteur. D'autre part, plus on s'éloigne axialement de l'injecteur (exemple position Y=230 mm), on remarque une faible variation de la fraction massique dans la direction radiale car on est loin de la zone d'influence et d'existence du front de flamme.

- Le champ de la fraction molaire de l'oxygène est représenté sous forme de profils en différentes positions (**Fig. V.14)**. La quantité d'oxygène est complètement consommée dans la zone centrale de la flamme**.** Prés des parois, l'oxygène ne participe pas à la

réaction de combustion mais jouera un rôle très important dans le refroidissement des parois de la chambre de combustion.

V.4.4. Effet de la température d'entrée du fuel (Méthane)

On veut mettre en évidence l'effet de la température d'entrée du combustible sur la structure de la flamme. On a fixé une vitesse d'entrée à 0.92m/s. La vitesse de l'air étant fixée à 20.63m/s.

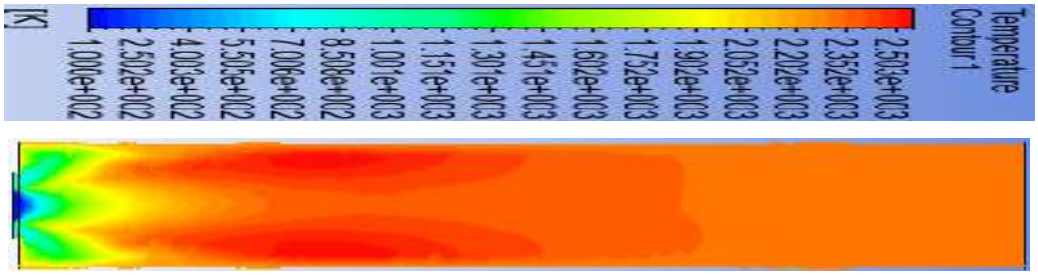


Fig.V.15. Champs de température à v=0.92m/s à T=100K

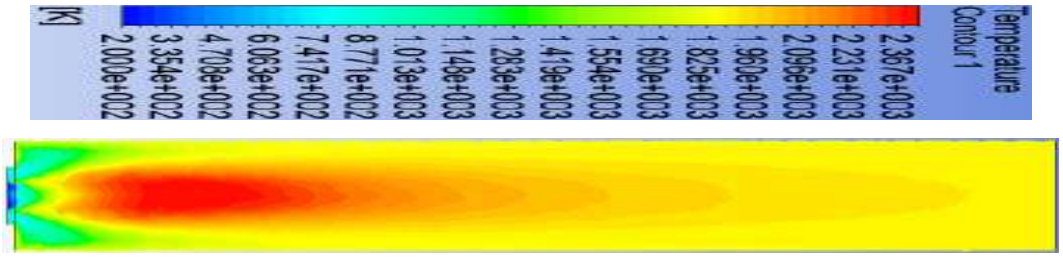


Fig.V.16. Champs de température à v=0.92m/s à T=200K

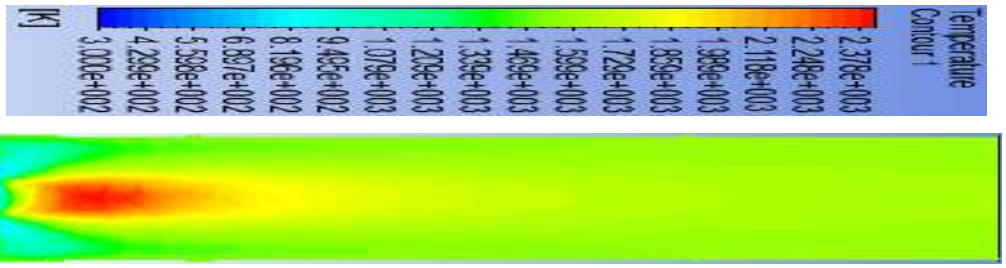


Fig.V.17. Champs de température à v=0.92m/s à T=300K

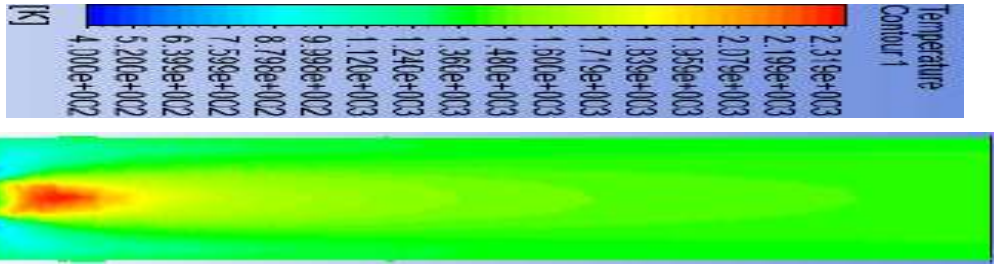


Fig.V.18. Champs de température à v=0.92m/s à T=400K

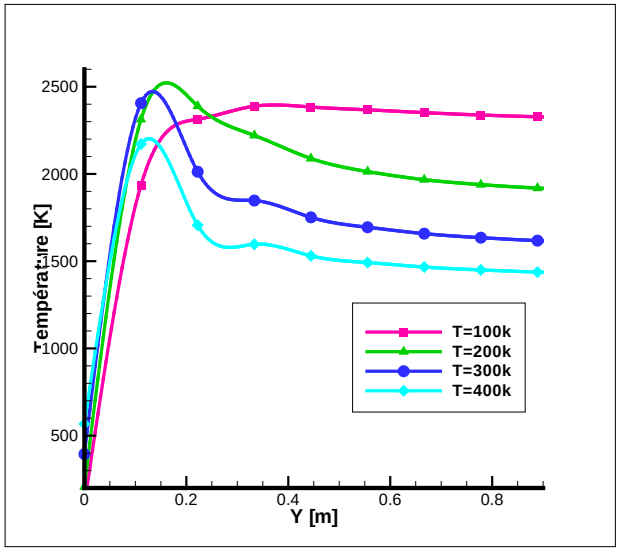


Fig. (V.19) L'effet de la température d'entré (fuel) suivant l'axe Y

On remarque que plus la température d'entrée est grande plus la flamme s'accroche au bec d'injection (Fig. (V.15) à (V.18)) ; 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 la figure (V.19). La flamme devient plus mince si on augmente la température d'entrée du fuel.

En outre, la flamme aura un comportement stable après l'équilibre thermique dans le tube ; ceci se justifie par l'hypothèse adoptée des parois adiabatiques. Dans un cas plus réaliste, la flamme consomme tout le fuel injecté puis s'éteint.

V.4.5. Effet de la vitesse de l'air

On met en évidence l'effet de la vitesse d'entrée de l'air sur la structure de la flamme. On a fixé une température d'entrée du fuel à 300 K et une vitesse à 0.92m/s. On remarque que plus la vitesse d'entrée est élevée plus la flamme s'accroche au bec d'injection.(Fig V.20 à V.23)

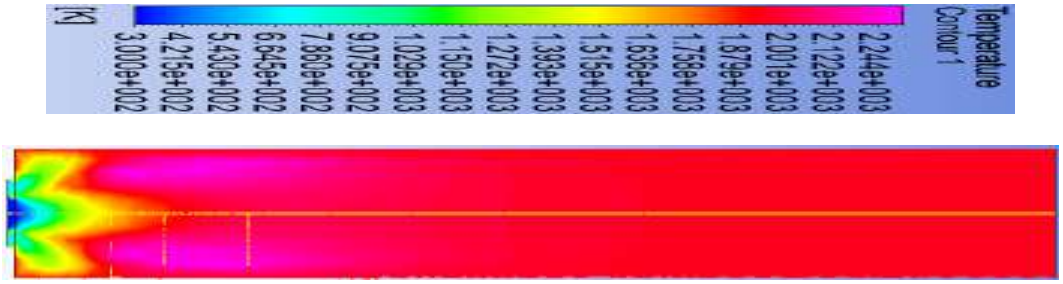


Fig .V.20. Champs de température à V=5m/s à T=750K

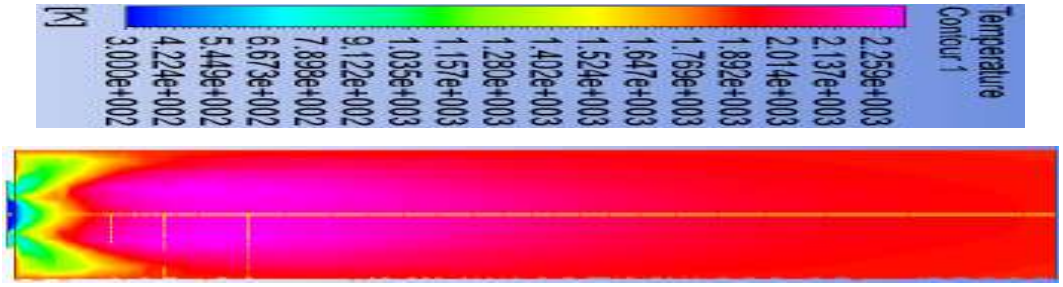


Fig .V.21. Champs de température à V=10m/s à T=750K

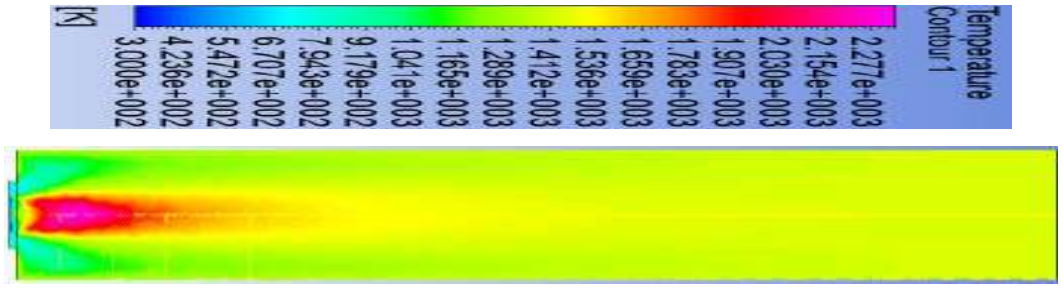


Fig.V.22. Champs de température à V=30m/s à T=750K

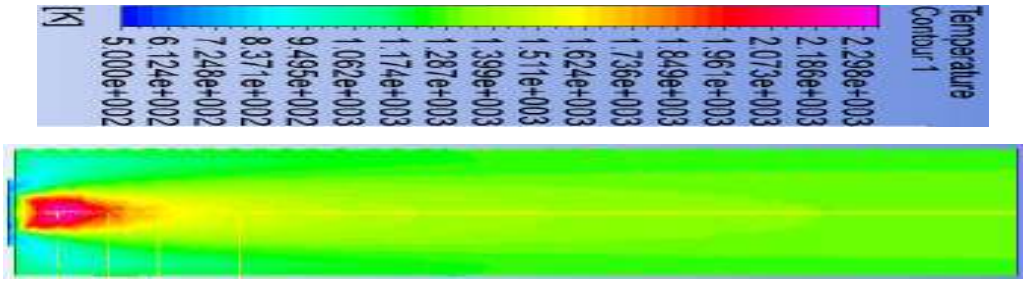


Fig.V.23. Champs de température à V=20m/s à T=750K

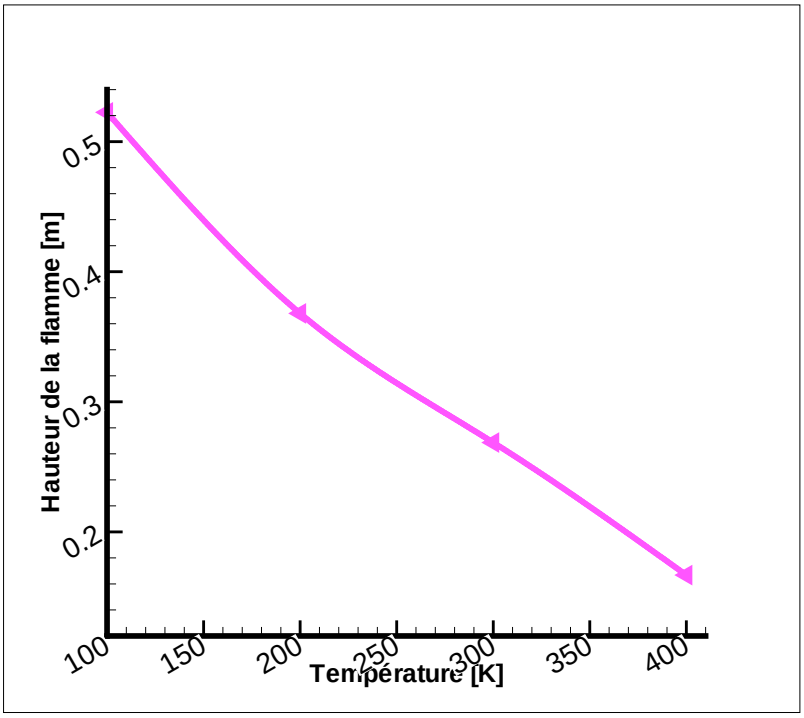
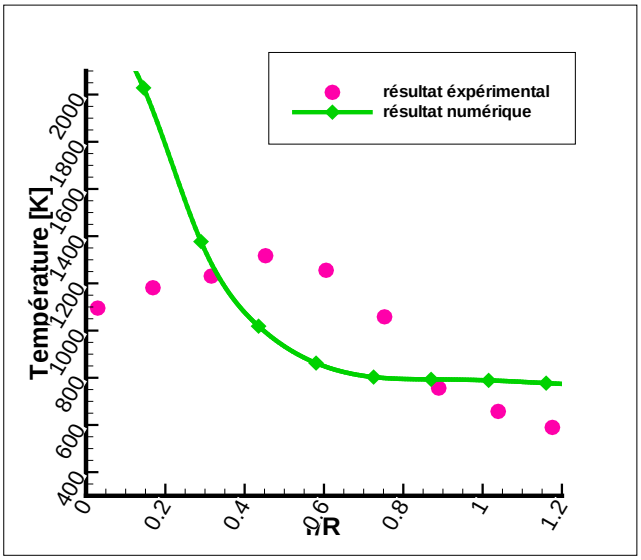


Fig.V.24. Hauteurs de la flamme pour différentes de température

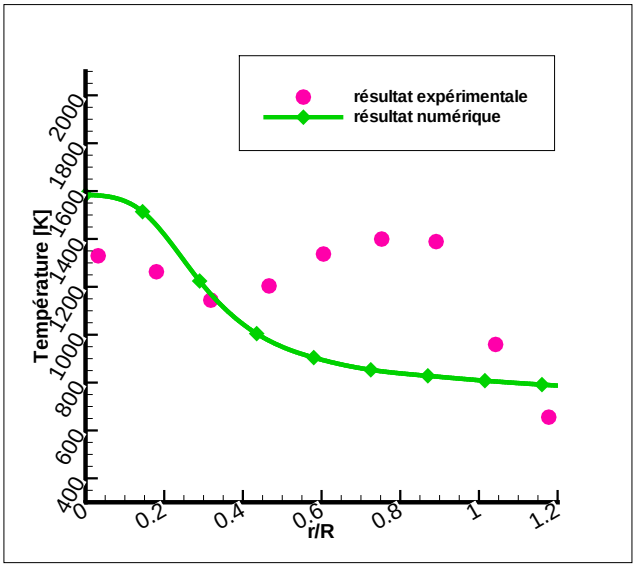
La (**fig.V.24**) montre que la longueur de la flamme diminue avec l'augmentation de la température d'entrée. La longueur de la flamme prend les valeurs (0.52, 0.36, 0.26, 0.16m) pour une température d'entrée de 100, 200, 300 et 400 °K respectivement.

V.4.6. Etude comparative

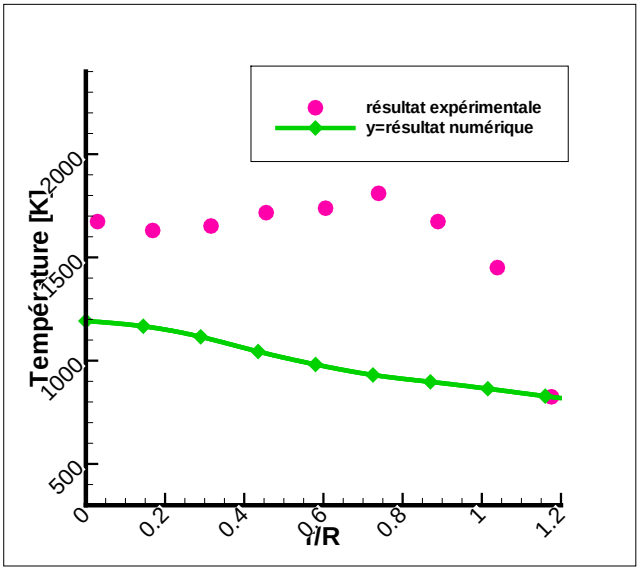
V.4.6.1- Comparaison de température



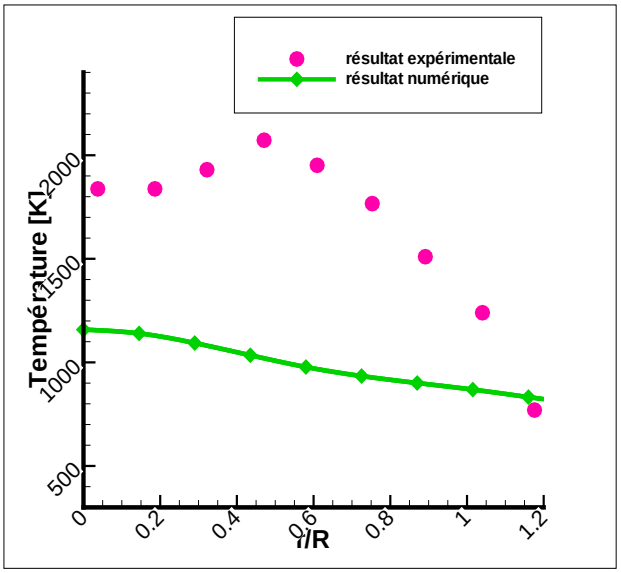
Y/R=0.89



Y/R=1.57

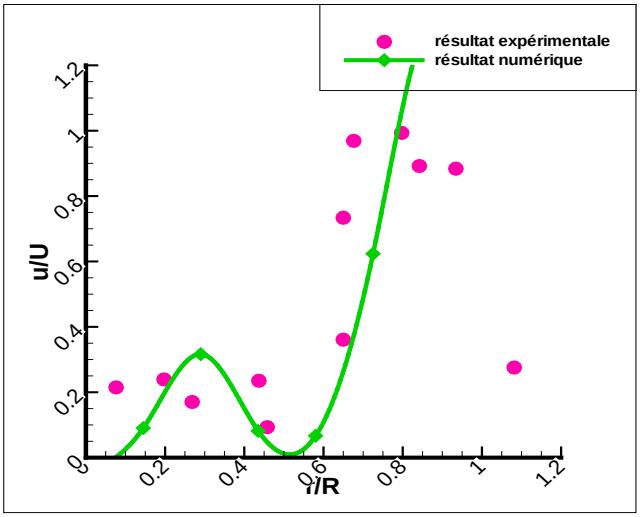


Y/R=4.52

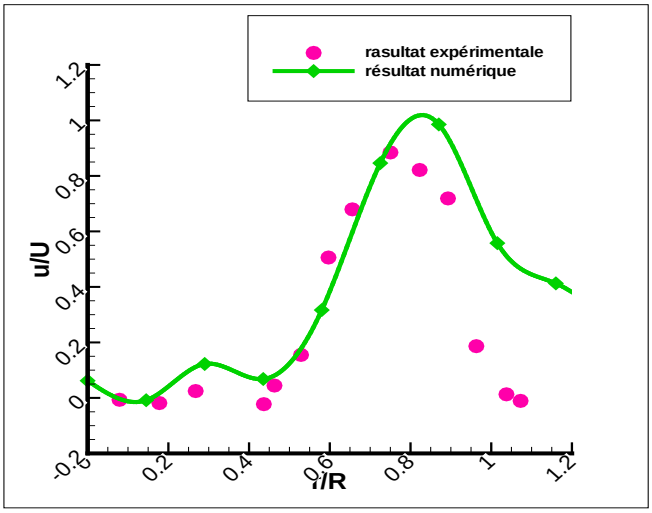


Y/R=5.20

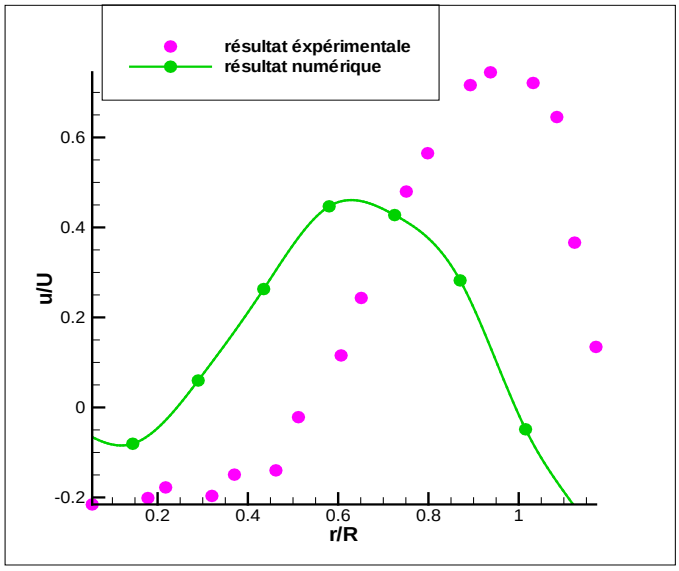
V.4.6.2- La comparaison de vitesse



Y/R=0.14



Y/R=0.38



Y/R=1.27

REFERANCES BIBLIOGRAPHIE

[1] MOUANGUE Ruben Martin, Contribution à la modélisation de la combustion turbulente non-prémélangée avec prise en compte de l'auto-allumage,Thèse de doctorat, Cameroun, 2011.

[2] Fréderic BUDA, Mécanisme cinétique pour l'amélioration de la sécurité des procèdes d'oxydation des Hydrocarbure, Thèse de Doctorat, Laurraine, 2006

[3] Clothilde Hoffmann , Des flammes sur le plateau Réalisation Lumière ,Dossier technique, 1970

[4] D. Veynante, *Flamme de diffusion laminaire,* Techniques de l'ingénieur **BE8320**(1999).

[5] G.T. Kalghatgi, *Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air*, Combust. Sci. and Tech. **41**, (1984).

[6] C. Lacour, *Stabilité de flammes laminaires partiellement prémélangées – Application aux brûleurs domestiques,* Thèse de Doctorat, INSA de Rouen, France (2006).

[7] L. Muniz and M. G. Mungal, *Instantaneous flame-stabilization velocities in lifted-jet diffusion flames,* Combustion and Flame (1997).

[8] T. Plessing, P. Terhoeven, N. Peters, and M. S. Mansour, *An experimental and numericalstudy of a laminar triple flame,* Combustion and Flame ,(1998).

[9] J. Lee and S.H. Chung,*Characteristics of reattachment and blowout of laminarliftedflames in partiallypremixed propane jets under normal and micro gravity conditions,* Combustion and Flame (2001).

[11] G.R. Ruetsch, L. Vervisch, and A. Linán, *Effects of heat release on triple flames,* Physics of Fluids (1995).

[12] T. Echekki and J. H. Chen, *Structure and propagation of methanol-air triple flames,* (1998).

[13] S.H. Chung and B.J. Lee, *Stabilization of liftedtribrachial flames in a laminar non premixed jet,* Combustion and Flame (1991).

[14] X. Qin, C.W. Choi, A. Mukhopadhyay, I.K. Puri, S.K. Aggarwal, and V.R.Katta, *Triple flame propagation and stabilization in a laminar axisymetric jet,* Combustion Theory and Modelling (2004).

[15]*Image wikimédia : http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Combustion_methane.png*

[16] J. T. Kiehl et Kevin E. Trenberth, « Earth'sAnnual Global MeanEnergy Budget », Boulder, Colorado

[17] http://www.cartage.org.lb/en/themes/biographies/MainBiographies/V/Volta/1.html

[18] http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thane

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

[20] *http://eduscol.education.fr/orbito/pedago/pileh2/pile31.htm*

[21] Brève d'Actualité Pour la science, n° 405, juillet 2011

[22] Brève [archive] avec Interview d'Edith Labelle, de l'Institut de technologie des procédés chimiques et de l'environnement du CNRC par nrc-cnrc. 2010

[23] Benjamin Dessus, Hervé Le Treut et Bernard Laponche, « Effet de serre, n'oublions pas le méthane » , *La Recherche* (ISSN 0029-5671) n° 417 (mars 2008)

[24] Fiore, A. M., D. J. Jacob, B. D. Field, D. G. Streets, S. D. Fernandes, and C. Jang (2002), *Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane*, Geophys ; *29(19), 1919, doi:10.1029/2002GL01560*

[25] Communiqué (daté de 2006) du CSIRO intitulé "Explaining the methane mystery", Reference: 06/188

[26] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Methane-2009.png?uselang=fr

[27] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AtmosphericMethane.png

[28] Fluent. Documentation .User Guid. Fluent Inc. (version 14)

[29] Books by J.o.Hinze. Turbulence, [.McGrawHill.PublishingCO.New.york, 1975].

[30] CFX. Documentation .User Guid. CFX Inc. (version 14).

[31]MEDGUEDAM Salah, « Etude numérique d'une flamme turbulente à la sortie d'injection co-courant hydrogène/air » thèse magister, université de Médéa (2010)

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a porté essentiellement sur la simulation numérique du phénomène de l'aérothermochimie turbulente dans une flamme de non-prémelange, utilisant un outil de calcul CFD : le code CFX sous Ansys.

On a traité le cas d'une flamme de diffusion de méthane-air. Le but est de montrer un cas pratique d'une combustion peu polluante et donnant lieu à des températures très élevées (de l'ordre de 2000 K).

La configuration étudiée est basée sur un jet axisymétrique et turbulent, tel qu'on peut rencontrer dans les flammes de diffusion (non-prémélange).

Au cours de cette simulation, on a utilisé le modèle k-ε (en turbulence) et le modèle EDM (en combustion) avec un mécanisme de réaction réduit à une seule étape.

Une étude paramétrique a été menée. On a examiné l'effet des conditions initiales sur la structure de la flamme (non-prémélange) ; en occurrence : la vitesse initiale et la température initiale.

On a remarqué que l'augmentation de la vitesse d'injection du méthane provoque un soufflage de la flamme loin du bec d'injection. Les zones à fort gradient de température sont poussées vers la sortie du tube, loin de l'injecteur ; ce qui favorise un refroidissement de la région du bec. Les grandes vitesses d'injection du combustible diminuent la température maximale à la zone centrale du tube ; tandis qu'elles favorisent une augmentation des températures près des parois. La température maximale diminue avec l'augmentation de la vitesse du combustible.

On remarque aussi 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; et donne lieu à une possibilité du retour de flamme, si le diamètre d'injection dépasse la distance de coincement de la flamme en question. La longueur de la flamme diminue avec l'augmentation de la température d'entrée.

On remarque que plus la vitesse d'entrée de l'air est élevée, plus la flamme s'accroche au bec d'injection. La température augmente continuellement au cours de l'avancement vers la fin de tube pour une faible vitesse d'entré d'air. Par contre, pour des grandes vitesses de l'air, la température augmente avec l'augmentation de la vitesse ; tandis que la longueur de la flamme diminue.

En outre, on a pu constater une bonne concordance qualitative entre les résultats numériques et expérimentaux. Cependant, on a remarqué que les résultats de la simulation diffèrent quantitativement des résultats expérimentaux, malgré le raffinement du maillage et le nombre élevé des itérations du calcul (plus de 6000 itérations).

Afin d'améliorer la qualité de la simulation, on propose de tester les autres modèles de combustion proposés par le code CFX. L'utilisation d'un mécanisme réactionnel plus détaillé pourra améliorer la qualité des résultats.

Listes des abréviations

Ppb : part per billion

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

INRA : L'Institut national de la recherche agronomique