

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

THEME

Etude de flammes pré-mélangés au Méthane-Hydrogène

Présenté par :

SOUIDI Ahmed Farouk

Promoteur : Mr.

HALOUANE Yacine

Promotion 2020- 2021

Remercient

A l'issue de ce mémoire, je tiens à remercier, tout d'abord et avec conviction, **ALLAH** le tout puissant qui m'a octroyé la persévérance, le courage et la patience de mener à terme cette noble tâche.

Je n'oublierai, non plus, de remercier vivement mon promoteur **Dr. HALOUANE Yacine** pour les efforts qu'il a consacrés pour me diriger dans la bonne conduite afin de mener à bien et atteindre les objectifs qui me sont assignés par la réalisation de ce mémoire.

Je me permets de saluer, amicalement, à travers ce modeste travail, les amis et les camarades sans pour autant oublier ceux qui ont contribué, de près ou de loin, par leur aide à la réalisation de mon travail.

Résumé :

L'hydrogène (H_2) est considéré comme une source d'énergie alternative, car il ne produit pas les gaz ayant l'effet de serre durant sa combustion, et même il a un pouvoir calorifique très élevé comparant avec les fossiles conventionnels. Récemment beaucoup de travaux sont dirigés dans le sens d'ajouter l'Hydrogène comme un combustible auxiliaire dans les installations énergétiques, dans le cadre d'étudier la possibilité d'utiliser l'Hydrogène comme un fuel alternatif.

Cette étude va présenter une simulation numérique d'une flamme turbulente pré-mélangée de Méthane/Hydrogène air stabilisé par swirl dans le but de la comparer avec les différents résultats expérimentaux. Les modèles Peter et Zimont pour traiter la combustion et le $k-\epsilon$ modèle pour la turbulence, on utilise de logiciel ANSYS-FLUENT pour la réalisation de cette étude.

Notre étude sera portée sur un brûleur élaboré par Robert Cheng et al 1995 qui ne cesse d'être développé jusqu'à ce jour. Le but de cette étude est de présenter l'effet d'ajouter l'hydrogène au mélange méthane/air dans un brûleur où la flamme serait stabilisée par une vanne annulaire swirler qui génère un faible nombre de Swirl (LSB).

Abstract:

Hydrogen (H_2) is considered as an alternative energy source, because it does not produce greenhouse gases (CO_2) during its combustion, and even it has a very high calorific value comparing with conventional fossils (CH_4). Much work is directed towards adding Hydrogen as an auxiliary fuel in energy installations (Burners), as part of the study of the possibility of using Hydrogen as an alternative fuel.

This study will present a numerical simulation of a turbulent flame pre-mixed of Methane / Hydrogen air stabilized by swirl in order to compare it with the different experimental results. The Peter and Zimont models to process the combustion and the $k-\epsilon$ model for the turbulence, we use ANSYS-FLUENT software for the realization of this study.

Our study will focus on a burner developed by Robert Cheng et al 1995 which continues to be developed to this day. The aim of this study is to show the effect of adding hydrogen to the methane / air mixture in a burner where the flame would be stabilized by a swirler ring valve which generates a low swirl number (LSB).

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène dans le méthane | 2 |
| I.1 Introduction..... | 2 |
| I.2 Combustion pré-mélangé dans des configurations de type «bruleurs» | 2 |
| I.3 Intérêt de l'ajout d'hydrogène..... | 3 |
| I.4 Etude de mélange méthane-hydrogène..... | 3 |
| I.5 Impact de l'ajout d'hydrogène sur les émissions Nox..... | 5 |
| I.6 Impact de l'ajout d'hydrogène sur la recirculation des produits de combustion et sur la température du four | 7 |
| I.7 limites d'inflammabilité et mécanisme d'extinction : interaction chimie/turbulence..... | 11 |
| I.8 Influence de l'ajout d'hydrogène | 11 |
| I.8.a Sur la structure et la position des zones de réaction | 11 |
| I.8.b Sur les températures et les concentrations des fumées | 13 |
| I.8.c Sur la concentration des fumées | 15 |
| Les avantages de l'ajout d'hydrogène au méthane | 16 |
| Les inconvénients de l'ajout d'hydrogène au méthane | 16 |
| Conclusion..... | 17 |
| I.9.Etude bibliographique..... | 17 |
| Chapitre. II : Modélisation et Procédure Numérique | 25 |
| II.1 Introduction..... | 25 |
| II.2 les écoulements réactifs | 25 |
| II.3 Les écoulements Swirlés | 26 |
| II.4 Hypothèses et formule mathématique..... | 27 |
| II.4.1 Variables de la thermochimie | 28 |
| II.4.2 Equations de conservation de masse et d'espèces..... | 29 |
| II.4.3 Equations de la quantité de mouvement | 30 |
| II.4.4 Equations de la conservation d'énergie | 31 |
| II.4.5 Facteurs stœchiométriques | 31 |
| II.5 Modélisation de la turbulence | 32 |
| II.5.1 Modèle k-ε standard | 32 |

| | | |
|---|---|-----------|
| II.5.2 | Modèle k- ϵ RNG | 33 |
| II.5.3 | Modèle k- ϵ réalisable | 34 |
| II.6 | Modélisation de la combustion | 35 |
| II.6.1 | Modèle partiellement pré mélangé | 35 |
| II.6.2 | Modèle d'équilibre et le modèle en fonction de densité de probabilité PDF | 36 |
| II.6.3 | Modèle C-Equation | 36 |
| II.6.4 | Modèle de Zimont | 37 |
| II.6.5 | Méthode des volumes finis | 38 |
| II.7 | Procédure Numérique | 38 |
| II.7.1 | La géométrie et configuration..... | 38 |
| II.7.2 | Calcul Paramétrique | 40 |
| | Conclusion | 44 |
| Chapitre III : Résultats et Discussions..... | | 45 |
| III.1 | Introduction..... | 45 |
| III.2 | maillage de calcul | 45 |
| III.3 | condition aux limites et opérateurs | 45 |
| III.4 | Validation des résultats expérimentaux | 50 |
| • | Pour Méthane-air | 50 |
| • | Mélange Méthane-Hydrogène-air | 52 |
| | Conclusion..... | 59 |
| Conclusion générale..... | | 60 |

Listes des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.5.1 les émissions de NOx en fonction d'hydrogène..... | 6 |
| Figure I.5.2 réalisées sur mesures l'installation de combustion sans flamme..... | 7 |
| Figure I.5.3 Emissions de NOx en combustion sans flamme (a) méthane pur (b) hydrogène pur..... | 7 |
| Figure I.6.1 « Clean mild combustion » pour le méthane pur, et deux mélanges méthane/hydrogène..... | 8 |
| Figure I.6.2 Champs de température..... | 9 |
| Figure I.6.3 Distribution de température pour différentes compositions du carburant..... | 10 |
| Figure a.1 Evolution de l'intensité des zones de réaction et du signal des parois..... | 12 |
| Fig. 9.1. L'effet d'ajout d'hydrogène à la fraction massique de NO sur l'axe de la flamme..... | 18 |
| Fig. 9.2. L'effet d'ajout d'hydrogène à la fraction massique de NO | 18 |
| Figure II.7.2.1Schéma du brûleur LSB et de la chambre de combustion..... | 39 |
| Figure II.7.2.2 Structure de géométrie..... | 40 |
| Figure III.1 structure de maillage..... | 46 |
| Figure III.2 vitesse axiale sur l'axe du brûleur pour différents nombres de maillage..... | 47 |
| Figure III.3 vitesse axiale sur le rayon du brûleur pour différents nombres de maillage..... | 47 |
| Figure III.4 Température (K) sur le rayon du brûleur pour différents nombres de maillage..... | 48 |
| Figure. III.5 Condition aux limites..... | 49 |
| Figure III.6. Comparaison des profils à section horizontale de richesse 0.7 au point X=6mm..... | 52 |
| Figure III.7Comparaison des profils de vitesse axiale sur la section verticale du brûleur..... | 53 |
| FigureIII.8Comparaison des profils de vitesse sur la section horizontale du brûleur de à X=10mm..... | 54 |
| FigureIII.9Comparaison des profils de vitesse sur la section horizontale du brûleur de à X=10mm..... | 55 |
| FigureIII.10 Comparaison des profils d'énergie cinétique vitesse sur la section horizontale du brûleur à X=10m..... | 56 |
| Figure III.11 Comparaison des contours de progresse variable entre le résultat numérique en 3D de TFC de Muppala et la simulation numérique en 2D..... | 57 |
| Figure III.12 Comparaison des contours de vitesse axiale le résultat numérique en 3D de TFC de Muppala et la simulation numérique en 2D..... | 58 |
| Figure III.13 Comparaison des vecteurs de vitesse axiale entre l'expérimentale et la simulation numérique (0.75 H ₂ – 0.25CH ₄)..... | 59 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Propriétés chimiques du méthane et de l'hydrogène..... | 4 |
| Table2. 5.1 Constantes du modèle k- ϵ standard..... | 33 |
| II.7.3 Tableau des calculs pour chaque cas..... | 44 |
| Tableau III.2.1 tableau de maillage..... | 45 |
| TableauIII.3.1 Condition opératoires..... | 48 |
| TableauIII.3.1 Condition aux limites sur la plaque perforée axiale et l'espace annulaire..... | 50 |

Lettres Latines

| Symbol | | unité |
|------------|--|------------------------------------|
| c | Variable d'avancement de la réaction | [-] |
| \bar{c} | Variable d'avancement de la réaction moyenne | [-] |
| C_p | Capacité calorifique à pression constante | [J/kgK] |
| C_v | Capacité calorifique à volume constant | [J/kgK] |
| D | Diamètre du bec du bruleur | [m] |
| D_h | Diamètre hydraulique | [m] |
| DK | Coefficient de diffusion de l'espèce k | [-] |
| F | Force de volume | [m / S ²] |
| $G\varphi$ | Débit du moment cinétique angulaire | [N. m] |
| G_X | Débit de quantité de mouvement axiale | [N] |
| ht | Enthalpie totale | [J / Kg ⁻¹] |
| $hs,$ | Enthalpie sensible de l'espèce k | [J/kg] |
| I | Intensité turbulente | [%] |
| K | Énergie cinétique turbulente | [m ² / S ²] |
| mk | Masse de l'espèce k | [kg] |
| M | Masse totale du gaz | [kg] |
| N | Nombre d'espèces | [-] |
| P | Pression statique | [Pa] |
| Pr | Nombre de Prandtl | [-] |
| Pr_t | Nombre de Prandtl turbulent | [-] |
| Q | Source de chaleur | [J / m ³ s] |
| Re | Nombre de Reynolds | [-] |
| r | Composante de direction radiale | [m] |
| S | Nombre de swirl | [-] |

| | | |
|-------------|--|----------|
| <i>Sch</i> | Nombre de Schmidt | [-] |
| <i>Scht</i> | Nombre de Schmidt turbulent | [-] |
| T | Température | [K] |
| <i>t</i> | Temps | [s] |
| <i>Ut</i> | Vitesse de flamme turbulente | [m/s] |
| <i>U'</i> | Vitesse de fluctuation | [m/s] |
| <i>w</i> | Composante tangentielle de vitesse | [m/s] |
| <i>Uax</i> | La vitesse axiale (zone axiale) | [m/s] |
| <i>Uan</i> | La vitesse annulaire | [m/s] |
| <i>Uaxs</i> | La vitesse axiale (zone annulaire) | [m/s] |
| <i>Us</i> | La vitesse swirl | [m/s] |
| <i>U0</i> | Vitesse d'entrée moyenne | [m/s] |
| <i>Vk,</i> | Vitesse de diffusion de l'espèce k dans la direction i | [m/s] |
| <i>W</i> | Masse moléculaire | [kg/mol] |
| <i>X</i> | Composante de direction axiale | [m] |
| <i>Y</i> | Fraction massique i,j Axes de directions | [-] |

Lettres grecques

| | | |
|---------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| ε | Taux de dissipation de la turbulence | [m ² /S ³] |
| λ | Conductivité thermique | [W/mK] |
| μ | Viscosité dynamique | [Kg/ms] |
| μ_t | Viscosité turbulente | [Kg/ms] |
| ν | Viscosité cinématique | [m ² / s] |

| | | |
|---------------|---|------------------------------------|
| ρ | Masse volumique du fluide | $[\text{kg}/\text{m}^3]$ |
| τ_{ij} | Tenseur des forces visqueuses | $[\text{N}/\text{m}^2]$ |
| Φ | Richesse du mélange en CH_4 | $[-]$ |
| R | Flux de diffusivité moléculaire | $[\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}]$ |
| σ_{ij} | Tenseur de la contrainte | $[\text{N}/\text{m}^2]$ |
| δ_{ij} | Delta de Krönecer (=1 si $i=j$, =0 sinon) | $[-]$ |
| ω_k | Taux de production de l'espèce k | $[\text{mole}/\text{m}^2\text{s}]$ |
| ω_T | Taux de dégagement de chaleur due à la combustion | $[\text{J}/\text{m}^3\text{s}]$ |

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Au cours de l'évolution humaine, il a été constaté que la combustion a connu un développement significatif. Dans certaines technologies, la combustion contribue au développement économique pour répondre aux besoins d'une meilleure. Les combustibles fossiles qui sont à l'origine d'une production d'énergie issue d'une combustion ne sont que des ressources limitées.

La rigueur des normes antipollution exigent les industriels du secteur de l'énergie à effectuer des recherches pour améliorer les procédés de combustion en vue de réduire la consommation de combustible et de limiter les émissions polluantes tels que les oxydes d'azote (NOx) et l'oxyde de carbone (CO).

Compte tenu des normes antipollution, les scientifiques poussent leurs recherches d'optimisation afin de réduire les émissions polluantes. Les bruleurs à faible tourbillon (LSB) préservent, par sa technique de stabilisation des flammes, les installations industrielles et offre, par conséquent, des résultats les plus satisfaisants en matière de réduction des émissions polluantes.

Les espèces polluantes que représentent l'oxyde de carbone (CO) et l'oxyde d'azote (NOx) peuvent être réduites par une amélioration de la combustion tout en changeant le diamètre et la géométrie du bruleur et en diminuant la richesse du mélange réactif ou bien en diminuant le nombre de tourbillon (swirl) ou par enrichissement en hydrogène parfait.

Le but du présent travail est de faire des études de simulation numérique sur un écoulement bidimensionnel pré mélangé réactif. Cette étude s'oriente sur l'effet de l'ajout d'hydrogène au mélange méthane/air dans un bruleur à faible swirl avec différents richesses.

Le premier chapitre présente un aperçu général sur les combustions et les bruleurs ainsi que des recherches bibliographiques.

Dans le deuxième chapitre présent les formulations mathématiques de notre problème et la modélisation de la combustion turbulente pré mélangé ainsi que les modélisé, on s'intéresse aussi à réaliser une simulation numérique.

Dans le quatrième chapitre nous avons représenté les différents résultats obtenus suivis par des interprétations et des discussions pour deux valeurs de richesse.

CHAPITRE I : LES IMPACTS DE L'AJOUT
D'HYDROGENE AU CARBURANT CONVENTIONNEL

I.1 Introduction

Ce chapitre sera réservé à l'ajout d'hydrogène au méthane dans le brûleur tout en précisant son intérêt et son impact sur les émissions polluantes, sur la recirculation des produits de combustion, sur la température et les limites d'inflammabilité et sur le mécanisme d'extinction :

- Interaction chimie/turbulence.
- Influence de l'ajout d'H₂ sur la structure de flamme.
- La position des zones de réaction.
- Influence de l'ajout d'H₂ sur les T° et les concentrations des fumées.

A l'issue de ce qui a précédé, nous en déduisons les avantages et les inconvénients de l'ajout d'hydrogène dans un brûleur.

I.2 Combustion pré-mélangé dans des configurations de type «brûleurs»

Les avantages qui proviennent de l'ajout d'hydrogène constituant également, un intérêt de grande importance à l'industrie des turbines à gaz.

Des études fondamentales ont été engagées sur des brûleurs pour mettre en apparence l'influence et l'impact de l'ajout d'hydrogène. Il est apparu que la flamme reste stable à des températures et des richesses plus faibles d'où une diminution de la production des émissions d'oxyde d'azote (NO_x). D'autres études ont été, également, réalisées sur une flamme pauvre pré-mélangée stabilisée par un swirl. Cela a conduit que la combustion a eu lieu à pression atmosphérique à l'intérieur d'une chambre en quartz refroidie par air. Le pré-mélange méthane/air est enrichi en hydrogène jusqu'à 20% de son volume. Les résultats obtenus ont montré que l'introduction d'une faible quantité d'hydrogène au pré-mélange méthane/air est à l'origine d'une baisse des émissions d'oxyde de carbone (CO) sans pour autant augmenter les émissions de l'oxyde d'azote (NO_x). De par la forte concentration des radicaux OH (mesures obtenues par fluorescence plan induit par laser), il est apparu que la stabilité de la flamme a, largement, augmenté. D'autant plus, l'ajout de l'hydrogène diminue la taille de la flamme. D'autres études numériques ont fait, également, ressortir que l'ajout d'hydrogène augmente, largement, la résistance à l'étirement de la flamme et la limite basse de stabilité [19].

I.3 intérêt de l'ajout d'hydrogène

L'opération d'enrichissement d'un pré-mélange de méthane /air par l'hydrogène s'opère dans le but de réduire les émissions polluantes.

L'application des normes antipollution deviennent de plus en plus sévères. Les industriels spécialisés dans la conversion d'énergie (moteur à combustion interne, turbines à gaz terrestres ou aéroportées) doivent d'inquiéter en permanence de la qualité de leur produits pour diminuer leurs émissions polluantes. La stratégie qu'il faudrait prévoir pour aboutir à une réduction des polluants est la combustion en mélange pauvre. A température de combustion réduite, les émissions d'oxyde d'azote (NOx) diminueront automatiquement (production des NO thermique).

Il apparait que lorsqu'on s'approche des limites d'inflammabilité, la stabilité de la flamme est menacée et les phénomènes de d'extinction peuvent apparaitre, ce qui provoque l'augmentation des émissions d'hydrocarbure imbrulées. La stabilité de la flamme constitue un paramètre de grande importance pour la combustion. Il est, donc, impératif de maîtriser les configurations industrielles.

De nombreuses études menées démontrent que l'ajout d'hydrogène au mélange solutionne le problème. Effectivement, l'adjonction de petites quantités d'hydrogène à un mélange méthane/air étendra les limites d'inflammabilité de mélange et accroîtra la stabilité de la combustion.

I.4 Etude de mélange méthane-hydrogène

Plusieurs raisons, de par leur importance, nous conduisent à l'utilisation de l'hydrogène comme combustible. Il est clair que l'eau est l'unique produit de combustion de l'hydrogène. L'utilisation de l'eau sert à éliminer l'émission du dioxyde de carbone(CO₂) de l'endroit où se situe l'installation de la combustion. De plus, son avantage réside dans la possibilité d'utiliser les combustibles contenant une quantité importante d'hydrogène et ce dans le but de créer de l'énergie et de la chaleur tout en minimisant l'émission des polluants, en dégageant une importante efficacité thermique et un processus peu couteux [12].

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

L'hydrogène est un corps plus réactif que le méthane. En effet, la vitesse de la flamme laminaire du méthane. Alors que la masse volumique de l'hydrogène est très faible 0.0899kg/m^3 à 0°C , contre 0.717kg/m^3 pour le méthane(CH_4), Tableau1.

Tableau 1 : Propriétés chimiques du méthane et de l'hydrogène (source Association Française de l'Hydrogène).

| | Gaz naturel (méthane CH_4) | Hydrogène H_2 |
|--|---|--|
| Masse molaire (g/mol) | 16 | 2 |
| Masse volumique (conditions atmosphériques) (en kg/m^3) | 0.7 | 0.08 |
| Chaleur de combustion (inférieure) (en kJ/g) | 50 | 120 |
| Limite du domaine d'inflammabilité dans l'air (en %vol) | 5.3-15.0 | 4.0-75.0 |
| Energie minimale d'inflammation (en mJ, pour mélange stœchiométrique à pression et température ambiante) | 0.29 | 0.02 |
| Température d'auto-inflammation (en $^\circ\text{C}$) | 540 | 585 |
| Température de flamme (en $^\circ\text{C}$) | 1875 | 2045 |
| Limite de détonabilité (en %vol) | 6.3-13.5 | 13-65 |
| Energie explosive (en kg TNT/ m^3) | 7.03 | 2.02 |
| Coefficient de diffusion dans l'air (en cm^2/s) | 0.16 | 0.61 |
| Vitesse de flamme dans l'air (cm/s) | 37 | 260 |
| Vitesse de détonation dans l'air (km/s) | 1.8 | 2 |

I.5 Impact de l'ajout d'hydrogène sur les émissions NO_x

Il semble à travers cette partie, nous sommes tenus à étudier l'influence sur les émissions d'oxyde d'azote par le remplacement de l'hydrogène par une partie de méthane.

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

En utilisant un mélange hydrogène, l'augmentation de la température de préchauffage de l'air provoque une production élevée d'oxyde d'azote (NO_x). Cette tendance est illustrée grâce aux mesures réalisées sur l'installation de combustion diluée de politecnico di milano et résumé par la figure 1.

L'installation en question conduit à reproduire le régime de combustion sans flamme en brûlant du combustible avec de l'air chaud préalablement dilué avec une grande quantité de matière inerte. La quantité de matière dilution. La figure 1 représente les émissions NO_x en fonction du taux de dilution à différentes températures de préchauffage de l'air aux mélanges CH₄/H₂ (70/30%) (Figure a) et 40/60% (figure b) exprimé en volume. De même pour une certaine composition de mélange combustible à températures de préchauffage données ; les émissions d'oxyde d'azote (NO_x) diminuent inversement au taux de dilution. Ces deux tendances sont semblables à celles observées dans la combustion sans flamme au méthane.

De plus, la « figure b » met aussi en évidence que les faibles températures de préchauffage réduisent le taux d'oxydation du combustible et augmentent le temps caractéristique de combustion. De cette façon, les combustibles hautement réactifs, tel que l'hydrogène, peuvent avoir un comportement identique à celui du méthane produire de très faibles émissions de NO est obtenu, par conséquent, une combustion diluée stable à différents taux de recirculation.

Il est à noter que plus le mélange contient de l'hydrogène, plus le taux de recirculation est élevé pour atteindre des émissions de NO_x peu importantes. Ainsi, il devient difficile de déplacer le front de flammes dans la chambre de combustion afin d'éviter les pics de température et la formation de NO [13].

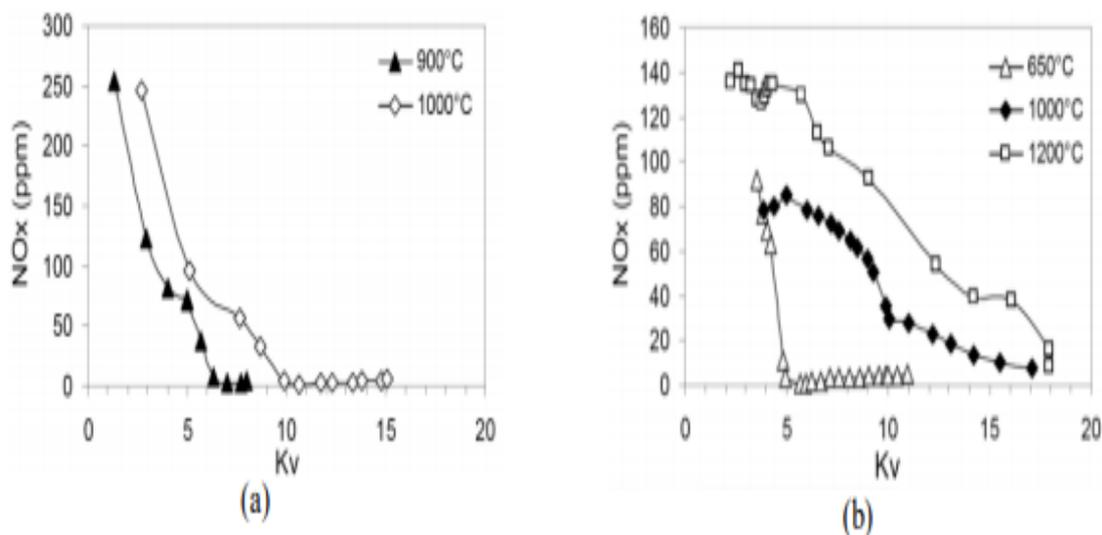


Figure I.5.1 les émissions de NOx en fonction d'hydrogène [13].

La figure 2 résumé l'évolution des émissions d'oxyde d'azote (NOx) en fonction du taux d'hydrogène dans le mélange. Ainsi, les émissions de NOx augmentent proportionnellement avec la quantité d'hydrogène du combustible (c'est-à-dire que l'augmentation de l'hydrogène provoque l'augmentation des émissions NOx). Il est, également, important de noter que l'influence de la quantité d'hydrogène dépend du type d'installation. Par exemple, sur l'installation d'ENEL, dont les taux de dilution ne sont pas important compte-tenu de la réinjection d'une faible partie des gaz brûlés juste à la sortie du brûleur 2, car l'ajout d'hydrogène à hauteur de 10% provoque un accroissement significatif des émissions de NOx.

Par contre dans le cas de l'installation de GASUNIE (2005, avec un brûleur, JDDC 150, coflow d'air et de combustible à forte vitesse), au four industriel dont le grand volume de la chambre de combustion favorise des recirculations naturelles, ainsi l'ajout d'hydrogène, jusqu'à 55% en volume, ne modifie pas les émissions de NOx.

L'augmentation des émissions d'oxyde d'azote (NOx) est principalement due à la présence d'une petite zone de combustion de type flamme de diffusion à la sortie du brûleur. Cette zone de réaction favorise les pics de température d'où la production de NOx par voie thermique [15].

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

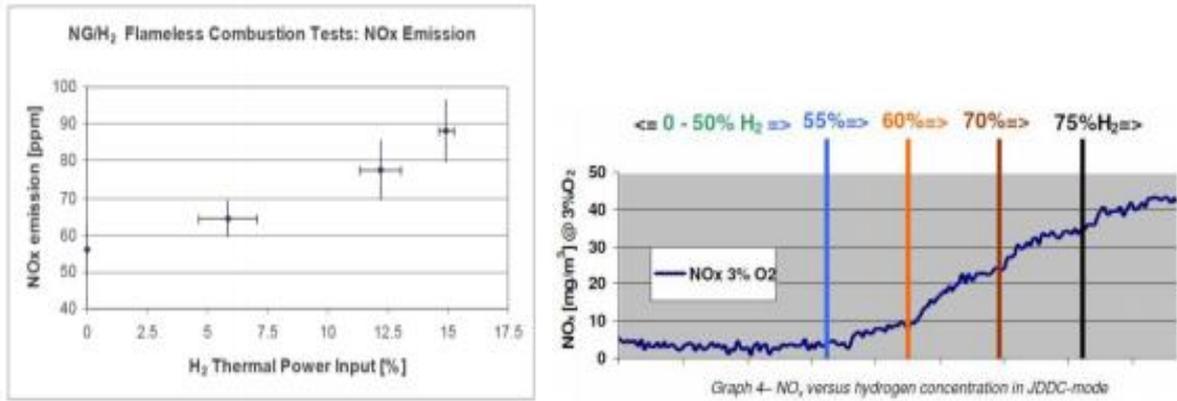


Figure I.5.2 réalisées sur mesures l'installation de combustion sans flamme [15].

Quand au cas du méthane pur, la contribution principale est apportée par la voie de formation thermique qui représente plus de 90% des émissions totales. Quand il s'agit de l'hydrogène pur, les émissions de NO_x, par absence de composé carboné, sont constituées, exclusivement, par voie thermique. Dans un pareil cas, les émissions de NO_x sont supérieures à 100 ppm si le taux de recirculation est maintenu en dessous de 100%. Alors, les émissions de NO_x baissent rapidement sous 100 ppm au moment où le taux de recirculation devient supérieur à 2. Par augmentation du taux de recirculation, la dilution du mélange avant réaction s'accroît, ce qui, par conséquent, limite la formation de points chauds d'où la formation de NO_x par voie thermique.

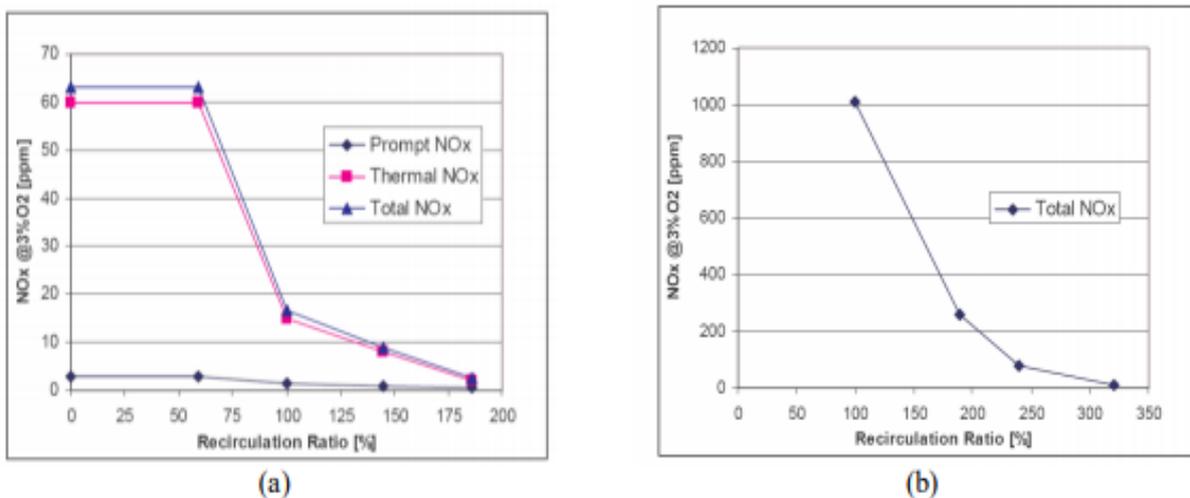


Figure I.5.3 Emissions de NO_x en combustion sans flamme (a) méthane pur (b) hydrogène pur [15].

I.6 Impact de l'ajout d'hydrogène sur la recirculation des produits de combustion et sur la température du four

Dans le cas d'installations fonctionnant au méthane pour lesquelles la recirculation est faible ou est forcée, l'ajout d'hydrogène oblige une augmentation importante du taux de recirculation pour atteindre un seuil faible d'émissions de NO_x. Ce seuil est dominé par la réactivité du mélange.

Derudi et Villani ont observé plusieurs effets positifs sur la stabilité de la combustion sans flamme. La Figure 6.1 représente les domaines d'existence de la combustion sans flamme (température de four et taux de dilution) en fonction de la nature du combustible. Grâce à l'ajout d'hydrogène, la température d'auto-inflammation est plus basse, la gamme d'inflammabilité est plus importante et la combustion a tendance à produire une plus grande quantité de radicaux H, ce qui autorise la combustion sans flamme à s'étendre vers des environnements très dilués et à des températures moyennes de four plus faibles [20].

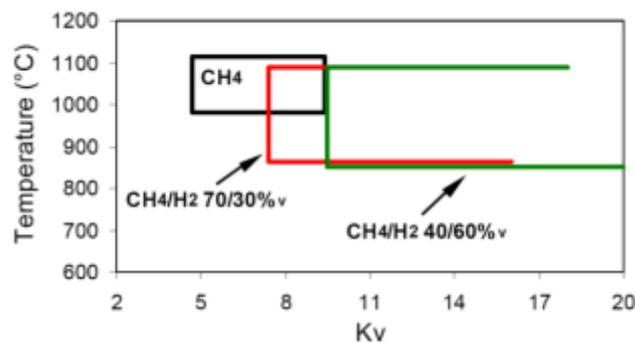


Figure I.6.1 « Clean mild combustion » pour le méthane pur, et deux mélanges méthane/hydrogène [20].

Les auteurs observent qu'en dessous du seuil de température défini par la région d'existence de la combustion sans flamme, l'efficacité de la combustion diminue ce qui provoque une production importante de CO avec une diminution importante du CO₂. La forte réactivité du mélange combustible, lorsque de l'hydrogène est présent, permet d'atteindre le régime de combustion sans flamme même pour des environnements très dilués. Ceci laisse aussi supposer que l'hydrogène pourrait être utilisé pour doper des carburants à faible pouvoir

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

calorifique dans le but d'obtenir une combustion plus efficace, favorisant l'oxydation complète des hydrocarbonés. L'hydrogène pourrait être utilisé même dans des écoulements très dilués et prévenir ainsi la formation de polluants et principalement les hydrocarbonés imbrûlés et les suies.

Les résultats de Derudi et al. Sont confirmés par Galletti et al, qui ont simulé numériquement l'installation de combustion diluée de Politecnico di Milano (Figure 6.2). Lorsque de l'hydrogène est ajouté au méthane, un taux de recirculation plus grand est nécessaire pour atteindre le régime de combustion sans flamme, puisqu'il est possible d'observer, que la zone à haute température est plus grande lorsque le combustible est un mélange méthane – hydrogène, pour un même taux de dilution (figure c).

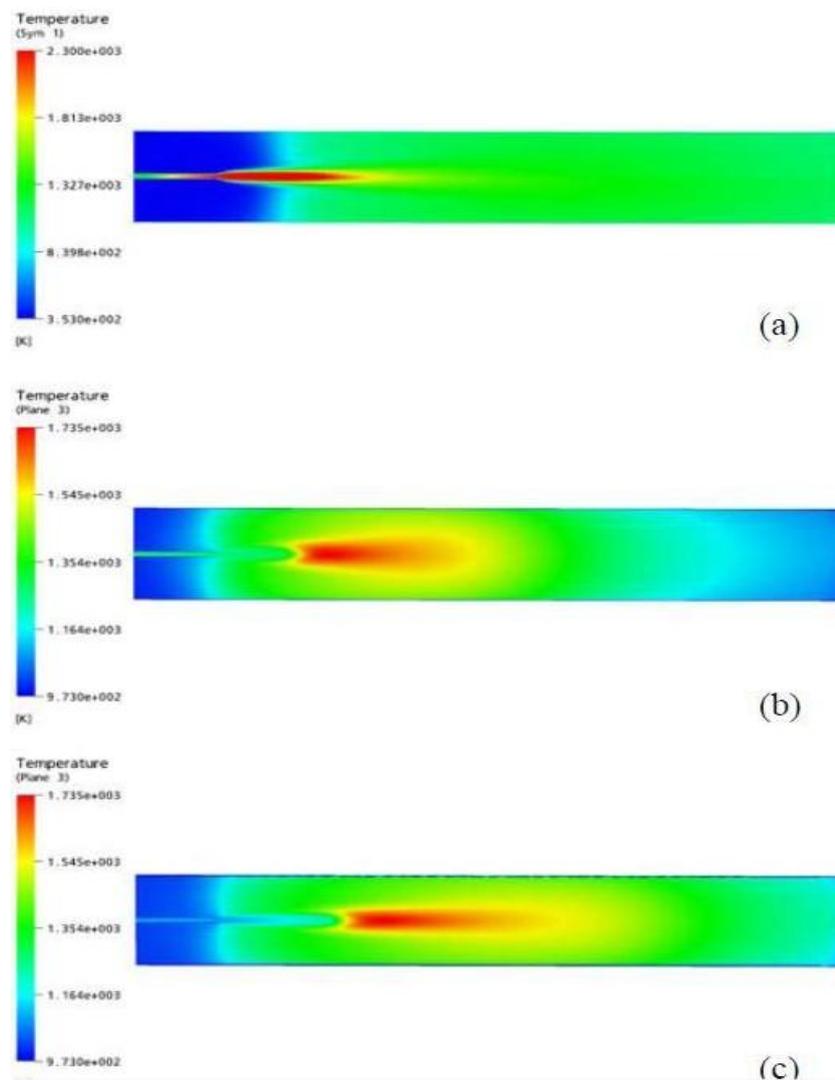


Figure I.6.2 Champs de température pour (a) le méthane en combustion classique, (b) combustion sans flamme, (c) un mélange méthane/hydrogène [20]

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

De même, les résultats des simulations obtenus dans le cas d'un brûleur autorégénératif de 13kW fonctionnant en régime de combustion sans flamme (ENEL) lorsqu'il est alimenté par du méthane permettent d'arriver à la même conclusion. Sur la Figure 6.3, le champ de température (a) est calculé pour du méthane pur. Dans ce cas, la température est homogène au sein de la chambre de combustion. Lorsque l'on ajoute de l'hydrogène, la température maximale augmente et la zone de flamme devient visible. La recirculation des gaz brûlés n'est plus suffisante pour assurer les conditions nécessaires pour atteindre le régime de combustion sans flamme lorsque l'on ajoute de l'hydrogène au méthane. Pour le champ de température (c), le brûleur fonctionne avec un degré de recirculation de 102%. Les émissions de NO_x prédites s'élèvent à 64ppmv, les performances du brûleur pourraient être améliorées en augmentant le taux de recirculation. Dans leur configuration, ceci pourrait être réalisé en diminuant la section d'injection de l'air, ce qui permettrait d'augmenter la vitesse de l'air et donc d'augmenter l'entraînement des produits de combustion. En effet, en diminuant la section de moitié, le taux de recirculation augmente jusqu'à 143% et les émissions de NO_x décroissent à 13ppm_v.

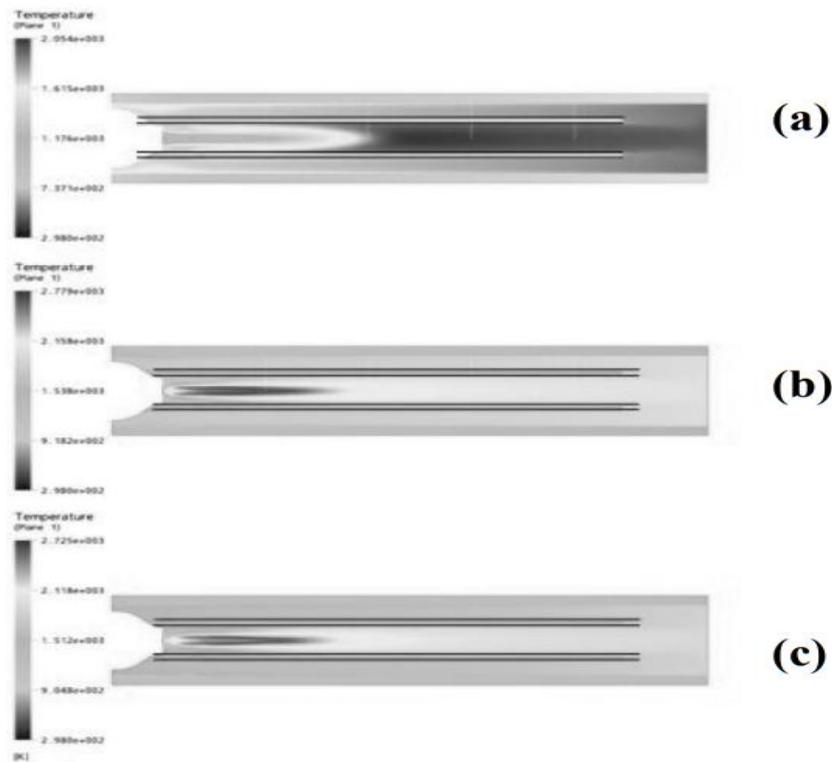


Figure I.6.3 Distribution de température pour différentes compositions du carburant :(a) 0% H₂; (b) 4.8% H₂; (c) 11.2 % H₂ [20]

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

Dans le cas où la géométrie du brûleur ne permet pas des recirculations importantes, l'ajout d'hydrogène peut nécessiter un changement de géométrie du brûleur pour atteindre le régime de combustion sans flamme puisque des taux de recirculation plus importants sont nécessaires pour avoir une combustion propre lorsque l'hydrogène est ajouté au combustible (Donatini,- 2007). En revanche, dans le cas de fours industriels pour lesquels les dimensions de la chambre de combustion sont grandes par rapport au diamètre du brûleur, les recirculations sont suffisamment importantes pour atteindre le régime de combustion sans flamme sans, à priori, changement de géométrie du four (mesures IFRF avec le gaz de cokerie, Adolfi-2005, et mesures GASUNIE, Slim-2005) [7].

I.7 limites d'inflammabilité et mécanisme d'extinction : interaction chimie/turbulence

Un ajout d'hydrogène au méthane augmente les performances du brûleur en diminuant la température en dessous de laquelle la combustion n'est plus propre et en augmentant le taux de recirculation maximum. Si l'on compare avec le méthane, les combustibles hybrides contenant de l'hydrogène nécessitent une plus importante dilution en oxygène et une plus grande vitesse d'éjection pour obtenir un régime de combustion stable. Mais ils permettent de faire fonctionner le brûleur à des températures de four plus faibles. En utilisant de l'H₂ pur, il est possible d'atteindre le régime de « combustion diluée propre » à des températures beaucoup plus faibles que celles obtenues pour les mélanges. Un régime de combustion diluée « froid » a été observé pour des températures de four proche de 500°C avec un préchauffage de l'air à 200°C (Derudi-2007). Il a aussi été mis en évidence une limite haute de température de environ 1100°C quelque soit le combustible, au dessus de laquelle les émissions de NO_x deviennent importantes.

I.8 Influence de l'ajout d'hydrogène

I.8.a Sur la structure et la position des zones de réaction

La Figure a.2 présente les images moyennes de chimiluminescence obtenues pour le préchauffage de l'air T=565 °C et le taux d'aération $\lambda=1.18$, en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans le combustible. A partir de ces images moyennes, il est possible

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

d'évaluer le niveau du signal d'émission des zones de réaction et des parois. Leurs évolutions, sont tracées sur le graphique Figure a.1. L'ajout d'hydrogène provoque une modification du rayonnement des parois et donc du signal de fond sur l'imagerie moyenne de chimiluminescence, c'est pourquoi ce rayonnement moyen est soustrait à l'évolution du signal des zones de réaction principale et secondaire. L'intensité de la zone de réaction principale augmente de manière très importante dès qu'on ajoute 10% d'hydrogène dans le combustible. En effet, l'intensité moyenne dans la zone de réaction principale est triplée dès l'ajout de seulement 10% d'hydrogène. Ensuite à partir de 30% d'H₂ elle diminue, elle est probablement liftée vers le haut du fait des fortes vitesses (à 40% d'H₂, la vitesse du jet de combustible atteint 60m/s).

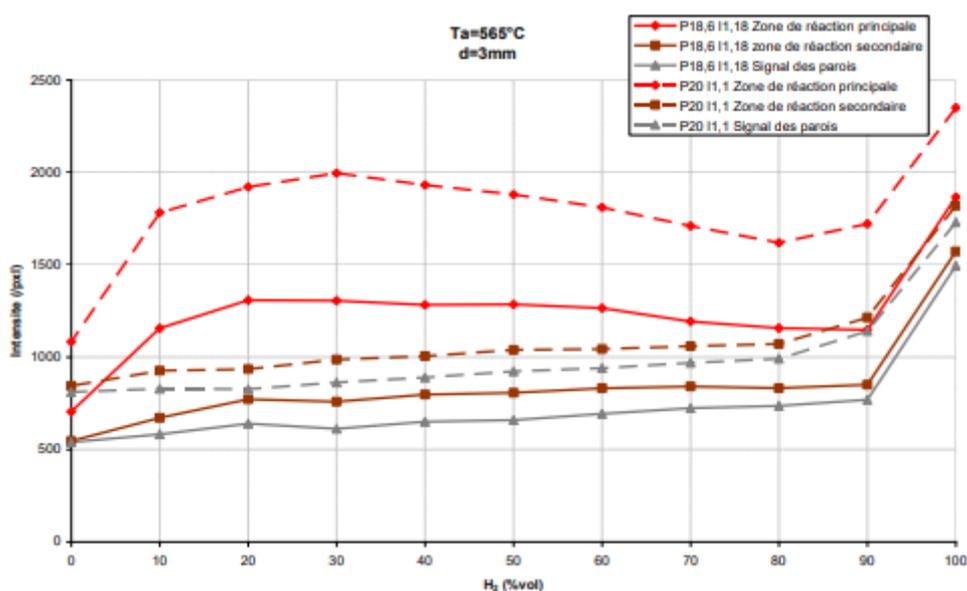


Figure a.1 Evolution de l'intensité des zones de réaction et du signal des parois en fonction du pourcentage d'hydrogène dans le mélange combustible, Ta=565°C [16]

En revanche, la zone de réaction secondaire (entre les jets de combustible et l'oxygène présent dans les gaz recerclant) devient nettement discernable dès l'ajout de 10% d'H₂ et son intensité croit avec le pourcentage d'hydrogène: la réactivité du mélange combustible est augmentée par l'ajout d'hydrogène, en effet, l'hydrogène est un composé nettement plus réactif que le méthane (la vitesse de flamme laminaire de l'hydrogène dans l'air est 6 fois plus grande que la vitesse de flamme laminaire du méthane. A 10% d'H₂, il est possible d'observer une extinction locale de la zone de réaction secondaire en sortie de brûleur probablement du

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

fait d'un fort étirement entre le jet de combustible à grande vitesse et les gaz brûlés environnant à vitesse quasi nulle. Cette extinction locale disparaît pour 10% d'H₂ : malgré l'augmentation de la vitesse du jet de combustible (+7m/s), le mélange est suffisamment réactif pour empêcher l'extinction locale de la flamme par étirement [16].

Finalement, en fonctionnement à l'hydrogène pur, le rayonnement des parois est très intense, et l'intensité des zones de réaction continue à augmenter. La zone de réaction principale est décalée vers le haut par les fortes vitesses d'injection qui contrebalancent la plus forte réactivité du mélange à forte concentration en hydrogène. Cependant, la combustion obtenue présente les mêmes caractéristiques globales que la combustion sans flamme au méthane pur et le régime de combustion reste très diluée [21].

I.8.b Sur les températures et les concentrations des fumées

La température des fumées augmente en fonction du pourcentage d'H₂. Ces fumées, lorsqu'elles recerclant, viennent chauffer les parois du FOUR. C'est pourquoi, la température des parois augmente avec le pourcentage d'hydrogène. De même, le signal des parois s'intensifie lorsque le pourcentage d'H₂ croît : leur rayonnement dans le visible étant proportionnel à la température du réfractaire. La variation de température des parois ($\Delta T=50-55^{\circ}\text{C}$) est la même que la variation de température des fumées. La concentration en O₂ mesurée augmente avec le pourcentage d'hydrogène.

La concentration en CO₂ dans les fumées diminue lorsque l'on augmente le pourcentage d'hydrogène. En effet, en augmentant le pourcentage d'hydrogène, on diminue celui de méthane, donc le combustible contient moins d'atome de carbone, la réaction de combustion produit moins de CO₂. On observe une différence entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques. Cet écart a été retrouvé en dépit de plusieurs séries de mesures, et de la vérification de l'étalonnage de l'analyseur. Il semble dû à un dysfonctionnement de l'analyseur de CO₂.

La concentration en NO_x augmente légèrement jusqu'à 40%, puis diminue jusqu'à 100%. On retrouve les mêmes évolutions que celles mises en évidence par imagerie de chimiluminescence. D'abord, une augmentation intense des zones de réaction qui laissent supposer une augmentation du NO thermique. Ensuite, après 40%, les zones de réaction se déplacent plus en aval : le régime de combustion est de plus en plus dilué. Les émissions de NO_x diminuent légèrement malgré la plus forte réactivité du mélange à forte teneur en H₂.

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

Même si le PCI diminue lorsque H_2 augmente, le débit et la réactivité du combustible sont suffisamment importants pour provoquer une augmentation de la température des fumées (et donc une augmentation de la température dans les zones de combustion). Cependant, la combustion est suffisamment diluée pour éviter la création de point très chaud et donc la formation d'oxydes d'azote. En effet, lorsque le combustible contient de l'hydrogène, la vitesse de flamme laminaire augmente (Ilbas-2006, Huang-2006) : la combustion est plus stable (la vitesse de flamme laminaire et les limites d'inflammabilité augmentent (Wierzbowski, 2000)). La dilution par le CO_2 (présent dans les gaz brûlés qui recirculent) diminue la vitesse de flamme laminaire (Natarajan-2007), ce qui permet de contrebalancer l'effet de l'ajout d'hydrogène tant que le brûleur ne fonctionne pas à l'hydrogène pur [22].

La combustion du méthane pur dégage moins d'eau que la combustion de l'hydrogène. Ainsi, la combustion d'un mètre cube ($1m^3$) de méthane pur produit $12,24 m^3$ d'eau représentant 16,3% du volume des fumées. Par contre la combustion d'un m^3 d'hydrogène produit un volume d'eau de $3,31 m^3$ ceci représente 30,2% du volume des fumées. Il s'avère, toute fois, que le volume des fumées calculé à partir de fumées sèches ou humides décroît quand le pourcentage d'hydrogène augmente. La diminution du volume des fumées est à l'origine de la réduction des pertes de chaleur du fait que pour une puissance constante le volume à chauffer est moindre. La température des parois augmente ce qui laisse à supposer que la combustion dans le four s'intensifie, donc elle dégage plus de chaleur. La température locale s'accroît en fonction du taux d'hydrogène présent dans le combustible. L'ajout d'hydrogène réduit la quantité d'énergie rayonnée par la zone de réaction. Effectivement, la formation de dioxyde de carbone (CO_2) est réduite en augmentant le volume d'hydrogène. L'augmentation du volume d'eau dans les fumées, et donc l'augmentation de l'énergie rayonnée due à cette espèce n'est pas suffisante par contrebalances la diminution du rayonnement due à la diminution du CO_2 (Choudhuri, 2003). La température locale augmente, non seulement, par la forte énergie spécifique de l'hydrogène mais aussi à cause de la baisse des pertes par rayonnement (Parente, 2008) et de la réduction des pertes de chaleur dans les fumées.

Le taux de recirculation est plutôt stable même s'il présente une légère hausse due à l'augmentation de l'impulsion des jets de combustibles. L'impulsion du jet d'air décroît en augmentant le pourcentage d'hydrogène dans le mélange ceci s'explique par la baisse du débit d'air. En parallèle l'impulsion des fumées décroît proportionnellement avec leur volume et

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

leur masse volumique. Il est à constater que l'impulsion des jets du combustible s'accroît du fait que la vitesse du fonctionnement à l'hydrogène pur est trois fois plus grande. En finalité, l'accroissement de l'impulsion du jet des combustibles contrebalance les diminutions respectives des impulsions des jets d'air et des fumées (ce qui ne peut être considéré comme négligeable). Le taux de recirculation varie donc très peu en fonction du pourcentage d'hydrogène du mélange combustible [21].

I.8.c Sur la concentration des fumées

Le pourcentage de CO₂ émis diminue avec le pourcentage d'hydrogène. En effet, la quantité de méthane disponible pour produire du CO₂ diminue. La concentration des NOx croît de 5 ppm (pour méthane pur) à 14ppm (pour 50% d'hydrogène dans le combustible), puis elle diminue jusqu'à 6 ppm pour les cas à l'hydrogène pur. L'augmentation de la concentration en NOx pour les mélanges contenant jusqu'à 60% d'hydrogène semble être liée à la structure des zones de réaction. En effet, l'imagerie de chimiluminescence met en évidence une zone de réaction principale qui augmente en intensité (en valeur globale, ce qui est représenté par la courbe noire et aussi en valeur maximale, directement représenté en rouge sur la cartographie) jusqu'à 60% d'hydrogène. Puisque la zone de réaction se rapproche du brûleur, la dilution des jets avant combustion est moins importante, localement la température est élevée ce qui provoque cette légère augmentation des NOx.

Pour le brûleur de l'installation pilote du CORIA fonctionnant avec des mélange CH₄/H₂ en régime de combustion sans flamme, avec un taux d'aération $\lambda=1.18$ et sans préchauffage de l'air, la production de NOx reste inférieure à 15ppm. Les émissions de NOx, très faibles et bien en dessous des installations « classiques » de combustion, montrent que le régime de combustion obtenu, quelque soit le pourcentage d'hydrogène dans le combustible, reste un régime de combustion dilué qui ne présente pas de pic important de température, tout comme pour le cas avec préchauffage de l'air.

Lorsque l'on atteint 100% d'hydrogène, on n'observe plus d'émission de CO, de CO₂ et peu de NOx, il n'y a pas non plus d'imbrulés.

La combustion sans flamme à l'hydrogène pur, et en l'absence de préchauffage de l'air n'émet plus de polluant.

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

Le taux de recirculation dans le four varie peu, il se situe toujours proche de 5.5 (même s'il a tendance à augmenter) quelque soit le pourcentage d'hydrogène dans le combustible. Derudi et al ont montré qu'un taux de dilution plus important était nécessaire pour atteindre le régime de combustion sans flamme lorsque de l'hydrogène était ajouté au combustible. Cette limite est de $K_{vmin}=7$ pour CH₄ 70%-H₂ 30% et de $K_{vmin}=9$ pour CH₄ 60% - H₂ 40%. Parente et al sont arrivés à la même conclusion : une modification des brûleurs existant est nécessaire afin de pouvoir atteindre le régime de combustion sans flamme. Dans notre étude, la géométrie du brûleur n'a pas été modifiée, le taux de recirculation croit peu, et le régime de combustion sans flamme peut qu'en même être atteint. Cependant, notre installation est géométriquement plus proche d'une installation industrielle que le brûleur de laboratoire de Milan : les parois sont éloignées du brûleur, et l'augmentation de l'impulsion des jets de combustible permet d'augmenter légèrement le taux de recirculation [13].

Les avantages de l'ajout d'hydrogène au méthane

- il diminue notablement les émissions polluantes.
- Il marque une baisse de la température adiabatique.
- L'ajout de petite quantité d'hydrogène au mélange permet le développement des limites d'inflammabilité du combustible.
- Il améliore la stabilité de la flamme.
- A de basses températures et de faibles richesses, la flamme maintient toujours sa stabilité.
- Les faibles richesses favorisent une baisse des émissions du mono oxyde de carbone CO sans pour autant provoquer, à la hausse, les émissions de NOx.
- Il diminue la taille de la flamme.
- Le brûleur devient plus performant par diminution de température.
- Il est renouvelable.

Les inconvénients de l'ajout d'hydrogène au méthane

- En réduisant la richesse, les émissions marquent une forte baisse en NOx tout en augmentant les émissions hydrocarbonées.
- L'élévation de la température de préchauffage de l'air provoque une hausse de la production en émissions NOx.

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

- L'ajout d'hydrogène marque une difficulté dans le placement du front de la flamme au niveau de la chambre de combustion afin que les pics de température soient évités d'où la formation de NO.
- L'influence de l'ajout d'hydrogène est tributaire du type d'installation.
- L'ajout de 10% d'hydrogène triple l'intensité moyenne dans la zone de réaction principale.
- L'ajout de l'hydrogène détermine la hausse de température des fumées.

Conclusion

L'utilisation de l'hydrogène en combustion marque une importance capitale de par ses avantages qui se distinguent par leur considération particulière. L'hydrogène, par lui même, constitue une énergie propre. Compte-tenu des multiples obstacles qui freinent la production de l'hydrogène, l'utilisation de ce dernier n'a pas vu le jour. Il est important, de lever les contraintes au développement de l'énergie de l'hydrogène pour que cette dernière puisse s'intégrer dans la société d'aujourd'hui.

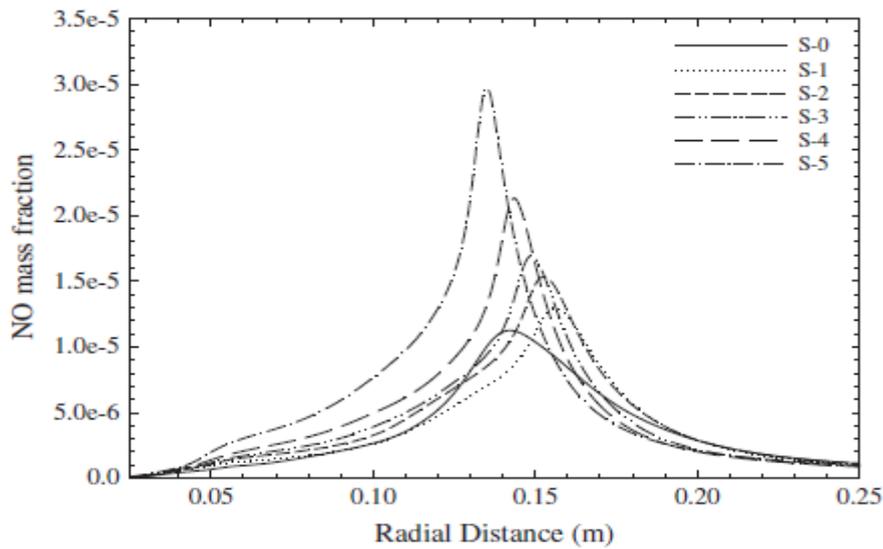
I.9. Etude bibliographique

Des expériences de laboratoire ont été réalisées pour évaluer les performances d'un brûleur à faible tourbillon pré mélangé (LSB) dans des configurations qui simulent des appareils de chauffage commerciaux. Des diagnostics laser ont été utilisés pour étudier les changements dans le mécanisme de stabilisation de la flamme, le champ d'écoulement et la stabilité de la flamme lorsque la flamme LSB était confinée dans des cylindres de quartz de différents diamètres et constrictions d'extrémité.

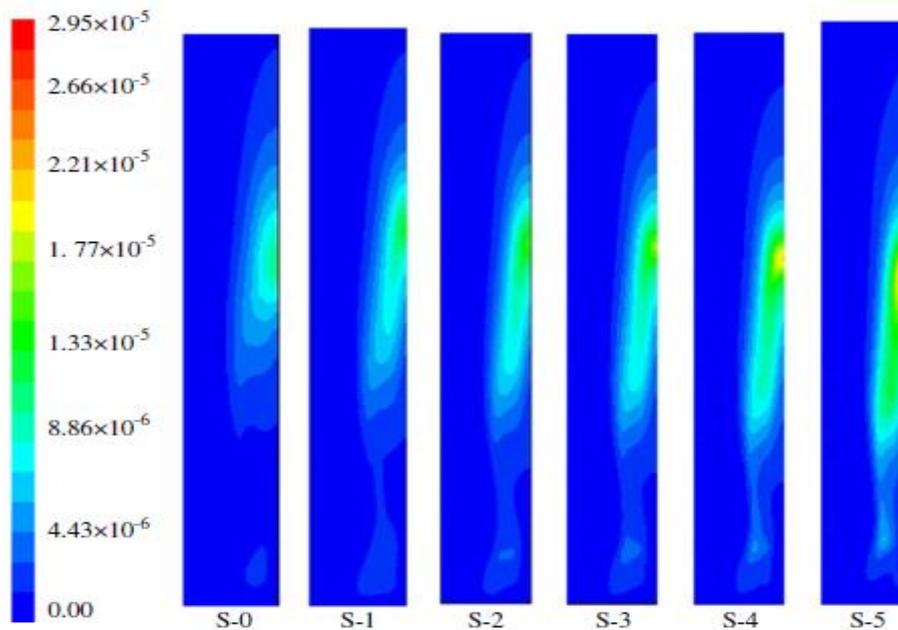
B. Rohani et al [1] jugent que cette investigation vise à étudier l'effet de l'ajout d'hydrogène sur la température et les émissions de polluants de la flamme tourbillonnante non confinée de méthane / air turbulente. Une approche de calcul utilisant respectivement la flamme laminaire stable et les modèles de combustion et de turbulence $k - \epsilon$ réalisables, respectivement, a été utilisée. L'interaction turbulence-combustion a été modélisée par une fonction de densité de probabilité présumée en forme de β . Le pourcentage d'hydrogène dans le flux de carburant est modélisé dans une large plage de 0% à 50% du débit volumique de carburant. Les résultats montrent qu'avec l'augmentation du pourcentage volumétrique d'hydrogène dans le courant de combustible, la structure de la flamme change

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

considérablement. La taille de la région de température maximale diminue de manière significative à une petite région au bout de la flamme et la température de pointe augmente, ce qui conduit à une augmentation des niveaux d'émission de NO. On observe que la flamme avec 10% d'hydrogène est légèrement de la tendance générale.



FigI. 9.1. L'effet d'ajout d'hydrogène à la fraction massique de NO dans l'axe de la flamme.



FigI. 9.2. L'effet d'ajout d'hydrogène à la fraction massique de NO.

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

D.Ebi et al [2] ont étudié, expérimentalement, le retour de flammes de la couche limite des flammes d'air méthane-hydrogène. Cette expérience a été étudiée dans un brûleur hélicoïdal optiquement accessible installé dans un banc d'essai de haute pression. L'imagerie à grande vitesse et les diagnostics laser ont été appliqués pour caractériser la voie de propagation de la flamme et les formes de celles-ci. Les résultats actuels montrent que la voie de propagation de la flamme, que détermine l'interaction flux-flamme est pertinente pour le retour de flammes, diffère par rapport aux précédentes études sur les flammes tourbillonnantes. Les caractéristiques du flashback dans la configuration actuelle sont, se révèlent, comparables au flashback dans les couches limites non tourbillonnantes. Les limites de flashback ont été mesurées à 2,5bar et à une température de préchauffage de 200 ° C pour quantifier l'augmentation de la propension au retour de flamme comme la quantité de l'hydrogène est augmentée de 50% à 100% en volume. Des simulations de flammes pré mélangées à contre-courant ont été effectuées pour étudier l'augmentation de la propension au retour de flammes avec l'ajout d'hydrogène. Les résultats suggèrent que les flammes étudiées sont sur le point d'être étirées de manière critique lorsque le retour de flamme se produit dans la couche limite turbulente, ce qui permet de dériver un critère basé sur le nombre de Karlowitz pour une meilleure prédiction du retour de flamme limites.

P. SAYAD et al [3] ont mené, également, une étude expérimentale sur un brûleur à tourbillons. Les expériences ont montré que dans les mélanges binaires de H_2/CO , l'augmentation du rapport molaire H_2/CO à un certain nombre de tourbillons, réduit le rapport d'équivalence. Par contre l'ajout de 10% de CH_4 , et les effets de la dilution de N_2 a augmenté le rapport d'équivalence.

H. Zhen et al [4] ont étudié la quantité d'hydrogène ajoutée a été variée de 5 à 10%.L'ajout d'hydrogène améliore considérablement la stabilité de la flamme de biogaz, et l'ajout initial de 5% d'hydrogène s'avère plus efficace pour améliorer la stabilité que l'autre 5% d'ajout d'hydrogène. La comparaison directe des limites de stabilité des flammes brûlant de CH_4/N_2 t du CH_4/CO_2 (biogaz) montre une limite de stabilité inférieure de la flamme de biogaz, ce qui indique un effet plus négatif du CO_2 que du N_2 sur la stabilisation de la flamme.

M. Yu et al [5] ont fait une étude expérimentale pour étudier les effets de l'ajout d'hydrogène sur les caractéristiques fondamentales de propagation des flammes pré mélangées méthane/air à différents rapports d'équivalence dans un conduit de ventilation. La

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

fraction d'hydrogène dans le mélange méthane-hydrogène a varié de 0 à 1 à des rapports d'équivalence de 0,8, 1,0 et 1,2. Les résultats indiquent que la tendance à l'instabilité de la flamme augmentait avec la fraction d'hydrogène et que la flamme d'hydrogène / méthane pré mélangée subissait un changement de forme complexe avec l'augmentation de la fraction d'hydrogène. La flamme de la tulipe ne s'est formée que lorsque la fraction d'hydrogène variait de 0 à 50% à un rapport d'équivalence de 0,8. Il a également été constaté que la vitesse du front de flamme et la surpression augmentaient de manière significative avec la fraction d'hydrogène. Pour tous les rapports d'équivalence, la flamme stœchiométrique ($\Phi = 1,0$) a le temps de propagation de flamme le plus court et la surpression maximale.

Guo, Shilong et al [6] ont étudié le mécanisme de l'enrichissement en hydrogène dans la stabilisation de la flamme pré mélangée à tourbillon / corps de bluff CH_4 / air pauvre. Les résultats expérimentaux et numériques montrent que l'accessoire de la brosse à flamme a tendance à quitter la couche de cisaillement interne avec une addition croissante d'hydrogène, ce qui réduira le risque de décollement de la flamme. L'addition d'hydrogène augmentera non seulement la vitesse de réaction globale, mais aussi changera, à la sortie de la buse, l'intensité relativement faible de la combustion à une intensité plus forte, ce qui est également important pour la stabilisation de la flamme. L'attachement de flamme robuste obtenu par addition d'hydrogène peut être attribué aux réactions améliorées de $\text{H}_2 + \text{OH} = \text{H} + \text{H}_2\text{O}$ et $\text{CH}_4 + \text{H} = \text{CH}_3 + \text{H}_2$.

M.CHAOUR et al [7] ont étudié l'optimisation des paramètres de fonctionnement des brûleurs industriels à flamme de diffusion. L'étude s'intéresse sur l'effet des mélanges gazeux et leurs caractéristiques dynamiques et thermiques de l'écoulement ainsi que leurs impacts sur la stabilité de la flamme et la composition de mélange. Les simulations numériques sont effectuées à l'aide du code de calcul FLUENT, en utilisant le modèle K- ϵ standard couplé au modèle de combustion turbulente EDM (Eddy dissipation). Les résultats obtenus par un combustible issu d'un mélange de méthane et d'hydrogène, d'une variation d'hydrogène entre 0 et 100%, montrent que la présence d'hydrogène change radicalement la structure des zones de réaction. L'augmentation du taux d'hydrogène provoque une augmentation de la température et diminue les émissions polluantes.

F. Bouras et al [8] ont présenté une étude numérique des effets du mélange méthane / hydrogène sur les processus de combustion turbulente se déroulant dans un brûleur similaire à celui intégré dans les centrales à turbine à gaz. Ainsi, par rapport au cas de référence où le

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

brûleur est alimenté à 100% de méthane, les variations du champ de vitesse axiale, du champ de température et de la fraction massique du champ de monoxyde de carbone sont examinées pour différents pourcentages d'injection d'hydrogène. Les résultats calculés, obtenus à l'aide du logiciel Fluent-CFD, sont comparés et validés par rapport à des données expérimentales de référence. Les résultats montrent que l'ajout d'hydrogène au méthane a un impact sur tous les paramètres physiques et chimiques du système réactif.

M. ATTAIA et al [9] ont fait une étude numérique de la flamme de diffusion turbulente dans une chambre de combustion cylindrique confinée par deux jets coaxiaux (de méthane/hydrogène et d'air). Le but est d'améliorer le mélange réactif afin de réduire le monoxyde de carbone en tant qu'espèce chimique polluante. Dans ce travail, les modèles couplés LES/PDF sont utilisés pour surmonter l'interaction turbulence/chimie dans les équations de transport des espèces chimiques. En considérant que la fraction massique du monoxyde de carbone, la fraction de mélange et la variable d'avancement sont sélectionnées pour valider les données à l'aide des résultats expérimentaux tirés de la littérature. En outre, les mêmes paramètres scalaires qui sont considérés dans la validation sont évalués à partir de différentes compositions du carburant de méthane et du pourcentage de l'hydrogène égales à 0, 20, 40, 60, 80 et 100%, pour l'alimentation de la chambre de combustion. En conséquence, l'addition de l'hydrogène réduit le monoxyde de carbone dans les produits de combustion et améliore la brûlure réactive causée par le mélange riche.

O. GORKEM et al [10] ont étudié l'impact de l'ajout d'hydrogène sur la dynamique d'une flamme pré mélangée méthane-air pour différentes stratégies d'injection. La configuration est un injecteur tourbillonnant avec un tube central pour l'injection de carburant pilote. En maintenant le débit d'air et la puissance thermique du brûleur constants, il est montré que même pour de très petits débits d'hydrogène, aussi bas qu'un pour cent de la puissance thermique, la stabilisation de la flamme et la stabilité de la chambre de combustion sont considérablement modifiées lorsque l'hydrogène pur est injecté à travers le tube central comme jet pilote. Il est également démontré que le pré mélangée complet de la même quantité d'hydrogène avec du méthane ou l'utilisation de méthane pour le jet pilote n'a pas d'effets significatifs par rapport à la stratégie d'injection pilote d'hydrogène. La réponse de la flamme aux perturbations de flux forcé est utilisée pour interpréter les caractéristiques observées.

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

M.KARIMAN et al [11] ont présenté une étude sur les limites d'inflammabilité d'un brûleur à faible swirl dans diverses conditions de fonctionnement et l'effet de la pression et la géométrie d'un brûleur avec le pourcentage d'hydrogène, l'étude a été faite à l'aide d'OH PLIF image. Les résultats indiquent que l'ajout de l'hydrogène et l'augmentation de pression élargissant la gamme de stabilité, et augmente le taux de combustion locaux et globaux en raison de la vitesse de réaction plus rapide de l'hydrogène. L'addition d'hydrogène augmente la réactivité des réactifs et la vitesse de la flamme turbulente.

Y.YAN et al [12] ont étudié une simulation numérique de base sur la dynamique des fluides (CFD) alors qu'il s'est avéré être une approche efficace pour analyser les performances de la combustion dans diverses conditions. L'objectif de cet article est d'étudier la combustion catalytique du méthane assistée par l'hydrogène.

Le méthane ne se brûle pas de manière régulière. L'ajout de l'hydrogène rend facilement inflammable le méthane ce qui améliore la combustion.

Le mélange hydrogène méthane favorise l'allumage et provoque les tiges catalytiques à améliorer la catalyse de la combustion du méthane.

F.HERNANDEZ-PEREZ et al [13] ont fait une étude de simulation numérique sur les grandes émissions (LES) à la prédiction de la combustion pré mélangée turbulente du méthane/air pauvre enrichi en hydrogène. La flamme enrichie contient 20% d'hydrogène en termes fraction molaire.

L'addition d'hydrogène diminue la hauteur de la flamme et élargit les fonctions de densité de probabilité de courbure. La flamme enrichie présente un degré de plissement plus élevé avec des arrêtes plus nette de courbure négative et des proches plus grandes de courbure positive.

A.MAMERI [14] a fait une étude qui vise à compléter les résultats des essais expérimentaux, les effets de la richesse du mélange et l'ajout de l'hydrogène sur la structure et la formation des polluants. L'augmentation de la richesse du combustible permet de stabiliser la flamme, mais augmente la température et produit plus de CO, CO₂ et NO_x.

Par contre, l'ajout de H₂ augmente l'efficacité du mélange, stabilise la flamme avec une légère élévation de la température maximale et une diminution des fractions massiques de CO, CO₂ et NO_x. Le remplacement d'une fraction de 10% ou même de 20% du gaz principal

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

par l'hydrogène améliore les performances des installations et ne nécessite aucune modification sur les systèmes de combustion.

B.KASHIR, et al [15] ont mené cette étude en deux étapes, dans la première étape une approche couplée flamme/radiation ainsi que deux modèles de turbulence distincts. Les modèles de turbulence sont K-u-SST et K- ϵ . Dans la deuxième partie le modèle K- ϵ modifié et utilisé pour étudier la structure et la caractéristique de combustion des flammes de mélange CH_4/H_2 sous les nombres de tourbillons distincts trois nombre de tourbillons différents.

Les nombres 0.3,0.5 et 0.6 font l'objet d'une enquête, l'addition de H_2 au mélange de carburant à un débit volumétrique total fixe réduit le débit massique du carburant et la puissance thermique. Cela se traduit par une réduction de la température des produits de combustion dans la zone de recirculation en amont. On constate que le monoxyde de carbone est réduit par l'ajout d'hydrogène.

L. PISA, et al [16] faisaient cette étude pour présenter un nouveau type d'injecteur développé pour la combustion de carburant partiellement pré mélangé hydrogène méthane à de proportions diverses. Il a été conclu qu'une nouvelle solution issue d'une nouvelle idée a vu le jour, un injecteur tourbillonnaire à section de sortie radiale constante, qui a été produit à partir d'un alliage de titane. Le nouveau type d'injecteur a été testé sur un banc d'essai à basse pression avec le carburant méthane/hydrogène, les résultats ont confirmé la possibilité de développement et d'améliorer le nouveau type d'injecteur à tourbillons. Ils ont montré les bonnes limites d'éruption par rapport aux résultats connus de la littérature. Les valeurs de NO_x sont les résultats qu'ils attendent, relativement adéquats compte tenu du pré mélangé.

R.Sener, et al [17] ont étudié l'effet de l'ajout d'hydrogène à différents combustibles gazeux à différents taux a été étudié dans un bruleur à pré mélangé. Une étude paramétrique numérique a été réalisée à l'aide d'un code CFD commercial. Les combustibles gazeux, à savoir le méthane, le propane, le GPL et le gaz naturel. Ils ont enrichis par différents taux d'ajout d'hydrogène avec un incrément de 10% en outre. Les résultats révèlent que l'efficacité de la combustion de tous les combustibles a été positivement affectée par l'enrichissement en hydrogène, sauf pour certaines compositions de gaz. En outre, cette étude a montré que l'ajout d'hydrogène en générale, diminue les émissions de HC et de CO non brûlés. Les résultats montrent que l'addition d'hydrogène augmente légèrement l'efficacité de la combustion pour tous les combustibles, qui est proche de 0.5%. D'autre part, les niveaux d'efficacité globale en ce qui concerne l'énergie de chauffage utile varient entre 4 et 9% pour tous les carburants sauf

Chapitre I : Les impacts de l'ajout d'hydrogène au carburant conventionnel

le biogaz. Les rendements globaux des cas de biogaz se situent dans une fourchette de 35 à 88 %, hormis quelques cas, les HC et CO diminuent à mesure que le taux d'addition d'hydrogène augmente.

R.CARLANESCU et al [18] ont présenté un nouveau type d'injecteur breveté conçu pour la combustion de carburant pré mélangé hydrogène-méthane dans différentes proportions.

Différentes études tentent de confirmer la possibilité de transporter l'hydrogène en utilisant le réseau de distribution de gaz naturel existant, en mélangeant les deux gaz. Comme la propriété du nouveau mélange influence les paramètres de combustion, l'utilisation de l'équipement existant poserait de nouveaux problèmes, comme le risque de retour de flamme, les effets des températures plus élevées et la modification du front de flamme.

Les premières expériences ont montré qu'une flamme de travail stable et efficace peut être obtenue avec le nouveau type d'injecteur et conduisent à de nouvelles idées pour le développement futur de l'assemblage et pour l'amélioration de l'injecteur à tourbillon.

CHAPITRE. II : MODELISATION ET PROCEDURE
NUMERIQUE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les équations qui ont modélisé les problèmes traités dans cet article. Ces équations mettent en évidence le comportement des fluides en combustion turbulente. Ils sont établis selon les lois de la physique. Un modèle mathématique général d'écoulement de fluide avec transfert de concentration de substance chimique est établi en utilisant des équations de conservation. (La masse, la quantité de mouvement, les espèces chimiques et l'énergie). Cette étude s'inscrit dans le cadre de la simulation numérique des écoulements réactifs et non réactifs dans les brûleurs LSB, nous avons traité l'effet de l'ajout d'hydrogène en utilisant le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ (STANDARD, RNG et Réalisable) couplés via le modèle de combustion partiellement pré mélangé. On s'intéresse dans ce chapitre à réaliser une simulation numérique est présenter les moyens et les méthodes utilisés pour cette simulation.

II.2 les écoulements réactifs

Notre étude se porte essentiellement sur des écoulements réactifs. La compréhension de ces écoulements débute par la classification de la flamme à analyser afin de pouvoir utiliser des modèles correspondants. Trois types de flamme peuvent être répertoriés :

- **Flammes pré mélangées** : les réactifs sont mélangés avant la zone de réaction.
- **Flammes non-pré mélangées ou flammes de diffusion** : les réactifs sont introduits séparément dans la zone de réaction, de part et d'autres de la flamme. Ils sont alors essentiellement entraînés l'un vers l'autre par diffusion moléculaire.

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

- **Les Flammes partiellement pré mélangées** : elles se positionnent au milieu des deux premiers types. On les retrouve fréquemment dans les applications industrielles pour des raisons de sécurité. Le carburant est généralement stocké séparément du comburant. Le mélange est injecté à travers deux courants différents en amont du front

de flamme où ils sont supposés se mélanger [23]. Pour notre étude, les flammes du brûleur à faible richesse sont classifiées avec les flammes partiellement pré mélangées. Ceci va nous permettre d'utiliser des modèles de combustion correspondants.

II.3 Les écoulements Swirlés

La structure de base de la flamme du brûleur LSB que nous allons étudier est principalement affectée par les courants de Foucault. Cette méthode offre une excellente technologie de stabilisation de la flamme. Le vortex favorise le mélange efficace du combustible et de l'oxydant, de sorte que le brûleur fonctionne avec une combustion pauvre pour réduire l'apparition de polluants et améliorer l'efficacité. Un faible nombre de vortex peut avoir un effet bénéfique sur la stabilité de la flamme et la limite d'extinction. En particulier, une flamme faible est généralement plus stable lorsqu'un faible vortex s'écoule car la vitesse du vortex peut étirer la flamme jusqu'à ce qu'elle s'éteigne [24].

La plupart des brûleurs utilisent des courants de Foucault car ils ont un effet positif sur les caractéristiques de base de la flamme [25]. Ces derniers sont caractérisés par leur nombre de tourbillons, c'est-à-dire le rapport du flux axial de moment tangentiel (G_φ) au flux axial de moment axial (G_x).

$$s = \frac{G_\varphi}{R' \cdot G_x}$$

Où G_φ est le débit du moment cinétique angulaire, G_x est le débit de quantité de mouvement axiale et R' est le rayon de l'ouverture du brûleur. G_x et G_φ sont donnée par :

$$G_x = \int_0^{2\pi} \int_0^R \left(\rho(uu + \overline{u'u'}) + (P - P') \right) r dr d\theta .$$

$$G_\varphi = \int_0^{2\pi} \int_0^R \left(\rho(uw + \overline{u'w'}) \right) r dr d\theta .$$

Où u et w sont les composantes de la vitesse axiale et tangentielle respectivement, u' et w' sont leurs fluctuations turbulentes respectives. Tandis que $(p-p_0)$ est la pression statique effective de l'écoulement.

Le taux de rotation de l'écoulement est évalué par la relation présenté dans [26] :

Chapitre. II : Modélisation et Procédure Numérique

$$s = \frac{\int r \omega v. dA}{\bar{R} \iint uv. dA}$$

Le rayon moyen, \bar{R} , utilisé pour l'évaluation de ce nombre se réduit ici au rayon du col. Dans l'étude proposée par Weber R. and Dugui J. [27]. Une autre approximation du nombre de swirl qui repose sur des résultats expérimentaux est donnée par :

$$s = \frac{\int_0^R \rho \omega u r^2 dr}{\int_0^R \rho u^2 r dr}$$

Cette expression du taux de vortex a été développée pour simplifier le calcul et éliminer les difficultés causées par les changements de pression statique dans le tuyau d'admission. Les fluctuations de pression et de vitesse turbulente sont ignorées (considérées comme très faibles par rapport au volume moyen). Il a été découvert plus tard que, comparée aux expressions proposées par Beer J.M et al (1983) et Gupta A.K et al (1984), cette approximation du nombre de tourbillon est plus représentative des phénomènes physiques.

Dans les applications industrielles, le nombre de tourbillons est souvent difficile à déterminer. Pour cette raison, d'autres approximations ont été développées et proposées pour la situation des brûleurs LSB :

$$S = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1-R^3}{1-R^2 + [m^2 (\frac{1}{R^2} - 1)^2] R^2}$$

Où R est le rapport entre le rayon de la plaque perforée axiale et le bec du brûleur et α l'angle d'inclinaison des ailettes de la vanne swirler qui est la moyenne entre la valeur maximale et minimale de l'angle d'inclinaison. Les ailettes des vannes swirler peuvent avoir un angle d'inclinaison constant ou variable sans affecter les paramètres utilisés lors de la simulation numérique.

II.4 Hypothèses et formule mathématique

Chapitre. II : Modélisation et Procédure Numérique

Pour notre simulation numérique des flammes de méthane-air pré mélangées turbulente, a été réalisé par le code de calcul ANSYS Fluent 17.2, les modèles utilisés lors de cette simulation dans le but d'analyser la structure des flammes, leurs stabilités ainsi que les émissions polluantes (NOx et CO) sont : RANS STANDAR k-ε, partiellement pré mélangé en modèle de Zimont et Peter. Plusieurs simplifications ont été nécessaires pour la réalisation de ce travail. Le phénomène étudié est considéré permanent (tests effectués), les forces gravitationnelles ont été négligées, l'écoulement est considéré incompressible (V opératoire << nombre de Mach) avec des propriétés constante. Ces espèces sont caractérisées par leurs fractions massiques Y_K pour k=1 à N où N est le nombre d'espèces dans le mélange réactif. Les fractions massiques Y_K sont définies par:

$$Y_K = \frac{m_K}{m}$$

Où :

m_K Est la masse de l'espèce, k présente dans un volume donnée, V et m la masse totale du gaz dans le Volume V.

II.4.1 Variables de la thermochimie

Pour un mélange de N gaz parfaits, la pression totale est la somme des pressions partielles:

$$P = \sum_{K=1}^N P_K \text{ Ou } P_K = \rho_K \frac{R}{W_K} T$$

Où T est la température et R la constante des gaz parfaits,

$\rho_K = \rho Y_K$ Et W_K Sont respectivement la densité et la masse moléculaire de l'espèce k.

Puisque la densité pour un gaz multi espèces est donnée par :

$$\rho = \sum_{K=1}^N \rho_K$$

L'équation d'état est :

$$P = \rho \frac{R}{W} T$$

L'enthalpie h_k de l'espèce k est donnée par :

Chapitre. II : Modélisation et Procédure Numérique

$$h_k = h_{s,k} + \Delta h_{f,k}^0 = \int_{T_0}^T C_{p,k} dT + \Delta h_{f,k}^0$$

L'enthalpie sensible $h_{s,k}$ est produite par la réaction chimique, elle est nulle à $T=T_0$. L'enthalpie chimique ou de formation $\Delta h_{f,k}^0$ représente l'enthalpie nécessaire pour former un kilogramme de l'espèce k.

$C_{p,k}$, chaleur spécifique à pression constante de l'espèce k, est donnée pour un gaz parfait diatomique par :

$$C_{p,k} = 2.5 \frac{R}{W_k}$$

L'enthalpie du mélange est obtenue en faisant la somme sur toutes les espèces :

$$h = \sum_{k=1}^N h_k Y_k = \int_{T_0}^T C_p dT + \sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^0 Y_k$$

Où la chaleur spécifique à pression constante du mélange C_p est donnée par :

$$C_p = \sum_{k=1}^N C_{p,k} Y_k$$

L'énergie interne $e = h - (P/\rho)$ est donnée par :

$$e = \int_{T_0}^T C_v dT - \frac{RT_0}{W} + \sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^0 Y_k = \sum_{k=1}^N e_k Y_k$$

Où la chaleur spécifique à volume constant du mélange C_v est donnée par :

$$C_v = C_p - r$$

Avec r la constante du gaz

$$r = \frac{R}{W} = R \sum_{k=1}^N \frac{Y_k}{W_k}$$

La constante universelle des gaz parfaits est désignée $R=8.3143$ J/ (mol K). La masse moléculaire du mélange est W, celle de chaque espèce k est W_k et le nombre total des espèces est N.

II.4.2 Equations de conservation de masse et d'espèces

Chapitre. II : Modélisation et Procédure Numérique

L'équation de conservation de la masse totale pour un écoulement réactif est similaire à celle d'un écoulement inerte car la combustion ne génère pas de masse.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

L'équation de conservation de masse pour l'espèce k s'écrit:

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho (u_i + V_{k,j}) Y_k) = \dot{\omega}_k \text{ pour } k=1, N$$

Avec $V_{k,j}$, la composante i de la vitesse de diffusion V_k de l'espèce k et $\dot{\omega}_k$ est le taux de production de l'espèce k.

Généralement, la vitesse de diffusion est donnée par la loi de Fick sous la forme:

$$V_{k,j} = -D_k \frac{1}{Y_k} \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \text{ pour } k=1, \dots, N_{k-1}$$

Où D_k est le coefficient de diffusion de l'espèce k dans le mélange.

L'équation de conservation de l'espèce k devient:

$$\frac{\partial Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i Y_k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_k \text{ pour } k=1, \dots, N_k$$

Dans cette équation, la diffusion de masse due aux gradients de température est négligée.

II.4.3 Equations de la quantité de mouvement

L'équation de la quantité de mouvement se trouve inchangée par la réaction chimique, elle s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i u_j = \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,j}$$

Où $f_{k,j}$ est la force de volume agissant sur l'espèce k dans la direction j et τ_{ij} est le tenseur visqueux, donné par :

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Le tenseur σ_{ij} combine la pression et le tenseur visqueux sous la forme suivante :

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - p\delta_{ij} = -p\delta_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Où μ est la viscosité dynamique et δ_{ij} est le symbole de Krönecер.

II.4.4 Equations de la conservation d'énergie

C'est l'équation la plus affectée par la combustion, elle peut être écrite sous plusieurs formes, une des plus utilisées est celle de l'enthalpie sensible :

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

Le flux d'énergie $\lambda \partial T / \partial x_i$ est le terme de diffusion de chaleur exprimé par la loi de Fourier.

Un second terme $\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k}$ associe la diffusion de différentes espèces avec des enthalpies différentes. Le terme \dot{Q} représente la source de chaleur due par exemple à un laser ou un arc électrique. Le terme ω_t est le dégagement de chaleur dû à la combustion, il est donné par :

$$\dot{\omega}_t = - \sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^0 \dot{\omega}_k$$

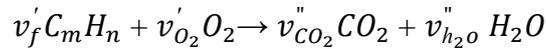
Le système d'équations de Navier-stokes pour un écoulement réactif est fermé par l'équation d'état pour un gaz parfait.

$$P = \rho r T$$

II.4.5 Facteurs stœchiométriques

En combustion, il est pratique de relier les fractions massiques des réactifs à celles des produits par rapport à une condition stœchiométrique. Cette condition est définie comme étant l'état dans lequel tout le combustible et le comburant sont consommés et les produits sont

dans leur état le plus stable. Considérons l'équation représentative de la combustion d'un hydrocarbure :



Les coefficients stœchiométriques sont définis par

$$v'_f = 1, v'_{O_2} = m + \frac{n}{4}, v''_{CO_2} = m \text{ Et } v''_{H_2O} = \frac{n}{2}$$

La richesse du mélange réactif est défini par le paramètre ϕ comme suit :

$$\phi = \frac{\left(\frac{Y_f}{Y_0}\right)}{\left(\frac{Y_f}{Y_0}\right)_{st}}$$

Où Y_f et Y_0 désignent respectivement les fractions massiques du fuel (CH_4) et de l'oxydant (O_2+N_2).

L'indice « st » représente l'état stœchiométrique ($\phi=1$).

La valeur de ϕ classe le mélange réactif en trois catégories majeurs :

- Mélange pauvre : $0 < \phi < 1$.
- Mélange stœchiométrique : $\phi = 1$.
- Mélange riche : $1 < \phi < \infty$.

II.5 Modélisation de la turbulence

La difficulté de résolutions direct des équations précédentes, nous a poussées à utiliser une simulation numérique sur les flammes turbulentes pré mélangées en se servant du logiciel ANSYS Fluent version 17.2, qui étudie les phénomènes physiques et propose plusieurs modèles de turbulence, combustion, polluants et autres.

II.5.1 Modèle k- ϵ standard

L'objectif de ce modèle est de donner une fermeture, à une échelle intégrale 1, pour le tenseur de Reynolds et pour les termes de transport turbulent dans les équations de Navier

stokes moyennées. Ce modèle utilise le principe de la viscosité turbulente μ_t qui est propriété du champ de l'écoulement turbulent et pas du mélange gazeux. Par analyse dimensionnelle, μ_t est reliée à l'échelle intégrale l et à la fluctuation de la vitesse u' par :

$$\mu_t = C_\mu \bar{\rho} \tilde{k}^2 / \tilde{\varepsilon} \quad \text{Avec } C_\mu = 0.09$$

Où $\tilde{\varepsilon}$ est le taux de dissipation turbulent de \tilde{k} .

Si on admet une isotropie locale de la turbulence, l'équation de transport de \tilde{k} est obtenue par sommation de la trace du tenseur de contrainte de Reynolds :

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{k}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{k}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_i} \right] - P_k - \bar{\rho} \tilde{\varepsilon}$$

L'équation de transport de $\tilde{\varepsilon}$ peut être modélisée analogiquement à celle de \tilde{k} donnant :

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\varepsilon}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{\varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_i} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \bar{\rho} \tilde{\varepsilon}$$

Les cinq constantes du modèle standard k- ε sont données dans la tableau.1. Ces valeurs sont déterminées de l'expérience pour une étude des écoulements cisailés.

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

TableauII. 5.1 Constantes du modèle k- ε standard.

II.5.2 Modèle k- ε RNG

Dans le modèle standard k- ε , la viscosité turbulente est déterminée par une seule échelle de turbulence linéaire caractéristique, mais en réalité toutes les échelles de mouvement contribuent à la diffusion turbulente. Pour prendre en compte l'existence de différentes échelles de mouvement turbulent. La méthode montre une plus grande précision dans la simulation des écoulements dans les cavités tournantes.

II.5.3 Modèle k- ε Réalisable

Le modèle k-ε réalisable proposé .Le terme "réalisable" signifie que le modèle satisfait à certaines contraintes mathématiques sur les contraintes normales, conformes à la physique des écoulements turbulents (dans le calcul des courants à gradient élevé, les valeurs négatives de la viscosité tourbillonnaire sont exclues). Une amélioration a été introduite dans ce modèle et l'équation du taux de dissipation est dérivée de l'équation exacte rms de la composante fluctuante de la vorticité.

L'énergie cinétique de turbulence k et son taux de dissipation ε sont obtenus à partir des équations de transports suivantes :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\vartheta} \varepsilon} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

$$C_1 = \max \left[0, 43 \cdot \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = s \frac{k}{\varepsilon} \text{ et } S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}.$$

G_k Représente la génération de l'énergie cinétique de turbulence.

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

Y_M Représente la contribution de la dilatation fluctuante dans la turbulence compressible au taux global de dissipation.

s_K et S_ε Sont les termes sources.

μ est la viscosité et μ_t la viscosité turbulente.

σ_k et σ_ε sont des nombres adimensionnels de Prandtl turbulent pour k et ε.

L'équation pour l'énergie cinétique k reste la même que celle des modèle k-ε standard et RNG, mais les constantes sont différentes. L'équation de ε a été modifiée.

Notons que le terme de production de ε est indépendant de G_k (c.a-d.de la production turbulente). De plus le dénominateur dans le terme de destruction de ε, ne peut pas s'annuler même lorsque k tend vers 0, ce qui n'était pas le cas dans la formulation du modèle standard.

L'option Enhanced Wall fonctions, EWF, peut être active pour une meilleure représentation du passage entre la zone laminaire et la zone turbulente. Pour cette option, il est

possible de choisir le pressure Gradient Effect ou PGE pour améliorer la prise en compte des gradients de pression adverses.

Ce modèle a été validé pour un grand nombre d'écoulements (écoulements impliquant des rotations, des couches limites soumises à de forts gradients de pression adverses, des séparations et des recirculations). Pour tous ces écoulements, la prédiction de l'écoulement par ce modèle s'est révélée sensiblement meilleure que le modèle standard.

II.6 Modélisation de la combustion

Dans le cas de flammes turbulentes, les modèles de combustion doivent permettre de calculer la composition moyenne de l'écoulement réactif en tout point, ainsi que le terme source de l'équation de conservation de l'énergie lié à la production ou consommation de chaleur provenant des réactions endothermiques et exothermiques du processus de combustion.

II.6.1 Modèle partiellement pré mélangé

C'est un système de combustion de type pré-mélange avec des mélanges carburant-comburant non uniformes. Il prend en considération les jets de pré-mélange qui se décharge dans l'atmosphère, les chambres de combustion de pré-mélange pauvre avec des flammes de diffusion pilotes et / ou de refroidissement des jets d'air, et les jets de flammes qui ne sont pas parfaitement pré-mélangées.

Le modèle partiellement pré mélangé obéit aux mêmes restrictions et limitations du modèle pré mélangé combustion comme l'utilisation du solveur Pressure-Based qui est primordiale. Tandis qu'il n'est pas adéquat avec le solveur Density-Based. D'autre part, le modèle n'est applicable qu'aux écoulements subsoniques turbulents.

Dans ce système partiellement pré mélangé utilisé dans notre étude, des modèles secondaires ont été exploités comme le modèle C-Equation pour le calcul de la variable de progression, le modèle Chemical equilibrium basé sur une PDF pour le couplage chimie turbulence et modèle de Zimont pour la détermination de la vitesse de flamme turbulente.

II.6.2 Modèle d'équilibre et le modèle en fonction de densité de probabilité PDF

La densité des grandeurs scalaires (telles que les fractions massiques des espèces chimiques et la température) noté par $\bar{\Phi}$ est calculée à partir de la fonction de densité de probabilité (PDF) de f et c tel que :

$$\bar{\Phi} = \int_0^1 \Phi(f, c) \cdot p(f, c) df \cdot dc$$

Le modèle de transport PDF proposé dans ANSYS Fluent 17.2 et utilisé dans cette étude, est destiné au traitement des phénomènes à taux d'effets de cinétique chimique finie appliqué aux écoulements réactifs turbulents avec un mécanisme réactionnel approprié.

II.6.3 Modèle C-Equation

La variable scalaire qui représente la progression de la réaction est notée c , l'équation de transport de c décrit l'évolution spatiale et temporelle de la progression de la réaction dans les champs d'écoulements turbulents réactifs. Avant la flamme, « c » est défini comme nul ($c=0$) dans le mélange imbrulé, et derrière la flamme « c » est défini comme unité ($c=1$) dans les gaz brûlés, entre les deux zones « c » varie entre 0 et 1 ($0 < c < 1$). La flamme se propage à une vitesse de flamme turbulente modélisée par le modèle de Zimont.

La propagation du front de flamme est modélisée en faisant la résolution de l'équation de transport de la variable de progression moyenne \bar{c} :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \bar{c}) \nabla (\rho \cdot \vec{v} \bar{c}) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{S_{c_t}} \nabla \bar{c} \right) + \rho S_c$$

Où :

\bar{c} : La variable de progression de la réaction moyenne.

S_{c_t} : Le nombre de Schmidt turbulent.

S_c : Le terme source de la progression de la réaction (S^{-1}) qui est modélisé comme suit :

$$\rho S_c = \rho_u \cdot U_t \cdot |\nabla c|$$

Où : ρ_u est la densité du mélange imbrulé et U_t la vitesse de flamme turbulente.

La variable de progression de la réaction est définie comme étant une somme normalisée des fractions massiques des espèces chimiques :

$$c = \frac{\sum_K \alpha_K (Y_K - Y_K^U)}{\sum_K \alpha_K Y_K^{eq}} = \frac{Y_c}{Y_c^{eq}}$$

Où le symbole u dénote les réactifs imbrulés, Y_K dénote la K^{eme} fraction massique d'espèce, le symbole eq dénote l'état d'équilibre chimique. Et α_K est une constante ($\alpha_K = 0$ pour les réactifs, $\alpha_K = 1$ pour les produits).

II.6.4 Modèle de Zimont

La vitesse de flamme turbulente pour les cas étudiés est modélisée par l'approche de Zimont. Dans le logiciel commercial utilisé ANSYS fluent 17.2, la fermeture de la vitesse de flamme turbulente de Zimont est calculée comme suit :

$$U_t = A. (u')^{3/4}. U_l^{1/2}. \alpha^{-1/4}. l_t^{1/4}$$

$$U_t = A. u' \left(\frac{\tau_t}{\tau_c} \right)^{1/4}$$

Où :

A : constante du modèle.

u' : La vitesse RMS ou moyenne quadratique (root-mean-square) (m/s).

$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$: Diffusivité thermique des imbrulés (m^2/s).

l_t : La longueur du mélange turbulent (m).

$\tau_t = \frac{l_t}{u'}$: Échelle de temps de la turbulence (s).

$\tau_c = \frac{\alpha}{U_l^2}$: Échelle de temps chimique (s).

La longueur du mélange turbulent l_t est calculée à partir de :

$$l_t = C_D \frac{(u')^3}{\varepsilon}$$

Avec : $A= 0.52$ et $C_D= 0.37$ des valeurs par défaut.

II.6.5 Méthode des volumes finis

Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté (e,w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e,w,s,n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e,w,s,n,t,b). Chaque nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E,W) dans le cas monodimensionnel, (E,W,S,N) dans le cas bidimensionnel, et (E,W,S,N,T,B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales.

II.7 Procédure Numérique

II.7.1 La géométrie et configuration 2D

La simulation numérique s'est effectuée pour un brûleur fermé à la pression atmosphérique conformément à la structure du brûleur LSB élaboré par R.K, Cheng [33] et développé par Nogenmyr [36]. Nous avons fourni une comparaison et une vérification des résultats obtenus lors de notre recherche.

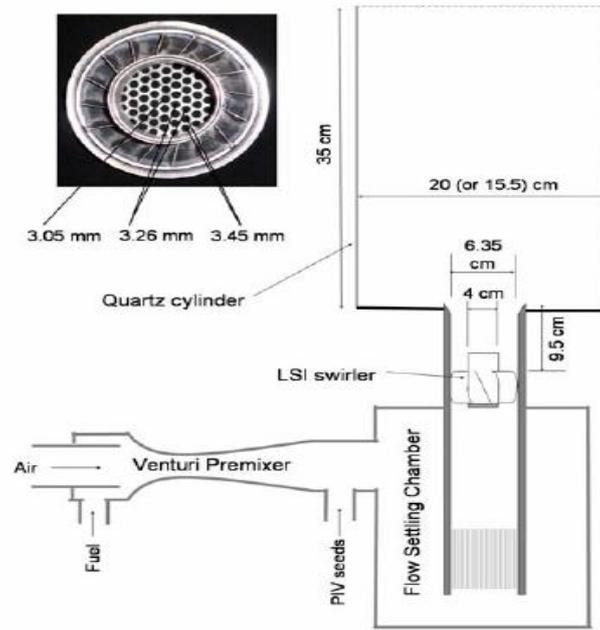


Figure II.7.2.1 Schéma du brûleur LSB et de la chambre de combustion [33].

En ce qui concerne la simulation numérique de la structure 2D, les formes et dimensions sont schématisées la figure 7.2.1 L'entrée swirled du fuel est décalée par 5 cm et l'entrée axiale de fuel est décalé de 20 cm par rapport à la sortie du brûleur. le domaine de calcul est fermé à l'exception de la sortie axiale où le domaine de calcul est ouvert à la pression atmosphérique. La longueur de la distance axiale est de 35 cm alors que sa hauteur représentée par la distance radiale mesure 10cm. Le rayon du bec du brûleur est de 3.175 cm, ça structure se compose de deux parties représentées par la plaque perforée axiale où le mélange réactif est injecté à une vitesse purement axiale de rayon de 2 cm et d'un espace annulaire swirled de 1.175 cm où le mélange réactif est injecté à deux types de vitesse, l'une est axiale et l'autre est tangentielle.

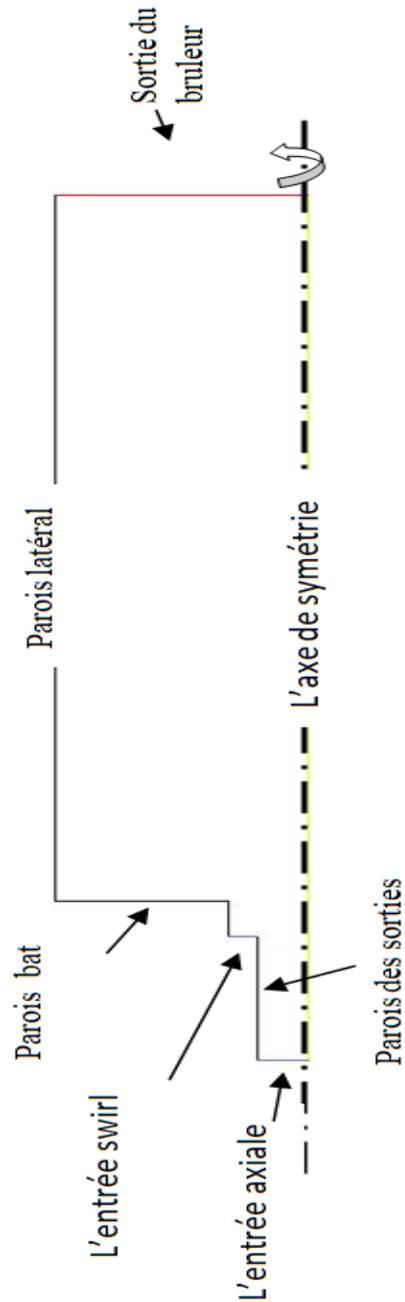


Figure II.7.2.2 Structure de géométrie en 2D.

II.7.2 Calcul Paramétrique

Equation de nombre de swirl :

$$S = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1 - R^3}{1 - R^2 + [m^2 (\frac{1}{R^2} - 1)^2] R^2}$$

Alors:

Chapitre. II : Modélisation et Procédure Numérique

$$m^2 = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1-R^3}{S.R^2(\frac{1}{R^2}-1)^2} + \frac{2R^2-1}{R^2(\frac{1}{R^2}-1)^2}$$

On a: $\alpha = 40^\circ$

$$S = 0.54$$

$$R = 0.63$$

Alors:

$$m^2 = 0.18964472$$

$$m = 0.44$$

Avec :

m : le rapport de débit massique.

$$\text{On a: } m = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_s} = 0.44 \Rightarrow \dot{m}_c = 0.44 \dot{m}_s$$

$$\text{On a: } \dot{m}_c + \dot{m}_s = \dot{m} \Rightarrow 0.44 \dot{m}_s + \dot{m}_s = \dot{m} \Rightarrow 1.44 \dot{m}_s = \dot{m}$$

$$\text{On a: pour } U_0 = 22 \text{ m/s} \rightarrow \dot{m} = 65 \text{ g/s}$$

$$\text{Alors : pour } U_0 = 14 \text{ m/s} \rightarrow \dot{m} = 41.4 \text{ g/s}$$

$$\text{Donc : pour } U_0 = 14 \text{ m/s} : 1.44 \dot{m}_s = 41.36 \text{ g/s} \Rightarrow \dot{m}_s = \frac{\dot{m}}{1.44} = \frac{41.4}{1.44} = 28.7 \text{ g/s}$$

$$\text{Et donc : } \dot{m}_c = \dot{m} - \dot{m}_s = 41.36 - 28.7 = 12.66 \text{ g/s}$$

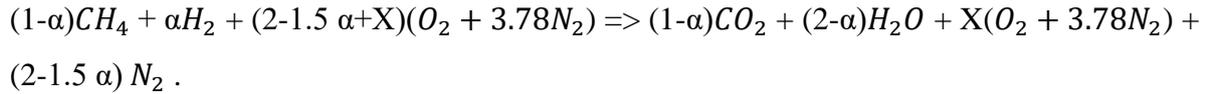
\dot{m} : débit massique totale.

\dot{m}_c : débit massique non swirlé.

\dot{m}_s : débit massique swirlé.

Equation du mélange hydrogène méthane :

Chapitre. II : Modélisation et Procédure Numérique



Avec α la fraction molaire de l'hydrogène ajoutée :

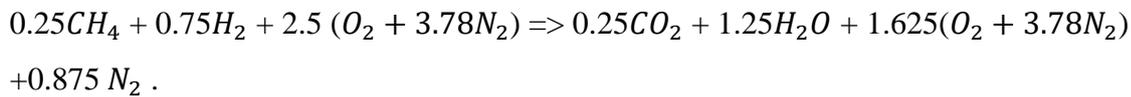
$$\alpha = \frac{n_{H_2}}{n_{H_2} + n_{CH_4}}$$

L'excès d'air est donné par :

$$X = \frac{2-1.5\alpha}{\phi} - 2 + 1.5\alpha$$

pour : $\phi=0.45$ et $\alpha=0.75$

on a :



Les fractions massiques :

$$X_{CH_4} = \frac{N_{CH_4} \cdot M_{CH_4}}{N_{CH_4} \cdot M_{CH_4} + \alpha \cdot M_{H_2} + N_{O_2} \cdot M_{O_2} + N_{N_2} \cdot M_{N_2}} = \frac{0.25 \cdot 16}{0.25 \cdot 16 + 0.75 \cdot 2 + 1.944 \cdot 32 + 7.35 \cdot 28} = 0.015$$

$$X_{H_2} = \frac{\alpha \cdot M_{H_2}}{N_{CH_4} \cdot M_{CH_4} + \alpha \cdot M_{H_2} + N_{O_2} \cdot M_{O_2} + N_{N_2} \cdot M_{N_2}} = \frac{0.75 \cdot 2}{0.25 \cdot 16 + 0.75 \cdot 2 + 1.944 \cdot 32 + 7.35 \cdot 28} = 0.005$$

$$X_{O_2} = \frac{N_{O_2} \cdot M_{O_2}}{N_{CH_4} \cdot M_{CH_4} + \alpha \cdot M_{H_2} + N_{O_2} \cdot M_{O_2} + N_{N_2} \cdot M_{N_2}} = \frac{2.5 \cdot 32}{0.25 \cdot 16 + 0.75 \cdot 2 + 1.944 \cdot 32 + 7.35 \cdot 28} = 0.228$$

$$X_{N_2} = \frac{N_{N_2} \cdot M_{N_2}}{N_{CH_4} \cdot M_{CH_4} + \alpha \cdot M_{H_2} + N_{O_2} \cdot M_{O_2} + N_{N_2} \cdot M_{N_2}} = \frac{9.45 \cdot 28}{0.25 \cdot 16 + 0.75 \cdot 2 + 1.944 \cdot 32 + 7.35 \cdot 28} = 0.752$$

X_{CH_4} : la fraction massique de CH_4 .

X_{O_2} : la fraction massique de O_2 .

X_{N_2} : la fraction massique de N_2 .

N_{CH_4} : la fraction molaire de CH_4 .

N_{O_2} : la fraction molaire de O_2 .

N_{N_2} : la fraction molaire de N_2 .

$$\text{On a: } \dot{m}_c = \rho \cdot U_{ax} \cdot A \Rightarrow U_{ax} = \frac{\dot{m}_c}{\rho \cdot A} * 0.42$$

U_{ax} : la vitesse axiale de l'espace axiale.

$$\dot{m}_s = \rho \cdot U_{an} \cdot A_s \Rightarrow U_{an} = \frac{\dot{m}_s}{\rho \cdot A_s}$$

$$U_{an} = \sqrt{U_{axs}^2 + U_s^2}$$

U_{an} : la vitesse annulaire.

U_{axs} : la vitesse axiale de l'espace annulaire.

U_s : la vitesse swirlé.

$$U_s = U_{axs} \cdot \tan\alpha$$

α : L'angle d'inclinaison des ailettes

$$\rho = 0.95 \text{ Kg/m}^3$$

Donc:

$$U_{ax} = \frac{12.66 \cdot 10^{-3} \cdot 0.42}{0.95 \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{12.66 \cdot 10^{-3} \cdot 0.42}{1.27 \cdot \pi \cdot 0.02^2} = 4.45 \text{ m/s}$$

$$U_{an} = \frac{28.7 \cdot 10^{-3}}{0.95 \cdot \pi \cdot (Rt^2 - R^2)} = \frac{28.7 \cdot 10^{-3}}{1.27 \cdot \pi \cdot (0.03175^2 - 0.02^2)} = 15.8 \text{ m/s}$$

$$U_{an} = \sqrt{U_{axs}^2 + U_s^2}$$

$$\rightarrow U_{an}^2 = U_{axs}^2 + U_s^2 = U_{axs}^2 + U_{axs}^2 \cdot \tan^2 40 = U_{axs}^2 (1 + \tan^2 40)$$

$$\Rightarrow U_{axs}^2 = \frac{U_{an}^2}{1 + \tan^2 40}$$

$$\Rightarrow U_{axs} = \sqrt{\frac{U_{an}^2}{1 + \tan^2 40}}$$

A.N:

$$U_{axs} = \sqrt{\frac{15.8^2}{1 + \tan^2 40}} = 12.1 \text{ m/s}$$

$$U_s = U_{axs} \cdot \tan 40 = 12.1 * \tan 40 = 10.16 \text{ m/s}$$

Les principaux paramètres du calcul sont présentés dans le tableau 3 :

II.7.3 Tableau des calculs pour chaque cas

| La richesse ϕ | U_0 (m/s) | U_{ax} (m/s) | U_{axs} (m/s) | U_s (m/s) | X_{CH4} | X_{H2} | X_{air} |
|--------------------------|-------------|----------------|-----------------|-------------|-----------|----------|-----------|
| 0.7 | 14 | 4.45 | 12.1 | 10.16 | 0.039 | 0 | 0.961 |
| 0.45 | 14 | 4.45 | 12.1 | 10.16 | 0.015 | 0.005 | 0.98 |
| 0.5 | 14 | 4.45 | 12.1 | 10.16 | 0.016 | 0.006 | 0.978 |

Conclusion

Dans ce chapitre on a présenter les écoulements réactifs (pré mélangé et non pré mélangé), notre domaine d'étude, les hypothèses posées, les équations de conservations nécessaire et les modèles utilisés dans la simulation numérique Partiellement Pré mélangé, modèle de Zimont et de Peter, modèle C-Equation et le modèle k- ϵ (Standard, RNG et Réalisable). D'autre part ce chapitre résume les moyens numériques exploités lors de cette étude. La méthode des volumes finis et discrétisation ont été détaillées, les géométries et les conditions aux limites.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter la géométrie bidimensionnelle 2D et le maillage adopté pour simuler le bruleur à faible nombre de swirle utilisé dans les travaux de R. K. Cheng [33, 34, 35]. La modélisation numérique nécessite un test du maillage pour s'assurer que les résultats obtenues sont indépendantes du maillage utilisé, pour cela un test de maillage a été élaboré pour bien choisir le maillage optimal et l'utiliser dans la simulation. On va aussi faire une validation des résultats obtenus à partir de notre simulation numérique avec les travaux antérieurs [29, 32, 33, 34, 35].

III.2 maillage de calcul :

Le maillage de la structure bidimensionnelle adopté dans cette étude est structuré uniforme

| | Maillage n°1 | Maillage n°2 | Maillage n°3 | Maillage n°4 | Maillage n°5 |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Nombre de nœuds | 7000 | 15000 | 27000 | 49000 | 111000 |

Tableau III.2.1 tableau de maillage

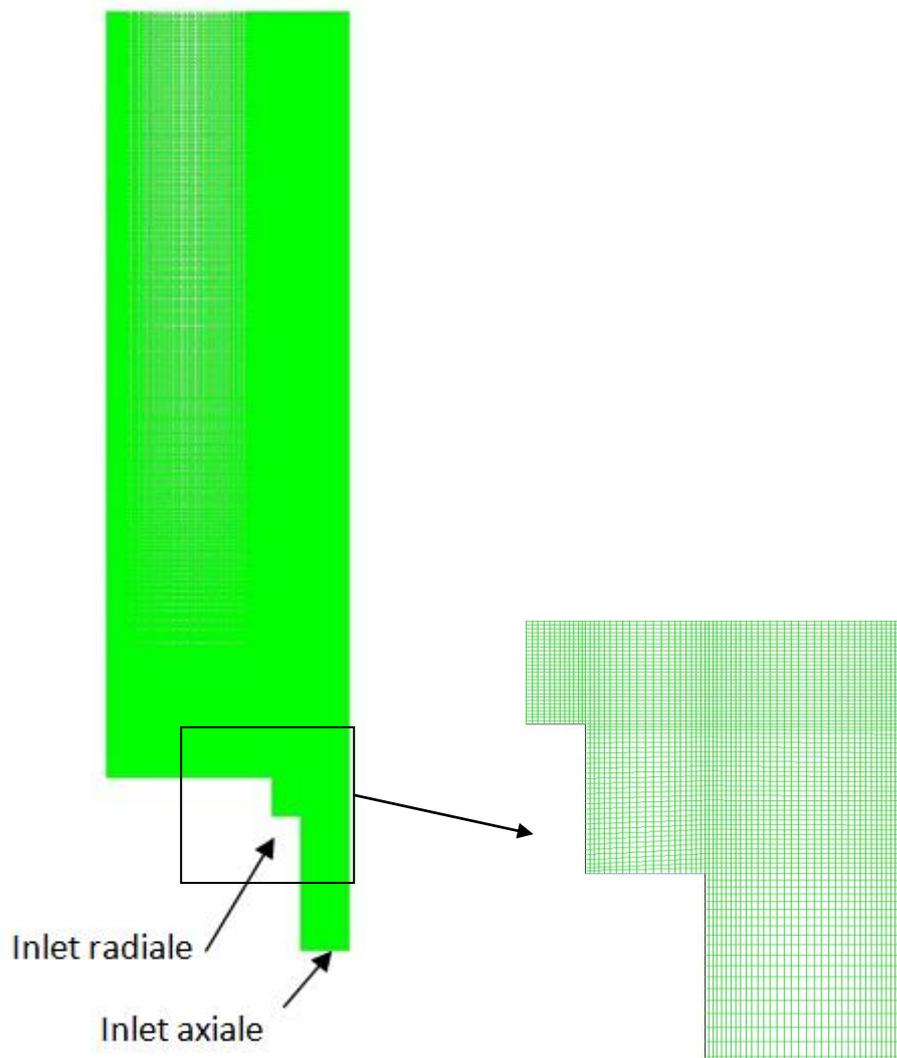


Figure III.1 structure de maillage.

Plusieurs cas de maillages ont été testés en variant les nombres des nœuds, afin d'atteindre des solutions indépendantes de la grille.

L'analyse a été réalisée sur des cas non réactifs et la vitesse axiale a été choisie comme variable de comparaison selon R. K. Cheng et al [33].

D'après les critères du choix de maillages (le temps de calcul, la précision et l'exactitude); nous avons adopté le maillage avec 49000 nœuds.

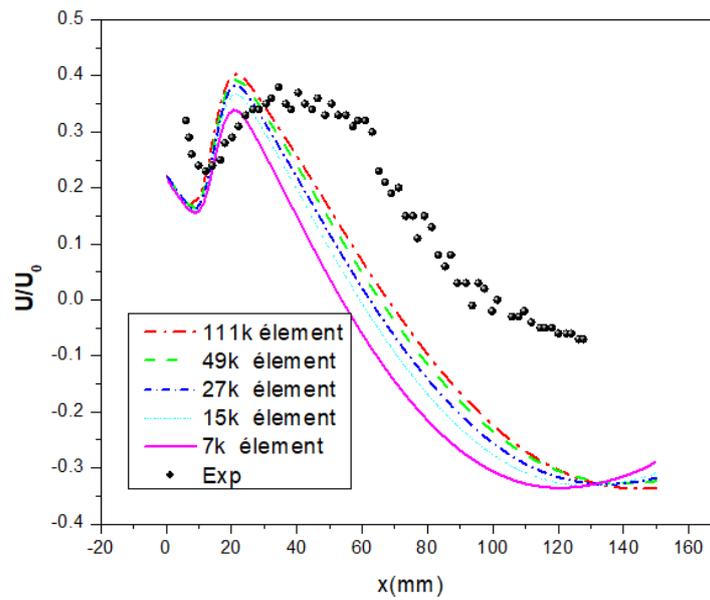


Figure III.2 vitesse axiale sur la section verticale du bruleur pour différents nombres de maillages.

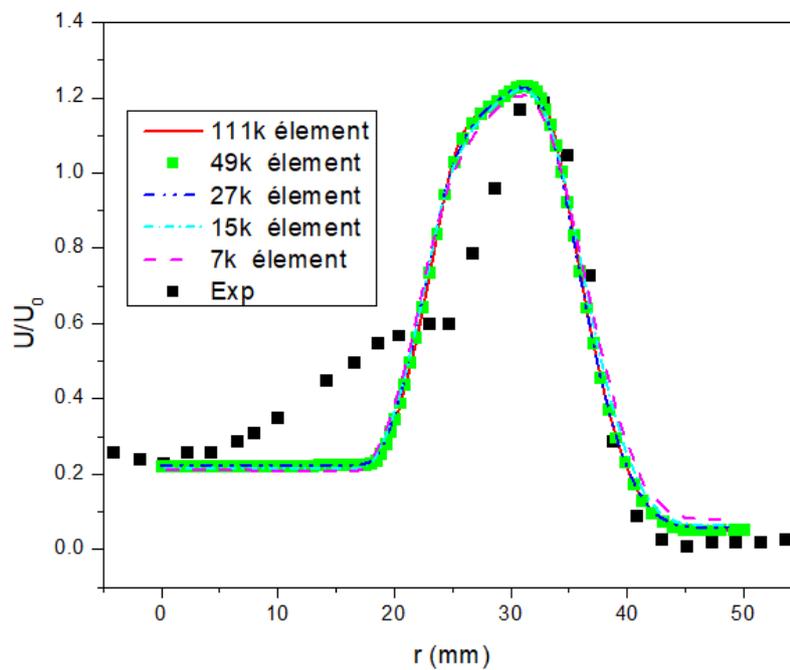


Figure III.3 vitesse axiale sur la section horizontale du bruleur pour différents nombres de maillages.

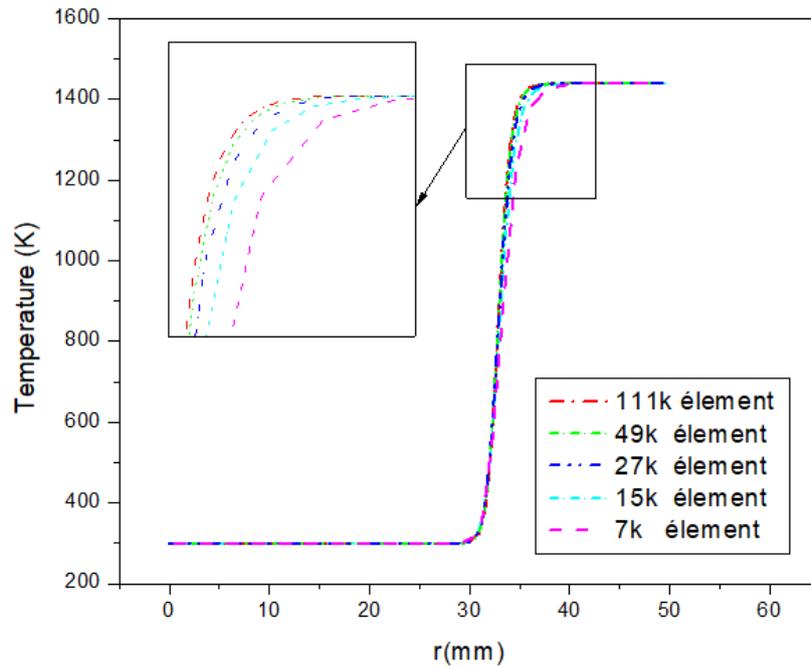


Figure III.4 Température (K) sur la section horizontale du bruleur pour différents nombres de maillages.

III.3 condition aux limites et opérateurs

Dans cette partie on va définir les paramètres utilisés lors de la simulation numérique ainsi que les conditions aux limites imposées. Le tableau III.1 résume les différents paramètres utilisés lors de notre simulation la pression opératoire, la température d'entrée et la vitesse d'injection ont prise de l'étude expérimentale proposée par R. K. Cheng et al [33].

Tableau III.3.1 condition opératoire

| Paramètre | Désignation |
|-----------------------------------|---|
| Modèle de combustion | Partially permixed model (Zimont , Peter) |
| Modèle de turbulence | k- ϵ (Standard, RNG et Réalisable) |
| Solveur | Axis-symétrique swirl 2D Pressure-Based |
| Température d'entrée | 300 K |
| Operating pressure | 1 atm |
| la vitesse laminaire de la flamme | 0.21m/s |

| | |
|--------------------------------|-------|
| Reynolds | 48054 |
| Vitesse d'entrée moyenne U_0 | 14m/s |
| Nombre de swirl S | 0.5 |
| Nombre de Schmidt turbulent | 0.5 |
| Nombre de Prandtl Pr | 0.85 |

a) **Plaque perforée axiale (axiale inlet) :** c'est la partie axiale du bruleur son rayon est de 20mm qui détermine la vitesse de l'écoulement purement axiale qui passe par la plaque perforée afin réduire sa vitesse et son taux de turbulence, la richesse du mélange méthane-air et son taux de turbulence. La condition à limite utilisée est une vitesse imposé et ses paramètres sont montrés dans le tableau 2.

b) **L'espace annulaire swirlé (swirl inlet) :** C'est la partie de l'espace annulaire de 17.5 mm qui entoure la partie axiale du bruleur le mélange réactif passe à travers cette section avec une composante de vitesse tangentielle (Swirle) et une composante axiale comme montre le tableau 2.

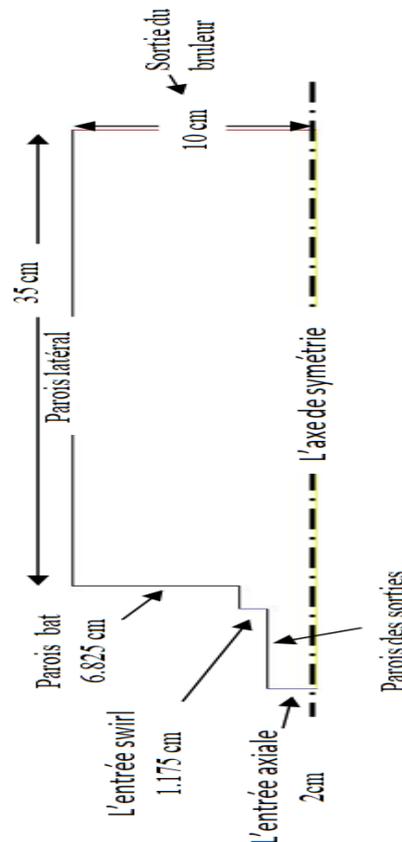


Figure. III.5 Condition aux limites

Tableau III.3.2 Condition aux limites sur la plaque perforée axiale et l'espace annulaire swirlé.

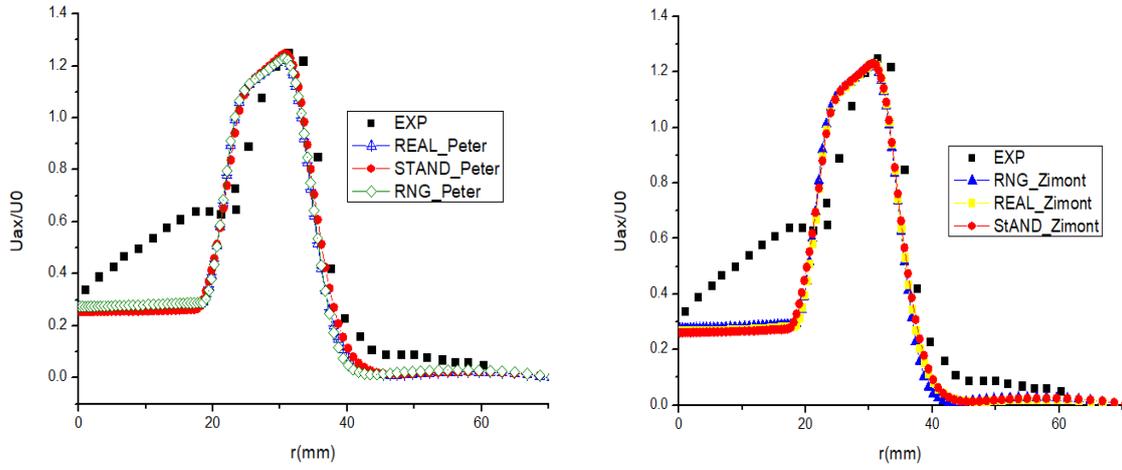
| Section | La richesse | U_{ax} (m/s) | U_s (m/s) | I % | D_h (mm) | Température (K) | Fraction massique Du carburant |
|------------------------------|-------------|----------------|-------------|-----|------------|-----------------|-----------------------------------|
| Axial inlet | 0.7 | 4.45 | 0 | 4 | 0.008 | 300 | 0.039 |
| | 0.45 | 4.45 | 0 | 4 | 0.008 | 300 | 0.02 |
| | 0.5 | 4.45 | 0 | 4 | 0.008 | 300 | 0.022 |
| Annulaire swirlé inlet | 0.7 | 14.64 | 12.45 | 4 | 23.5 | 300 | 0.39 |
| | 0.45 | 14.64 | 12.45 | 4 | 23.5 | 300 | 0.02 |
| | 0.5 | 14.64 | 12.45 | 4 | 23.5 | 300 | 0.022 |

III.4 Validation des résultats expérimentaux

La validation a été effectuée en comparant les résultats obtenus de la simulation numérique actuelle avec les résultats expérimentaux de R. K. Cheng et al [33].

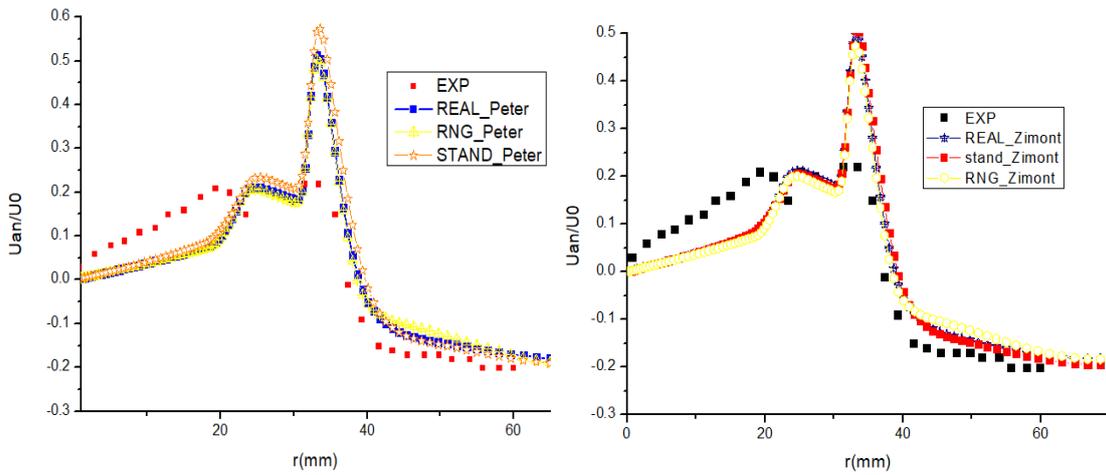
- **Pour Méthane-air**

La Figure III.6 représente une comparaison du résultat calculé avec les données expérimentales. Plusieurs variables ont été présentées sur une section horizontale au position $X=6\text{mm}$ de la sortie du brûleur et à une richesse $\phi=0,7$. la figure III.6(a) présente le profil de la vitesse axiale expérimentale comparé avec les résultats de simulation pour deux modèles de combustion Zimont [31] et Peter [30] qui sont couplés avec le modèle k-e., ainsi que dans la figure III.6 (b) et la figure III.6(c), une comparaison de la vitesse radiale et l'énergie cinétique turbulente respectivement sont présentés. En remarque dans les figures (a) et (b) qu'il y'a un petit décalage entre la courbe expérimentale et les autres courbes dans l'intervalle 0 à 20mm de rayon ou il y'a une surestimation, après 20mm les courbes sont proches à l'égalité. La figure (c) représente la racine d'énergie cinétique, le décalage est clair à cause de la différence de dimension ou nous avons travaillé avec 2D on a trouvé les mêmes résultats que ceux de Muppala et al 2014 [29]. On constate que la simulation reproduit le même profil que l'expérimentale. Des pics presque dans même position rayon R (mm), donc la simulation de méthane-air elle est en bon concordance avec les travaux expérimentaux.



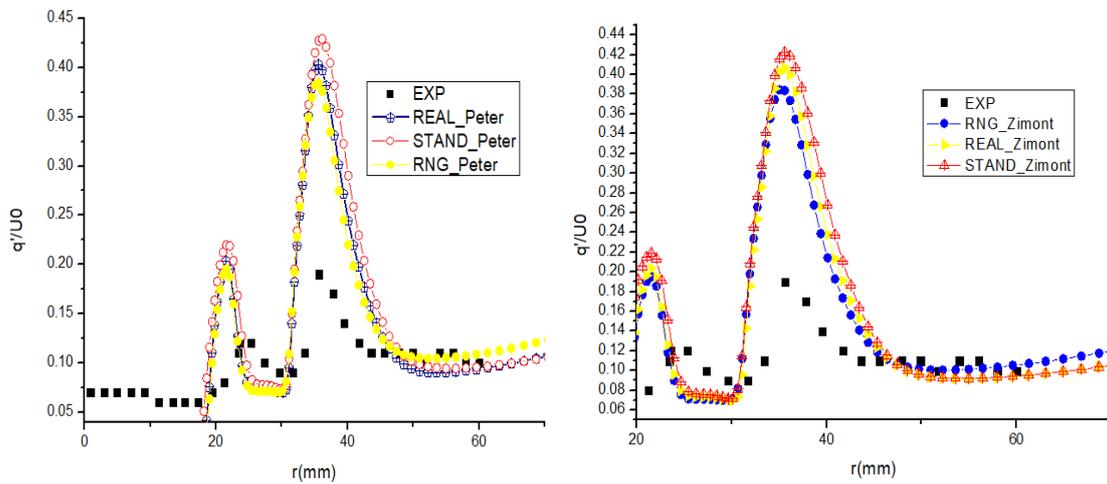
Comparaison de la vitesse axiale sur la section horizontale à $X=6\text{mm}$ et $\phi=0.7$

(a)



Comparaison de la vitesse radiale sur la section horizontale à $X=6\text{mm}$ et $\phi=0.7$

(b)



Comparaison de l'énergie cinétique sur la section horizontale à $X=6\text{mm}$ et $\phi=0.7$

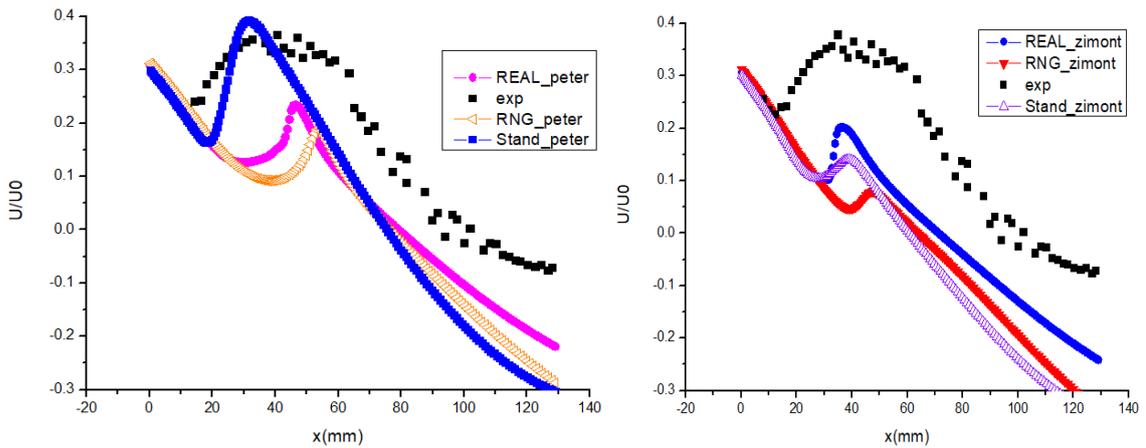
(c)

Figure III.6 Comparaison des profils à section horizontale de richesse 0.7 au point $X=6\text{mm}$.

Mélange Méthane-Hydrogène-air

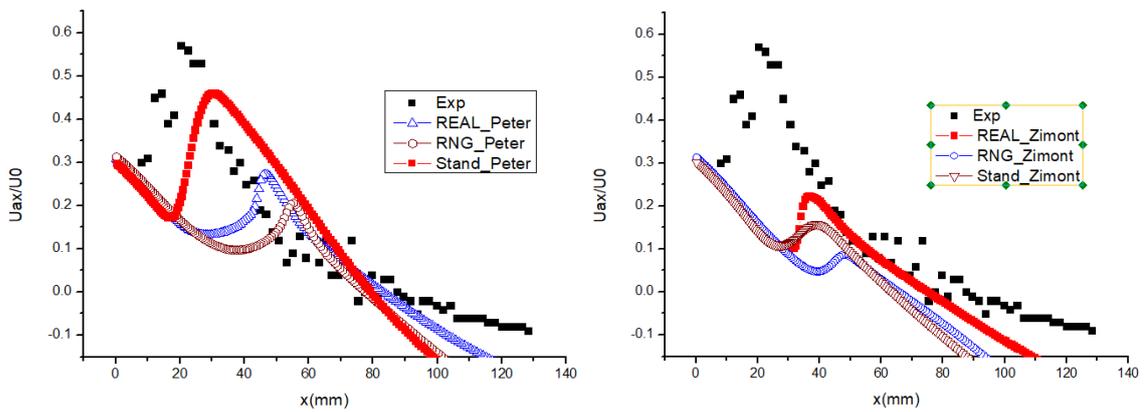
Dans ce cas on va valider et comparer les résultats de simulation d'ajout d'hydrogène avec les travaux expérimentaux, deux richesses ont été étudié ($\phi=0.45$ et $\phi=0.5$) et un seul mélange de Méthane-Hydrogène ($0.25 \text{ CH}_4, 0.75 \text{ H}_2$). La combustion à été modélisé avec deux modèles (Peter et Zimont).

La figure III.7 présente les vitesses axiales sur l'axe du bruleur de deux richesse la figure (a) avec $\phi=0.45$ et la figure (b) avec $\phi=0.5$, on remarque que le les courbes de modèle de Peter sont porches à la courbe expérimentale beaucoup plus le modèle $k-\epsilon$ STANDARD Peter.



Comparaison des profils de vitesse axiale sur la section verticale du bruleur de $\phi=0.45$.

(a)



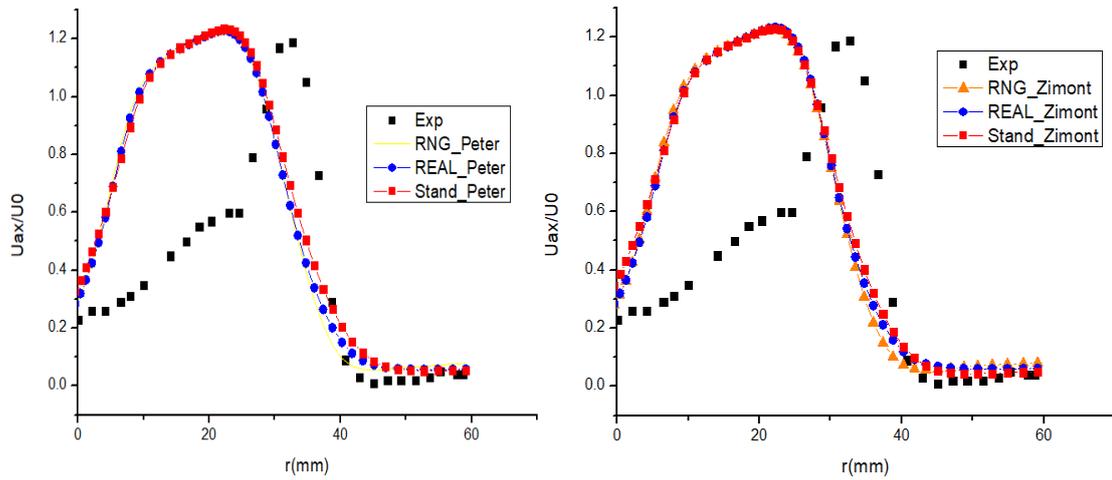
Comparaison des profils de vitesse axiale sur la section verticale du bruleur de $\phi=0.5$.

(b)

Figure III.7 Comparaison des profils de vitesse axiale sur la section verticale du bruleur.

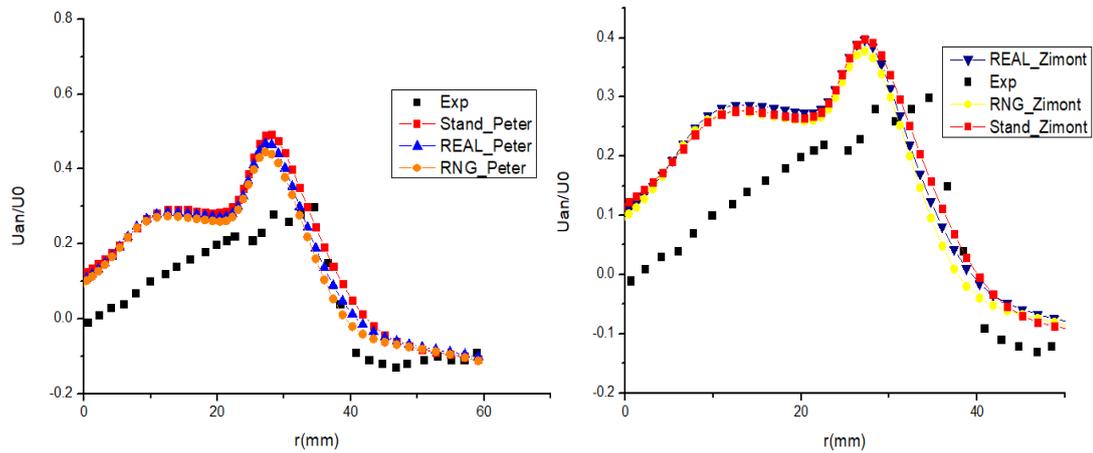
Les Figure III.8 et III.9 représentent une comparaison des vitesses axiale et radiale sur l'axe du bruleur pour la richesse $\phi=0.45$ dans une section située au position $X=10\text{mm}$. La figure (a) représente la vitesse axiale et figure (b) représente la vitesse radiale. Il est claire que les profils de vitesse sont très sensible au richesse ϕ . d'une façon générale la simulation de la richesse $\phi=0,45$ est mieux modélisé par apport au cas de la richesse de $\phi=0,5$. Pour le cas de $\phi=0,45$ la valeur maximum de la vitesse est bien prédit avec un décalage à la position de la valeur max et l'évolution de la courbe. Par contre dans le cas

de la richesse $\phi=0.5$ on constate que la simulation n'a pas bien reproduit l'expérimentales ce qui nous motive pour une autre étude plus approfondie sur l'effet d'ajout d'hydrogène dans une mélange méthane-air.



Comparaison des profils de vitesse axiale sur la section horizontale du bruleur de $\phi=0.45$ à $X=10\text{mm}$.

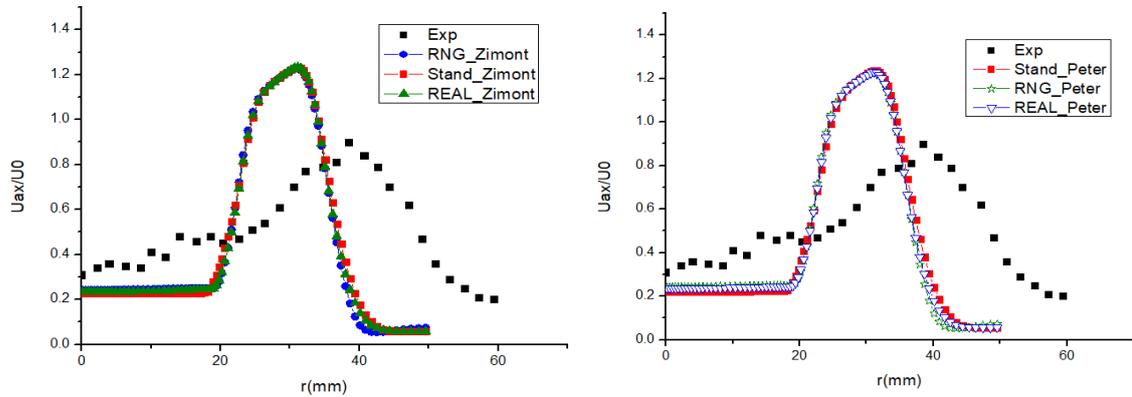
(a)



Comparaison des profils de vitesse radiale sur la section horizontale du bruleur de $\phi=0.45$ à $X=10\text{mm}$.

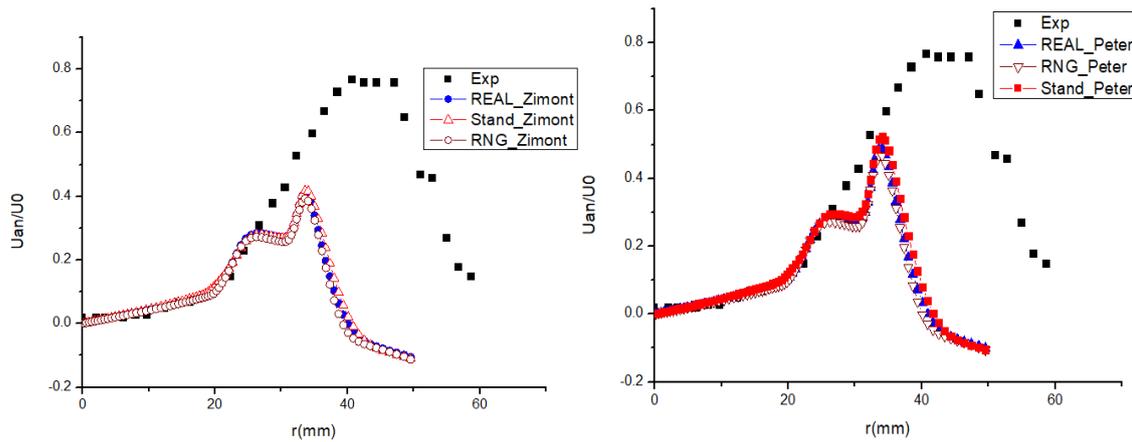
(b)

Figure III.8 Comparaison des profils de vitesse sur la section horizontale du bruleur de à $X=10\text{mm}$



Comparaison des profils de vitesse axiale sur la section horizontale du bruleur de $\phi=0.5$ à $X=10\text{mm}$.

(c)



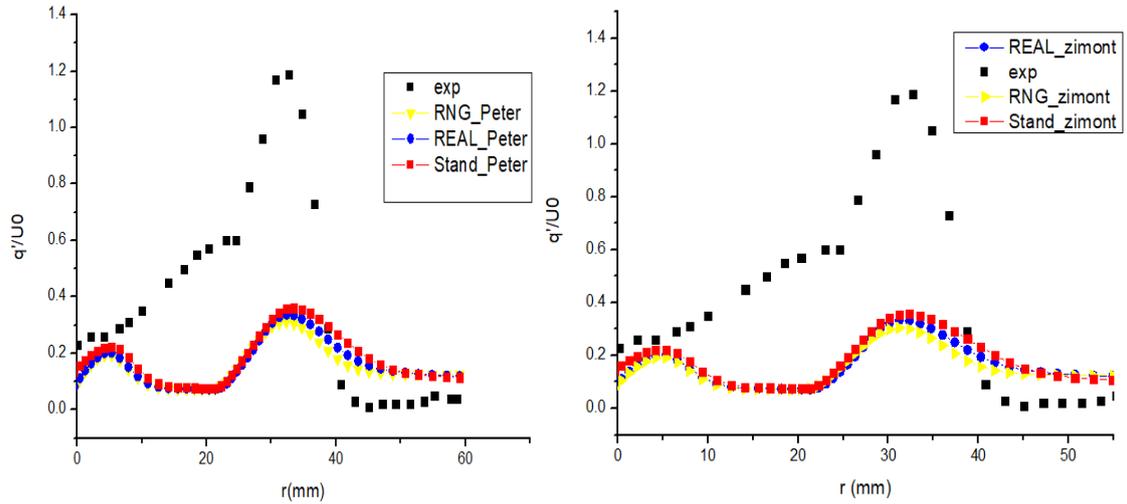
Comparaison des profils de vitesse radiale sur la section horizontale du bruleur de $\phi=0.5$ à $X=10\text{mm}$.

(d)

Figure III.9 Comparaison des profils de vitesse sur la section horizontale du bruleur de à $X=10\text{mm}$.

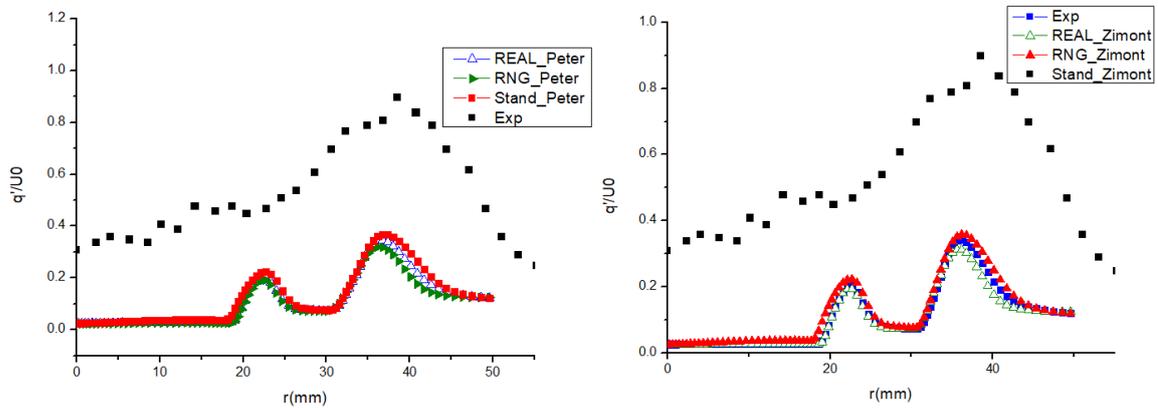
La Figure III.10 représente une comparaison d'énergie cinétique entre l'expérimentale et la simulation numérique par rapport à la section horizontale au point $X=10\text{mm}$ de deux richesses (0.45 dans la figure (a) et 0.5 dans la figure (b)). la comparaison dite que les courbes expérimentales sont monter à une direction incliné dans l'intervalle $r(0$ jusqu'à

25mm) après on remarque une piques d'énergie jusqu'à une énergie maximale mais dans la simulation numérique en a remarquer des courbes ondulées et une énergie inferieur à l'expérimentale



Comparaison des profils d'énergie cinétique vitesse sur la section horizontale du bruleur de $\phi=0.45$ à $X=10\text{mm}$.

(a)



Comparaison des profils d'énergie cinétique vitesse sur la section horizontale du bruleur de $\phi=0.5$ à $X=10\text{mm}$.

(b)

Figure III.10 Comparaison des profils d'énergie cinétique vitesse sur la section horizontale du bruleur à $X=10\text{m}$

Contours du champ de variable de progrès c :

La figure III.11 représente une comparaison des contours de progresse variable entre les travaux de Muppala et al [29] et notre simulation, en remarque dans les figures de Muppala (richesse $\Phi=0.4$) que les contours ont une formes d'un lettre V et aussi que la flamme au tour de sa forme. Dans notre simulation de avec une richesse $\Phi=0.45$, on a la même forme du champ réactionnelle avec une petite déformation dans la zone de la sortie axiale, ce qui peut être explique par la conversation de la géométrie real du bruleur 3D vers une configuration axisymétrique 2D.

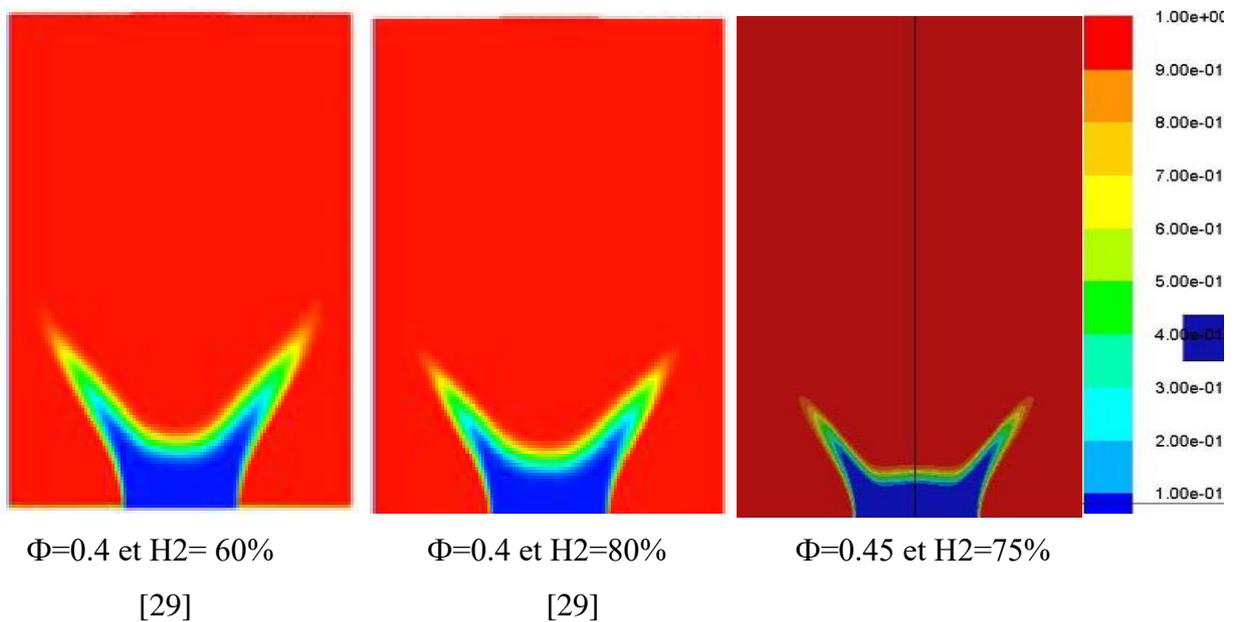
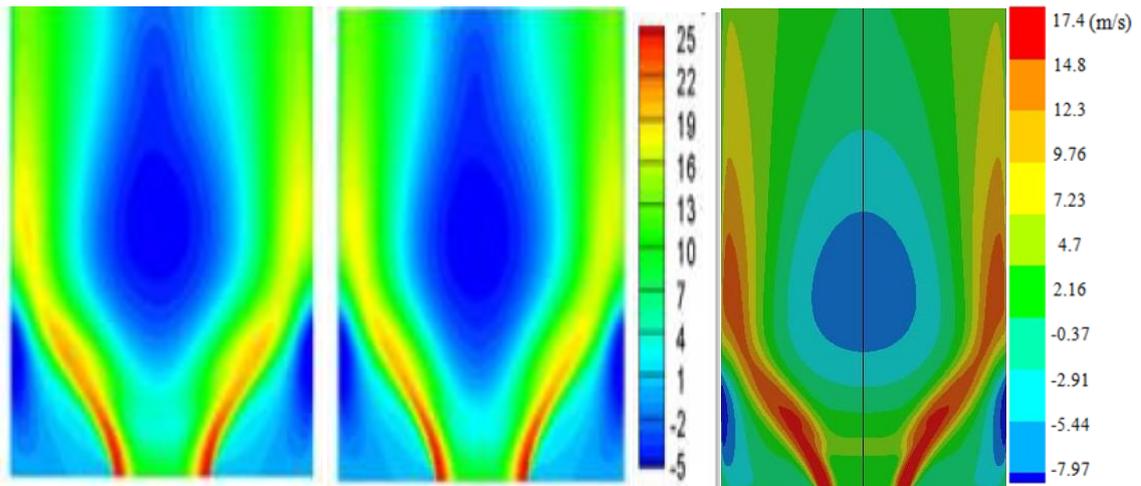


Figure III.11 Comparaison des contours de variable de progrès entre le résultat numérique en 3D de TFC de Muppala [29] et la simulation numérique en 2D.

La vitesse axiale :

Figure III.12 représente une comparaison entre les contours de vitesse axial entre la simulation en 3D de Muppala et al [29] et notre simulation numérique en 2D. Les figures de richesse $\Phi=0.4$ représente les contours de Muppala et la figure de richesse $\Phi=0.45$ représente le contour de la simulation numérique, on remarque que avec la simulation bidimensionnel peut reproduire le champ dynamique proche de celui de 3D.



$\Phi=0.4$ et $H_2=60\%$

[29]

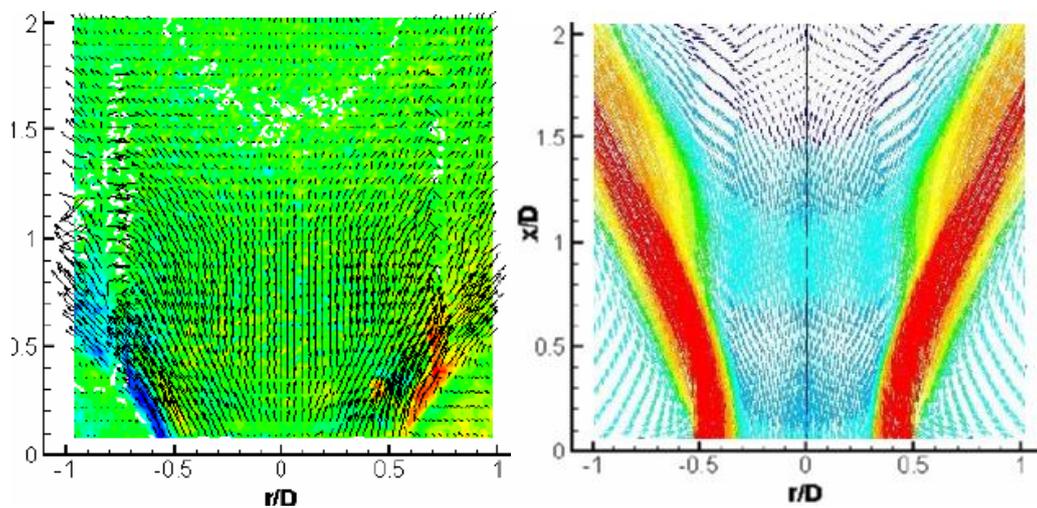
$\Phi=0.4$ et $H_2=80\%$

[29]

$\Phi=0.45$ et $H_2=75\%$

Figure III.12 Comparaison des contours de vitesse axiale entre le résultat numérique en 3D de TFC de Muppala et la simulation numérique en 2D.

La Figure III-13 représente le vecteur de champ dynamique de la vitesse axiale de l'expérimentale [33] et la simulation numérique, deux richesses $\Phi=0.45$ dans la figure (a) et $\Phi=0.5$ dans la figure (b). En remarquant dans la figure (a) que les vecteurs de la vitesse de l'expérimentale sont séparé lentement comme on a trouvé un même résultat dans la simulation numérique. Dans la figure (b) les vecteurs de vitesse axiale dans l'expérimentale sont séparé au début de la sortie du fuel et dans notre simulation numérique il y'a une apparence d'un vide dans le milieu de la flamme qui dit qu'on a une petite séparation.



[33]

(a) $\Phi=0.45$

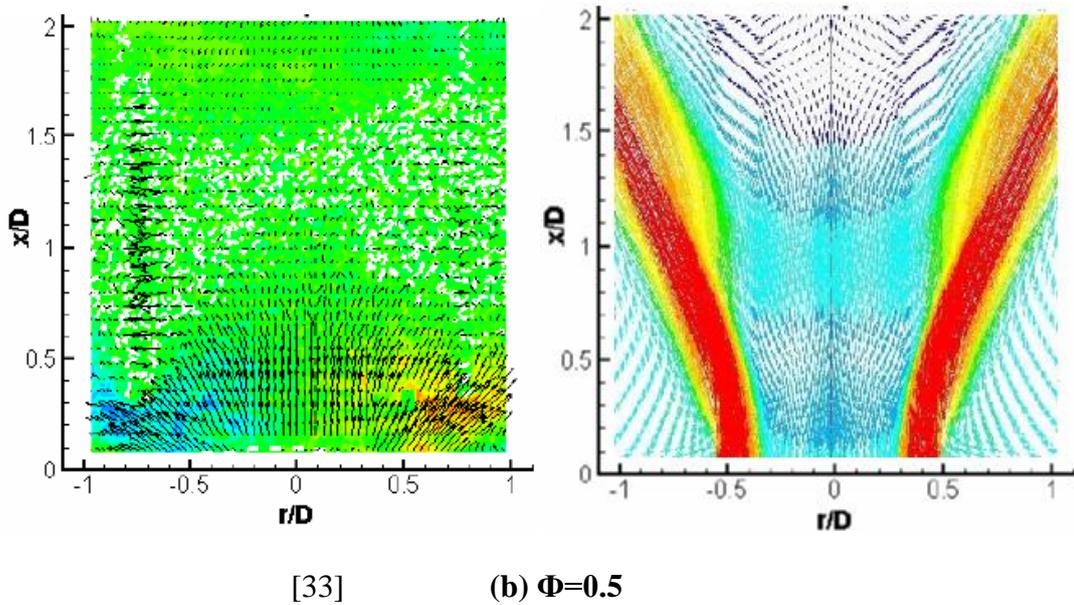


Figure III.13 Comparaison des vecteurs de vitesse axiale entre l'expérimentale et la simulation numérique ($0.75 \text{ H}_2 - 0.25 \text{ CH}_4$).

Conclusion

Le champ dynamique (la vitesse), l'énergie cinétique et le variable de progrès (combustion) sont présentés dans les figures précédentes pour deux richesses $\phi=0.45$ et $\phi=0.5$ avec un seul taux d'enrichissement d'hydrogène 75%. Les résultats trouvés sont satisfaisants et reproduisent les données expérimentales et comportement de l'écoulement surtout pour le cas $\phi=0.45$. En générale, Le couplage du modèle Peter et k- ϵ Standard il est plus proche aux résultats expérimentaux que les autres modèles.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans le cadre d'une étude de recherche sur le comportement de l'ajout d'hydrogène d'une flamme prémélangée du méthane-air. Une simulation bidimensionnelle a été proposée pour modéliser un brûleur à faible nombre de Swirl (LSB). L'objectif principal de cette étude est essentiellement basé sur la validation des résultats expérimental.

A fin d'aboutir à notre but, nous avons utilisé le code de calcul Fluent comme un outil numérique, qui est basé sur la méthode des volumes finis pour la résolution de l'équation de Navires-Stocks couplé avec l'équation de la combustion présentée par l'équation de la variable progrès c . Trois mélanges de richesse différente ont été utilisés dans cette étude (CH_4 -air $\phi=0.70$, H_2 - CH_4 -air $\phi=0.45$ et $\phi=0.45$) avec les mêmes conditions aux limites des travaux de Cheng et al [33].

Cette étude était concentrée sur la comparaison de plusieurs modèles de la turbulence k - ϵ (Standard, Réalisable et RNG) couplé avec le modèle partiellement pré mélangé pour le traitement de la combustion. On a validé plusieurs variables tel que les composantes de la vitesse, l'énergie cinétique turbulente (k) et la variable de progrès c calculé avec d'autres travaux [29, 33]. On a constaté que la corrélation de Peter donne des résultats plus proches que ceux du Zimont pour les composantes de la vitesse soit dans la direction axiale ou bien radial. Par contre l'énergie cinétique turbulente (k) a présenté même courbe que l'expérimentale avec une différence dans l'échelle de grandeur, car les modèles de la turbulence utilisés sont basés sur la modélisation de l'énergie cinétique (k) et sa dissipation (ϵ) qui rend le point faible du modèle est essentiellement concentré dans la manière de calculer de cette variable (k).

Pour les prochains travaux on recommande de faire une simulation en tridimensionnels 3D au lieu de bidimensionnel 2D pour rapprocher au cas réel. L'introduction d'un mécanisme réactionnel peut améliorer le traitement chimique de la combustion, surtout pour l'étude de la pollution. La modélisation du rayonnement thermique rend la simulation plus complète.

Références bibliographiques

- [1] Rohani, B., & Saqr, K. M. (2012). Effects of hydrogen addition on the structure and pollutant emissions of a turbulent unconfined swirling flame. *International communications in Heat and Mass Transfer*, 39(5), 681-688. Doi :10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.020
- [2] Ebi, D.; Bombach, R.; Jansohn, P. (2020). Swirl flame boundary layer flashback at elevated pressure: Modes of propagation and effect of hydrogen addition. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, vol, 38, n° 4, p. 6345-6353.
- [3] SAYAD, Parisa, SCHONBORN, Alessandro, KLINGMANN, Jens. Experimental investigations of the lean blowout limit of different syngas mixtures in an atmospheric, permixed, variable-swirl burner. *Energy & fuels*, 2013, vol. 27, n° 5, p. 2783-2793
- [4] Zhen, H. S., Leung, C. W., & Cheung, C. S. (2013). Effects of hydrogen addition on the characteristics of a biogas diffusion flame. *International Journal of hydrogen Energy*, 38(16), 6874-6881.
- [5] Yu, M., Zheng, L., Chu, T., & Guo, P. (2015). Effects of hydrogen addition on propagation characteristics of premixed methane/air flames. *journal of loss prevention in the Process Industries*, 34, 1-9. Doi :10.1016/j.jlp.2015.01.017.
- [6] Guo, Shilong; Wang, Jinhua; Zhang, Weijie; Zhang, Meng; Huang, Zuohua (2020). Effect of hydrogen enrichment on swirl/bluff-body lean premixed flame stabilization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(18), 10906–10919.

[7] MOHAMED, CHAOUR, SOFIANE , BOULKROUNE, MOUNIRA, Bourebia, et al. Etude numérique de l'influence des mélanges gazeux dans un four de réchauffage. In : journées d'Etudes Nationales de Mécanique, JENM'2015. 2015.

[8] Bouras, F., El hadi Attia, M., Khaldi, F., & Si-Ameur, M. (2017). Control of methane flame properties by hydrogen fuel addition : Application to power plant combustion chamber. International Journal of Hydrogen Energy, 42(13), 8932-8939. Doi :10.1016/j.ijhydene.2016.11.146

[9] ATTAIA, Mohamed El hadi, DRISS, Zied , et KHECHEKHOUCHE, Abderrahmane. Effet de l'ajout de Combustible d'Hydrogène sur la Flamme de Méthane : Application pour les paramètres Thermochimique.

[10] OZTARLIK, Gorkem, SELLE, Laurent, POINSOT, Thierry, et al. Suppression of instabilities of swirled premixed flames with minimal secondary hydrogen injection. Combustion and flame, 2020, vol.214, p. 266-276.

[11] KARIMAN MAJED, MH, EMADI, SA , NASIRI, E., et al. Comparaison des effets de différentes doses d'hydrogène sur les changements thermodynamiques des patients lors de l'induction de l'anesthésie. Journal de l'université Mazandaran des sciences technologies,2006,vol. 16,n° 54, p. 7-13.

[12] YAN, Yufei, TANG, Weimin, ZHANG, Li et al. Simulation numérique de l'effet de la fraction d'addition d'hydrogène sur les caractéristiques de micro-combustion catalytique du méthane-air. Revue internationale de l'énergie de l'hydrogène, 2014, vol. 39, n° 4, p. 1864-1873.

[13] HERNANDEZ-PEREZ, Francisco E., GROTH, Clinton PT, et GULDER, Omer L. simulation à grands tourbillons de flammes pré mélangées turbulentes hydrogène-méthane

maigre dans un régime dominé par le méthane. Journal Internationale de l'énergie de l'hydrogène , 2014, vol. 39,n° 13, p.7147-7157.

[14] MAMERI,Abdel baki. Etude numérique de la combustion turbulente du pré mélange pauvre méthane/air enrichi a l'hydrogène. 2015. Thèse de doctorat.

[15] KASHIR, Babak, TABELJAMAAT, Sadegh, et aJALALATIAN, Nafiseh. Une étude numérique sur les caractéristiques de combustion des flammes à diffusion tourbillonnaire stabilisées à corps bluffé méthane-hydrogène. International journal of hydrogen energy,2015, vol.40,n° 18, p. 6243-6258.

[16] PISA, Ionel, LAZROIU, Gheorghe, et PRISECARU, Tudor. Influence de l'injection de gaz enrichi en hydrogène sur les émissions polluantes de la combustion du carbon pulvérisé. Journal internationale de l'énergie de l'hydrogène, 2014, vol.39, n° 31, p.17702-17709.

[17] Sener, Ramazan, Ozdemir, Mehemed R., et Yangaz, Murat U. Influence de la géométrie du bol piston sur les caractéristiques de combustion et d'émission. Acts de institution of Mechanical engineers, Partie A : Journal of power and energy, 2019, vol. 233, n° 5, p. 576-587.

[18] CARLANESCU, Razvan, PRISECARU, Tudor, PRISECARU , MALINA et al. Injecteur à turbulence pour la combustion pré mélangée hydrogène-méthane. Journal of Energie Ressources Technologie, 2018, vol. 140, n° 7.

[19] AYOUB, Mechline. Etude de l'extension du régime de combustion sans flamme aux mélanges Méthane/Hydrogène et aux environnements à basse température. 2013. Thèse de doctorat.

[20] EMADI, Majid, KARKOW, Douglas, SALAMEH, Taleb et al. Modifications de la structure de la flamme résultant de l'enrichissement en hydrogène et de la pressurisation pour les flammes de méthane-air prémélangé à faible tourbillon. Journal international de l'énergie de l'hydrogène, 2012, vol. 37, n°13, p.10397-10404.

[21] KAUFMAN, Kelsey leigh. Effet de l'ajout d'hydrogène et du diamètre du brûleur sur la stabilité et la structure des flammes maigres prémélangé. 2014.

[22] ANGHAN, Chetan Kumar, DAVE, Sagar, SAINCHER, Shaswat et al. Simulation numérique directe de jets ronds transitoires et turbulents : évolution des structures tourbillonnaires et budget de turbulence. Physique des fluides, 2019, vol. 31, n°6, p.065105.

[23] Albouze G.(2009). Simulation aux grandes échelles des écoulements réactifs non prémélangé. Thèse de doctorat, Université de toulouse, Institut national polytechnique de toulouse.

[24] Yinli Xiao, School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Dongxiang Road No. 1, Xi'an, Shaanxi 710129, China.

[25] Cheng, Robert K. "Low swirl combustion." The Gas Turbine Handbook (2006): 241-255.

[26] Frédéric Marias, Jean-Rodolphe Puiggali, (1999). Simulation numérique d'un brûleur industriel. Analyse qualitative des effets de swirl sur l'écoulement et sur la production de polluants.

[27] Weber R. and Dugui J. (1991). Combustion accelerated swirling flows in high confinements. Prog. Energy Combust. Sci. 1992, Vol. 18, pp. 349-367.

- [29] S.P.R. Muppala, B. Manickam, F. Dinkelacker (2014). A COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT REACTIONMODELS FOR TURBULENT METHANE/HYDROGEN/AIR COMBUSTION. Journal of Thermal Engineering Yildiz Technical University Press, Istanbul, Turkey Vol. 1, Special Issue 1, pp. 367-380, February, 2015.
- [30] J. Ewald. "A Level Set Based Flamelet Model for the Prediction of Combustion in Homogeneous Charge and Direct Injection Spark Ignition Engines". PhD Thesis. Aachen University. 2006.
- [31] Zimont, V.L., Theory of Turbulent Combustion of aHomogeneous Fuel Mixture at High Reynolds Numbers.Combust. Expl. and Shock Waves, 1979. 15(3): p. 305-311.
- [32] Siva PR Muppala and Sooraj Paleli M Vasudevan 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **1080** 012046.
- [33] R. K. Cheng and D. Littlejohn. EFFECTS OF COMBUSTOR GEOMETRY ON THE FLOWFIELDS AND FLAME PROPERTIES OF A LOW-SWIRL INJECTOR. Power for Land, Sea and Air GT2008 June 9-13, 2008, Berlin, Germany.
- [34] R. K. Cheng D. Littlejohn, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720. DOI: 10.1115/1.2836480.
- [35] R.K. Cheng, D. Littlejohn, P.A. Strakey, T. Sidwell, Laboratory investigations of a low swirl injector with H₂ and CH₄ at gas turbine conditions. Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009) 3001–3009.
- [36] K-J. Nogenmyr, C. Fureby, X.S. Bai, P. Petersson, R. Collin, M. Linne (2009). Large eddy simulation and laser diagnostic studies on a low swirl stratified premixed flame.