N° Ordre...../DGM/FSI/UMBB/2019

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

Faculté des Sciences de L'Ingénieur
Département Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en Génie Mécanique

Spécialité

Energétique

Thème

Simulation numérique de différents modèles de turbulence et de combustion appliqués au brûleur swirlé pré-mélangée CH4/air.

Présenté par :

LARDJANE BAHDJA

Promoteur

Mme. M.LADJANI

Promotion 2018- 2019

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir accordé la force, le courage et les moyens pour la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier ma promotrice **M^me^. LADJANI** pour avoir accepté de m'encadrer ainsi que pour sa disponibilité, ses conseils, son précieux aide pour surmonter tout les contraintes rencontrées lors de ce mémoire.

J'ai l'honneur de remercier tout les membres du jury d'avoir accepté de lire et de juger ce travail.

Enfin, j'exprime mes profond reconnaissances envers mes parents, mon frère et sœurs et tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu de prés ou de loin durant la réalisation de ce travail.

Je dédie ce travail

À Ma très chère mère

À mon cher père

Je souhaite que ce travail soit à la hauteur de tout ce qu'ils ont fait pour moi

À mes très chères sœurs : ZOULIKHA, SIHEM, SOUAD, SOUNIA

À mon chers frères: AMINE , FICALE, RAFIKE, SAID

À ma famille

À mes très chers amis :

SELMA, SOULEF, BESMA, FELLA

À tous mes amis sans exception

LARDJANE BEHDJA

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale…….....1

Chapitre 1: Généralités sur la combustion et les bruleurs industriels.

1.1. Introduction 3

1.2. Processus de combustion..... 3

1.3. Différents types de combustion..... 3

1.4. Flammes de combustions 4

1.5. Mode de combustion et Classification des types de flammes 4

1.5.1. Combustion pré mélangée……5

1.5.2. Combustion non pré mélangée…….5

1.5.3. Combustion partiellement pré mélangée……..6

1.6. Combustion Turbulente pré-mélangée 7

1.7.Diagramme de la combustion turbulente pré-mélangée..... 7

1.8. Généralités sur les brûleurs industriels..... 9

1.8.1. Qu'est-ce qu'un brûleur ?.....9

1.8.2. Mode de fonctionnement du brûleur……..10

1.8.3. Classification et types des brûleurs……11

1.8.3.1. Type de mélange 11

1.8.3.2. Type de combustible 12

1.8.3.3.brûleurs LOW NO_x la nouvelle génération 13

1.10. Conclusion..... 15

Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les brûleurs LSB

2.1.Introduction 16

2.2. Déroulement chronologiques des recherches sur la combustion pré-mélangée..... 16

du méthane 16

2.3.Conclusion..... 34

Chapitre 3 : Formulations mathématiques et Simulation Numérique

3. 1. Introduction 35

3. 2. Formulations mathématiques 35

3.2.1.Equation de conservation de masse et d'espèces…….35

3.2.2. Equations de conservation de quantité de mouvement……...36

3.2.3.Equation de la conservation d'énergie…….37

3.2.3.1. Equations d'état 37

3.2.4. Equation de conservation des espèces chimiques……..38

3.2.5. Facteurs stœchiométriques…….38

3.2.6. Ecoulements swirlés……...39

3.2.6.1. Nombres de swirl $\boldsymbol{Sn}$ et $\boldsymbol{Sng}$ 39

3.3.Modélisation de la combustion 40

3.3.1. Modèle EDM (Eddy Dissipation Model)……...40

3.3.2. Le modèle Partially Premixed……41

3.3.2.1. Le modèle C-Equation 42

3.3.2.2. Le modèle d'équilibre et le modèle en fonction de densité de probabilité PDF43

3.3.2.3Le modèle de Zimont 43

3.4. Description du problème 44

3.5. Création de la géométrie 44

3.6. Les conditions aux limites..... 45

3.7. Conditions opératoires..... 46

3.8. Structure et test de maillage 47

3.9. Les propriétés physico-chimiques et thermiques des fluides (air, méthane)..... 48

3.10. Paramètres adoptés sous ANSYS Fluent 16.0 49

3.11. Critère de convergence..... 49

3.5.Conclusion..... 50

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4.1. Introduction……...51

4.2 Choix du modèle de turbulence……..51

4.2.1. Investigation de cas réactif pour le brûleur.....51

4.3. Choix du modèle de combustion……...54

4.4. Effet de la richesse du CH4……..56

4.4.1. Paramètres de l'analyse de l'effet de la richesse du **CH4**……..…....56

4.4.2. Effet de la richesse du **CH4** sur la température……..……....57

4.4.3. Effet de la richesse du **CH4** sur la vitesse axiale…….……....59

4.5.Conclusion……...62

Conclusion générale……..…..…....63

Références bibliographique……..…….……..64

Liste des figures

Figuer.1. 1. Flamme de combustion 4
Figuer.1. 2.Types de flamme pré mélangée..... 5
Figuer.1. 3. Types de flamme non pré mélangée..... 6
Figuer.1. 4.Diagramme des différents régimes de combustion turbulente prémélangée 7
Figuer.1. 5. Régimes de combustion turbulente pré-mélangée: (a) flamme mince plissée (flammelette), (b) flamme plissée-épaissie et (c) flamme épaissie 9
Figuer.1. 6. Schéma d'un brûleur. 10
Figuer.1. 7. Principe d'un brûleur à pré-mélange dans une chaudière à condensation 11
Figuer.1. 8. Schéma d'un brûleur à flamme de diffusion 11
Figuer.1. 9. Bruleur à gaz « contre- rotation » 12
Figuer.1. 10. schéma d'un bruleur à fuel-oil dans un four industrial 13
Figuer.1. 11. Forme de brûleur HSB (High Swirl Burner)..... 14
Figuer.1. 12.Flamme Brûleur LSB 15
Figuer.1. 13. Brûleur LSB (Low-Swirl Burner) 15
Figuer.2. 1. Configuration du bruleur de Bidat B. and Cheng R.K. (1995) 16
Figuer.2. 2. Schémas du LSB à air-injecter (à gauche) et du LSB à ailette (à droite) 17
Figuer.2.3. Deux Configurations du LSB choisies par R. K. Cheng (2017) : (a) à jet d'air et (b) avec un guide-vane 18
Figuer.2. 4. Comparaison des performances des LSB à jet d'air et à guide-vane montés dans un simulateur de chauffe-eau de 15 Kw..... 18
Figuer.2. 5. Bruleurs développé par Johnsona M.R. et al (2005)[..... 20
Figuer.2. 6. Schémas et photographies de low swirl injecteur 21
Figuer.2. 7. Dimension de brûleur LSI..... 21
Figuer.2. 8. Bruleur développé par Galpin J. et al (2008)[..... 22
Figuer.2. 9. Bruleur développé par Nogenmyr K.J. et al (2009) 23
Figuer.2. 10. Configuration d'une chambre de combustion (SimVal) choisie par R.K.Cheng (2009) 24
Figuer.2. 11. Bruleur de Littlejohn D. et al (2010)..... 25
Figuer.2. 12. Brûleur Tecflam Swirl et ses principaux états: (a-b) état non confiné et (c) état confiné 27
Figuer.2. 13. Brûleur Turbomeca Swirl Nozzle et ses principaux états confinés..... 27
Figuer.2. 14. Configuration de Cheng (1995) choisie par S.P.R. Muppala et al (2015) 28
Figuer.2. 15. Structure du brûleur à double anneaux à contre rotation de Cheng Tung Chong (2016)..... 29

Figuer.2. 16. Expérience d'installation expérimentale dans un environnement fermé 30
Figuer.2. 17. Schéma du brûleur à swirl variable et le swirler 31
Figuer.2. 18. Brûleur multi-becs avec différentes configurations : (b) co-swirling et (c) contre-swirling de Weijie Liu et al (2019) 32
Figuer.2. 19. (a) Principe de fonctionnement de l'injection de SB et (b) concept SB 33
Figure.3. 1.Paramètres géométriques du swirlér 40
Figure.3. 2. Structure du domaine de calcul selon «Muppala S.P.R et al (2015) »..... 45
Figure.3. 3.Structure de maillage..... 47
Figure.3. 4. Vitesses axiales sur l'axe du brûleur pour différents nombres de nœuds. 47
Figure.3. 5. Courbe de convergence du cas de simulation. 50
Figure .4. 1. Comparaison des profils de vitesse axiale sur l'axe du bruleur……...51
Figure .4. 2. Comparaisons des profils de vitesses axiales sur l'axe de bruleur dans le cas réactif……52
Figure .4. 3.Contours de la température sur l'axe du brûleur……...53
Figure .4. 4. Influence de modèles de combustion sur les profils de vitesses axiales sur l'axe du brûleur dans le cas réactif……...54
Figure .4. 5. Contours de vitesses axiales : (a) Modèle EDM ; (b) Modèle Partially-Premixed……...55
Figure .4. 6. Influence de modèles de combustions sur la distribution du CH4……..56
Figure .4. 7 Effet de la richesse sur profils de température sur l'axe du brûleur…….58
Figure .4. 8. Effet de la richesse sur les champs de températures……59
Figure .4. 9. Effet de la richesse sur les profils de vitesses axiales……..60
Figure .4. 10. Effet de la richesse sur les contours de vitesses axiales…….61

Liste des tableaux

Tableau 1. 1. Résumé des avantages et inconvénients principaux des trois modes de combustions présentés 6
Tableau 2. 1. Conditions de fonctionnement de Yinli Xiao et al (2018) 31
Tableau 3. 1. Les conditions aux limites imposées sur les deux configurations. 45
Tableau 3. 2. Les conditions aux limites à l'entéé d' air 45
Tableau 3. 3. Les conditions aux limites imposées sur la plaque perforée. 46
Tableau 3. 4. Les conditions aux limites imposées l'espace annulaire swirlé. 46
Tableau 3. 5. Conditions opératoires 46
Tableau 3. 6. Différents nombres des nœuds. 47
Tableau 3. 7.Les propriétés physico-chimiques et thermiques de l'air. 48
Tableau 3. 8.Les propriétés physico-chimiques et thermiques de méthane. 48
Tableau 3. 9.Paramètres adoptés sous ANSYS Fluent. 49
Tableau 3. 10. Facteurs de sous relaxation adoptés. 49
Tableau 3. 11.Résidus imposés pour l'étude de simulation numérique 50
Tableau 4. 1. Distribution des espèces chimiques sur la plaque perforée et l'espace annulaire swirlé en variant la richesse……..57

Nomenclature

Lettres latines

Symbole	Définition	Unité
c	Variable d'avancement de la réaction	[-]
$\bar{c}$	Variable d'avancement de la réaction moyenne	[-]
Cp	Capacité calorifique à pression constante	[J/kg.K]
Cv	Capacité calorifique à volume constant	[J/kg.K]
D	Diamètre du bec du brûleur	[m]
D_h	Diamètre hydraulique	[m]
D_k	Coefficient de diffusion de l'espèce k	[-]
R_c	Rayon de la plaque centrale perforée	[m]
R_i	Rayon du bec du brûleur	[m]
F	Force de volume	[m/s^2]
D_Φ	Débit du moment cinétique angulaire	[N.m]
G_X	Débit de quantité de mouvement axiale	[N]
h_T	Enthalpie totale	[J/kg]
$h_{S,k}$	Enthalpie sensible de l'espèce k	[J/kg]
I	Intensité turbulente	[%]
K	Énergie cinétique turbulente	[m^2/s^2]
m_k	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	[-]
Sch	Nombre de Schmidt	[-]
Sch_t	Nombre de Schmidt turbulent	[-]

T	Température	[K]
t	Temps	[s]
U_t	Vitesse de flamme turbulente	[m/s]
U_0	Vitesse d'entrée moyenne	[m/s]
U_{ax}	Composante de vitesse axiale	[m/s]
U_c	Vitesse axiale de la plaque perforée centrale	[m/s]
U_s	Vitesse axiale de l'espace annulaire swirlé	[m/s]
U_{st}	Composante de vitesse tangentielle swirlé	[m/s]
$V_{k,i}$	Vitesse de diffusion de l'espèce k dans la direction i	[m/s]
W	Masse moléculaire	[kg/mol]
x	Composante de direction axiale	[m]
Y	Fraction massique	[-]
i,j	Axes de directions	[-]

Lettres grecques

ε	Taux de dissipation de la turbulence	[m^2/s^3]
λ	Conductivité thermique	[W/m.K]
μ	Viscosité dynamique	[Kg/m.s]
μ_t	Viscosité turbulente	[Kg/m.s]
ν	Viscosité cinématique	[m^2/s]
ρ	Masse volumique du fluide	[Kg/m^3]
τ_{ij}	Tenseur des forces visqueuses	[N/m^2]
Φ	Richesse du mélange en CH_4	[-]
$\mathfrak{R}$	Flux de diffusivité moléculaire	[$Kg/m^2.s$]
σ_{ij}	Tenseur de la contrainte	[N/m^2]
δ_{ij}	Delta de Krönecer (=1 si i=j, =0 sinon)	[-]
ω_k	Taux de production de l'espèce k	[$mole/m^3.s$]
ω_t	Taux de dégagement de chaleur due à la combustion	[$J/m^3.s$]

Abréviations

LES	Large Eddy simulation
EBU	Eddy break-up
EDM	Eddy dissipation model
PDF	Probability density function
TFC	Turbulent flame closure
FSD	Flame Surface Density
SDR	Taux de dissipation scalaire
SSG	Reynolds Speziale-Sarkar-Gatski
CRZ	Central recirculation zone
GRI	Gaz reserchs institute
HSB	High swirl burner
LSB	Low swirl burner
HSI	High swirl injector
LSI	Low swirl injector

Introduction générale

L'énergie a un grand intérêt mondial et industriel. Ils existent plusieurs sources d'énergie, toutes ont un impact sur l'environnement à un moment ou à un autre de la chaîne de production. La conversion de l'énergie par combustion restera encore pendant quelques décennies l'un des sources dominants, notamment pour les installations de moyenne et grande taille telle que : les chaudières, les turboréacteurs, les moteurs à combustion interne, les turbines à gaz, bruleurs,…

Parmi les domaines d'applications liées à la combustion, dans le secteur industriel, les brûleurs constituent l'alternative la plus répondus pour convertir l'énergie fossile en énergie thermique. Mais c'est aussi un des secteurs posant les plus grands défis en matière de pollution et de changements climatiques. Ceci a incité plusieurs auteurs chercheurs, à optimiser le fonctionnement de ces brûleurs afin d'augmenter leurs rendements et diminuer leurs émissions.

La combustion soit d'un combustible solide (charbon pulvérisé, granulés de bois et déchets biomasse broyés) ou bien liquide (fioul, huile, fossile,…) émet des particules fines.
Le gaz naturel jeu d'une place enviable, Il est l'hydrocarbure le moins polluant que d'autres combustibles. À l'heure actuelle, de nombreux types de brûleurs a gaz sont disponibles on peut citer : les brûleurs atmosphériques, les bruleurs a air pulsé, Les brûleurs à prémélange, Brûleur pulsé "Low-NO_x" par recyclage des gaz, et enfin les bruleurs LSB (low swirl burner).
Cette technologie des bruleurs ou injecteurs à faible nombre du swirl (LSB ou LSI) qui a été introduit par **Cheng (1995)**, implique l'exploitation d'un concept de vitesses des flammes turbulentes dans un régime très pauvre près de LBO en permettant à une flamme détachée de se propager librement dans un champ d'écoulement divergent.

Chaque source d'énergie a des avantages et des inconvénients. Ainsi, il vaut mieux diversifier leur utilisation. Le choix de méthane (CH_4) résulte de fait qu'il est le composant principale constitue le gaz naturel (98%). Il procure la possibilité d'utiliser un type particulier de brûleurs industriels, dits «LSB», qui est une technologie modernes qui optimisent la combustion et limitent les émissions de substances polluantes telles que le CO ou les oxydes d'azote NOx.

Introduction générale

Suite aux exigences des normes anti pollutions les gouvernements de nombreux pays industrialisés s'apprêtent à mettre en œuvre des mesures contraignantes de réduction d'émissions nuisibles, parmi lesquelles on citera principalement les gaz à effet de serre, responsables du réchauffement global de la planète.

Le présent travail est une étude numérique d'influence du modèle de la turbulence et de combustion pour les bruleurs swirlés pré mélangé CH_4/air, en utilisation l'outil numérique ANSIS FLUENT 16. Dont l'objectif principal est de trouver le modèle de turbulence et de combustion le plus adéquat pour les brûleurs swirlés.

La turbulence a été traitée avec les modèles de turbulence : RANS k-ε STANDARD, k-ε RNG, k-ε REALIZABLE, k-ω STANDARD, k-ω SST couplé avec les modèles de combustion turbulente EDM (Eddy Dissipation Model) et Partially-Premixed .Cette combinaison offre un gain considérable en moyen et temps de calcul.

Organisation du mémoire

Ce mémoire se compose de quatre chapitres :

- Chapitre 1 : présente des généralités sur la combustion et les bruleurs industriels.
- Chapitre 2 : Cette partie constitue une étude bibliographique des recherches portées sur l'analyse des flammes prémélangées turbulentes stabilisées par swirl.
  Différents travaux ont été cités dans un ordre.
- Chapitre 3 : consacré à la modélisation de la combustion turbulente pré -mélangée et la formulation mathématique de notre problème.
- Chapitre 4 : présentent les résultats obtenus en comparons les modèles utilisés avec des résultats expérimentaux disponibles dans la littérature.

Chapitre 1: Généralités sur la combustion et les bruleurs industriels

1.1. Introduction

Ce chapitre présente généralement les notions de la combustion dans les milieux réactifs et swirlés, les différents types de combustions et de flammes. Egalement les bruleurs industriels ayant une partie dominante dans ce chapitre.

1.2. Processus de combustion[1]

La combustion désigne une réaction chimique évoluant rapidement, accompagnée d'émission lumineuse et d'un important dégagement de chaleur selon le schéma global suivant:

Combustible + Comburant → Produit de combustion + Chaleur

Plus précisément, cette réaction :

- Induit un fort dégagement de chaleur, qui a lieu dans une zone très mince (les flammes les plus courantes ont des épaisseurs $\delta_L$typiques de l'ordre de 0.1 à 1 mm) conduisant à des gradients thermiques très élevés [1].
- Correspond un temps de réaction fortement non linéaire (loi d'Arrhenius) [1].

1.3. Différents types de combustion

- **Combustion rapide**

La combustion rapide est une forme de combustion au cours de laquelle de grandes quantités de chaleur et d'énergie sous forme de lumière sont relâchées, donnant naissance au feu. Elle est utilisée dans certaines machines telles que les moteurs à combustion interne [2].

- **Combustion lente**

La combustion lente est une réaction se réalisant à des températures peu élevées. On peut citer le cas de la respiration cellulaire : cette lenteur due à des enzymes spécifiques permet d'augmenter les réactions d'oxydoréductions et ainsi d'obtenir un très bon rendement par récupération d'une grande partie l'énergie [2].

- **Combustion complète**

Lors d'une combustion complète, le réactif brûlera en présence de dioxygène (comburant) ce qui limite les produits de la réaction. Quand un hydrocarbure brûle dans le dioxygène, le produit est ainsi uniquement du dioxyde de carbone et de l'eau (Douce ou dure). Quand des éléments comme le carbone, l'azote, et le fer sont brûlés, on remarque la production des oxydes les plus communs [2].

- **Combustion incomplète**

La combustion incomplète a lieu quand il n y a pas assez d'oxygène pour permettre au combustible (souvent un hydrocarbure) de réagir complètement avec le dioxygène pour produire du dioxyde de carbone et de l'eau [3].

- **Combustion turbulente**

La combustion turbulente est une combustion caractérisée par des flux de chaleur. Elle est souvent utilisée dans l'industrie (par exemple: les turbines à gaz, les moteurs diesel…) car la chaleur facilite l'opération entre le combustible et l'oxydant [3].

1.4. Flammes de combustions [4]

Une flamme est un milieu réactionnel dans lequel se déroule une réaction de combustion. Elle est généralement associe à une zone réactive, lumineuse appelée front de flamme, onde de combustion ou encore zone de combustion. Les propriétés de propagation spatiale de la flamme résultent de l'action conjuguée de processus chimiques (production rapide de chaleur et d'espèces chimiques réactives), physiques (transport, diffusion), ainsi que de déplacement de matière (diffusion moléculaire) et de chaleur (convection). Donc, La flamme (zone de réaction) est le résultat du transport des espèces, du transport de la chaleur et de la réaction chimique. On a trois types de flamme à présenter

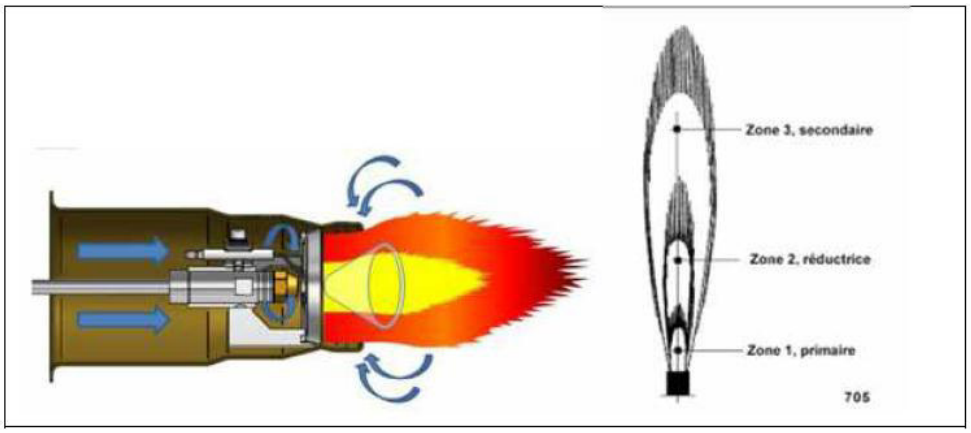


Figure.1.1. Flamme de combustion [4].

1.5. Mode de combustion et Classification des types de flammes

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

1.5.1. Combustion pré mélangée [5]

Est un mode de combustion où le carburant et l'oxydant sont pré mélangés avant d'atteindre le front de flamme. Ce mode est souvent utilisé en régime pauvre (le carburant est en quantité inférieure aux conditions stœchiométriques), permettant ainsi d'augmenter le rendement du système de combustion et de réduire la production d'oxydes d'azote, polluant très nocif dont on veut limiter la production. En contrepartie, les flammes obtenues sont souvent difficiles à maîtriser, nécessitant l'utilisation de dispositifs complexes d'accrochage de flamme.

De même, la question du stockage d'un mélange air/carburant dans la gamme de flammabilité est prépondérante et n'est pas envisageable dans un contexte industriel.

Figure.1.2. Types de flamme pré mélangée [6].

1.5.2. Combustion non pré mélangée [7]

Ce régime est certainement le plus facile à comprendre, où la réaction de combustion est l'oxydation du carburant. Cette configuration est la plus sûre car le combustible et l'oxydant sont en contact uniquement dans une zone limitée, mais sont séparées par ailleurs (en particulier dans le système d'alimentation). La diffusion d'oxydant et de carburant doit se produire 0simultanément à la réaction pour soutenir la combustion, la flamme étant une surface de séparation des flux de combustible et d'oxydant. Ce mode de combustion utilisé dans le cas des turbines aéronautiques et le carburant, mais a le désavantage de former plus de polluants, du fait des hautes températures atteintes dans le front de flamme.

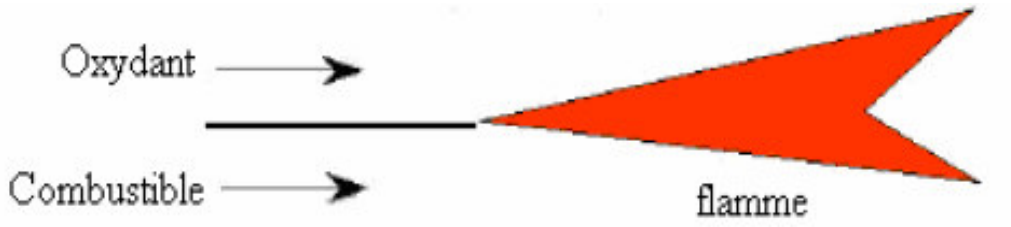


Figure.1.3. Types de flamme non pré mélangée [6].

1.5.3. Combustion partiellement pré mélangée [7]

Ce régime est un hybride du mode prémélange et le mode non-prémélangée, On sépare entre le comburant et le combustible au dehors de la chambre de combustion, puis sont injectés par deux flux différents, en amont du front de flamme, et sont supposés se mélanger avant d'atteindre le front de flamme.

La flamme partiellement prémélangée n'est pas encore bien compris.

Mode de Combustion	Avantages	Inconvénients
Pré mélangée	Peu polluant (en régime pauvre)	Instabilités de combustion, stockage du mélange
Non pré mélange	Stabilité de la flamme, stockage du carburant en dehors des limites de flammabilité	Production d'oxydes d'azote
Partiellement Pré mélangée	Peu polluant (en régime pauvre), stockage du carburant en dehors des limites de flammabilité	Instabilités de combustion, hétérogénéités de mélange

Tableau 1. 1. Résumé des avantages et inconvénients principaux des trois modes de combustions présentés [8].

1.6. Combustion Turbulente pré-mélangée

Un écoulement est turbulent, lorsque que la vitesse des gaz mesurée un point, fluctue continuellement de façon apparemment aléatoire, même en régime parfaitement établi; cela est vrai aussi pour la température et toute autre caractéristique du milieu. Cette turbulence est due à une forte vitesse de l'écoulement entrant ; elle s'est développée dans le canal amont à cause des gradients de vitesse aux parois et à partir d'obstacles tels que les injecteurs. Le taux de dégagement de chaleur et la structure de la flamme, selon des temps caractéristiques, qui sont souvent le temps de la réaction chimique $\tau_c$et le temps de fluctuation de l'écoulement τ_t[9].

1.7.Diagramme de la combustion turbulente pré-mélangée

La classification des régimes de combustion a été édifiée en se fondant sur la comparaison des échelles caractéristiques, spatiales et temporelles de la turbulence d'une part et de la flamme d'autre part. Pour une première approche, une description de la combustion pré-mélangée en écoulement turbulent peut être résumée à l'interaction entre un front de flamme ; caractérisé par son épaisseur δ_L et sa vitesse de propagation S_L et un ensemble de tourbillons représentant les structures turbulentes [10]

Ce type de classification, conduisant aux diagrammes combustion, c'est-à-dire à une représentation graphique des différents régimes de combustion en fonction des nombres caractéristiques qui vise à aider au choix d'un modèle de combustion turbulent en fonction des régimes.

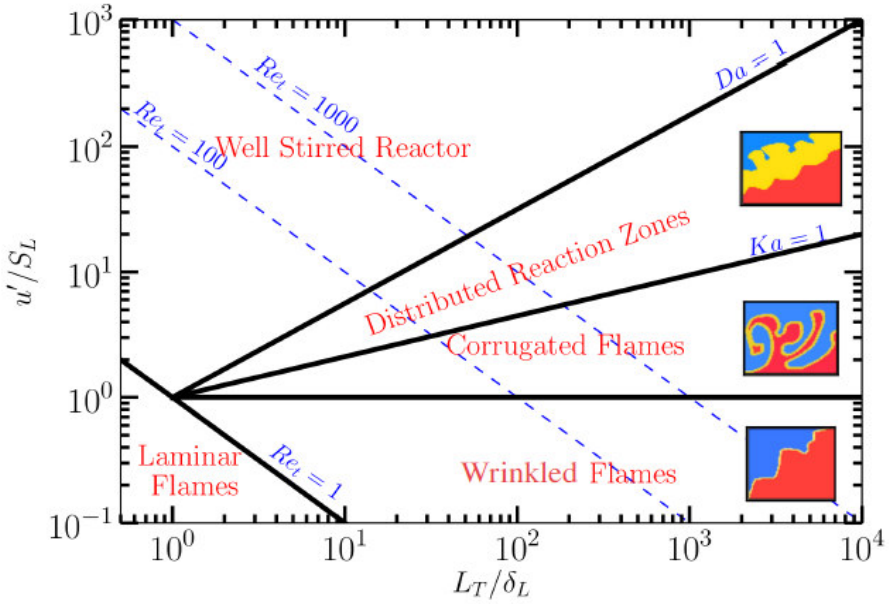
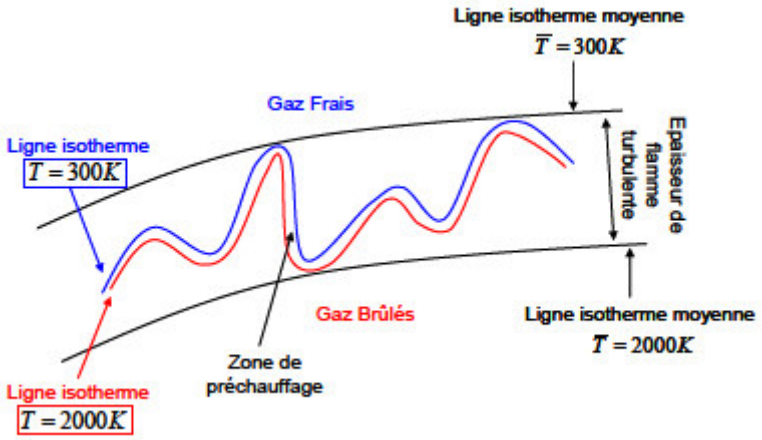


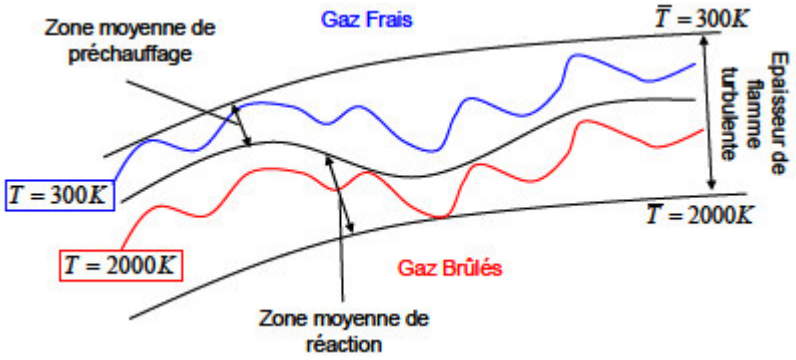
figure.1.4. Diagramme des différents régimes de combustion turbulente prémélangée [11].

La figure.1.5.montre le diagramme de régimes pour la combustion pré-mélangée tel que :

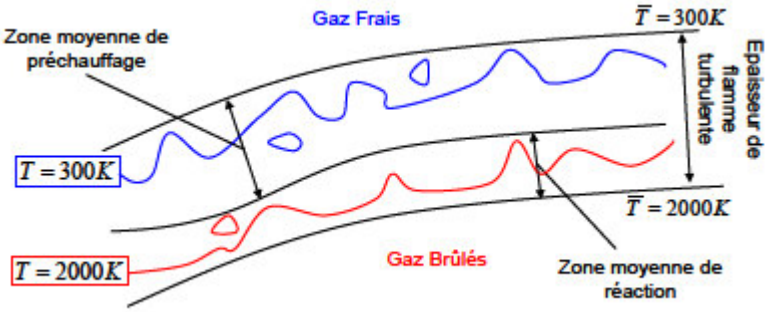
- Le premier régime est dit régime **« des Flammes plissées »** ; ce type de flamme plissée se compose d'une ou plusieurs flammelettes laminaires qui sont plissées par la turbulence. Les échelles de longueur de la turbulence sont toutes plus grandes que l'épaisseur de flamme laminaire. Une photographie instantanée d'une flamme de type plissée révélerait une très longue flammelette d'épaisseur fortement ondulée suivant une large gamme de rayons de courbure et dont les plissements occupent une large bande d'épaisseur. En raison de la vitesse de propagation du front de flamme, une concavité a du mal à se former du côté des gaz brûlés, tandis qu'elle est favorisée du côté des gaz frais. La figure (1.6) schématise cette représentation [10].
- Le second régime est dit régime **« des flammes plissées-épaissies »** ; dans ce régime les structures turbulentes sont capables de pénétrer dans la zone de préchauffage et de l'épaissir mais ne peuvent affecter la zone de réaction, qui reste mince et proche de celle d'une flamme laminaire [10].
- Le troisième régime est dit régime **« des flammes épaissies »** ; Ce régime est autrement dénommé réacteur bien mélangé dans lequel les zones de préchauffage et de réaction sont perturbées par la turbulence et aucune structure de flamme laminaire ne peut être identifiée L'interaction entre un front de flamme et un tourbillon est par nature instationnaire et plus petits tourbillons sont les plus efficaces pour étirer la flamme [10].



(a) flamme mince plissée (flammelette)



(b) flamme plissée-épaissie



(c) flamme épaissie

Figure 1.5. Régimes de combustion turbulente pré-mélangée: (a) flamme mince plissée (flammelette), (b) flamme plissée-épaissie et (c) flamme épaissie [12].

1.8. Généralités sur les brûleurs industriels

1.8.1. Qu'est-ce qu'un brûleur ?

Les bruleur sont les autres dispositifs industriel les utilisant la combustion qui sont utilisés dans des foyers, des fours, ou des chaudières ; leur intérêt n'est pas de propulser un véhicule de type quelconque, mais de fournir « de la chaleur », ou de détruire ou

transforme certains produits. Ila sont utilisée dans l'industrie, ou dans les centrales thermique. En fait, les moteur eux- mêmes, que fournissent de l'énergie mécanique, produisent d'abord ce qu'on appelle communément de la chaleur (c'est-à-dire des gaz chaude) avant que celle-ci soit transformée, par la tuyère la turbine, ou le piston, en ce qu' on appelle d'habitude « travail ». Aussi les chambres de combustion des moteurs sont exactement des bruleurs, et il ne faut pas s'étonner si les brûleurs industriels leur ressemblent plutôt, en général [13].

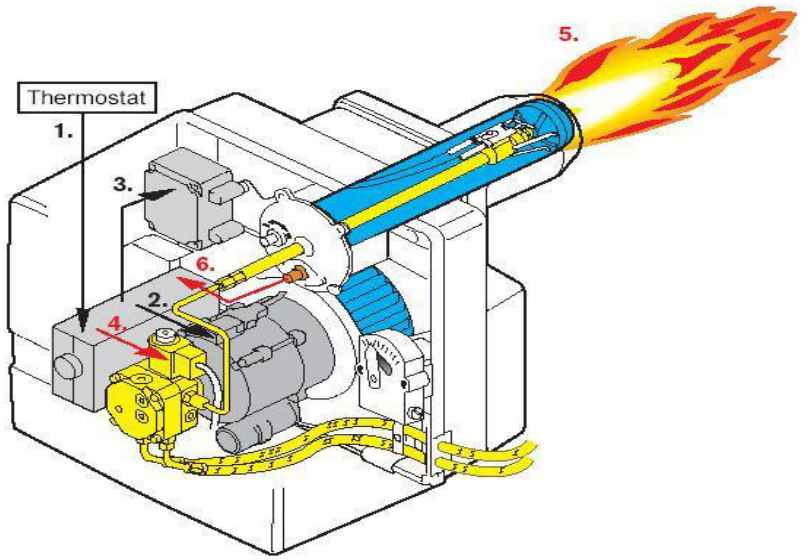


Figure .1.6. Schéma d'un brûleur.

1.8.2. Mode de fonctionnement du brûleur [14]

Le mode de fonctionnement du brûleur fioul peut se décomposer manière séquentielle :

- **Pré-allumage :** mise sous tension du transformateur qui permet le fonctionnement du moteur.
- **Mise à feu :** ouverture de l'électrovanne qui envoie le fuel vers le gicleur.
- **Post-allumage :** étape qui consiste à garder une étincelle après l'apparition de la flamme, de telle sorte à la stabiliser.
- **Régime de fonctionnement :** mise hors tension du circuit d'allumage après stabilisation de la flamme.
- **Arrêt :** arrêt de l'électrovanne et du ventilateur puis mise hors tension du brûleur après utilisation de la chaudière (plus d'eau chaude ou extinction/non usage du chauffage).

1.8.3. Classification et types des brûleurs

De nombreux types de brûleurs existent suivant le critère retenu, à savoir :

1.8.3.1. Les Type de mélange

Cette méthode courante pour classer les brûleurs est basée sur la façon dont le carburant et le comburant sont utilisés : mélangés ou non mélangés. Ainsi, on peut distinguer deux types de brûleurs:

- **Brûleurs à pré-mélange (pré-mix)**

L'air est mélangé au gaz dans une chambre de pré-mélange. La technique de pré-mélange permet d'affiner le dosage entre l'air et le gaz et donc de diminuer l'excès d'air en visant d'augmenter la surface des flammes. Il en résulte une augmentation du rendement de combustion et une diminution des émissions polluantes (***NOX***) [15].

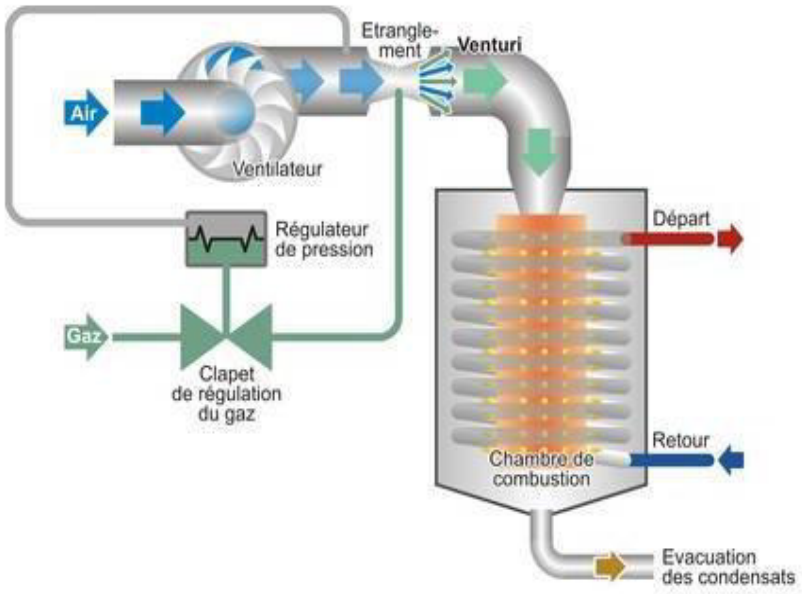


Figure1.7. Principe d'un brûleur à pré-mélange dans une chaudière à condensation [15].

- **Brûleurs à flamme de diffusion**

Dans ce type du brûleur, le combustible et le comburant restent séparés et non mélangés avant la combustion [16].

Figure 1.8. Schéma d'un brûleur à flamme de diffusion [16].

1.8.3.2. Les type de combustible

Le combustible alimentant un brûleur peut être gazeux, liquide ou solide, seul ou en mélange.

Donc, selon la nature de combustible utilisé, on peut sélectionner trois types de brûleurs:

- **Brûleurs à gaz [13]**

Industriel est représenté en figure. 1.9. lci l'air est amené de façon bien contrôlé, et non pas seulement entrainé par le jet de gaz. De plus un mouvement tourbillonnaire très intense est organisé dans le bruleur, ce que allonge le temps de parcours du fluide à l'intense et produit une intense turbulence. Le résultat est que la combustion prend place dans le bruleur (une fois allumé) un peu comme dans la zone primaire d'un foyer de turboréacteur ;on a peut –on reconnaitre au fond du bruleur une zone plus froide et plus riche en méthane, et les gaz à la sortie sont-ile plus chaude au centre qu'à la périphérie ; d'ailleurs ce défaut d'homogénéité est plutôt bénéfique pour la tenue des matériaux.

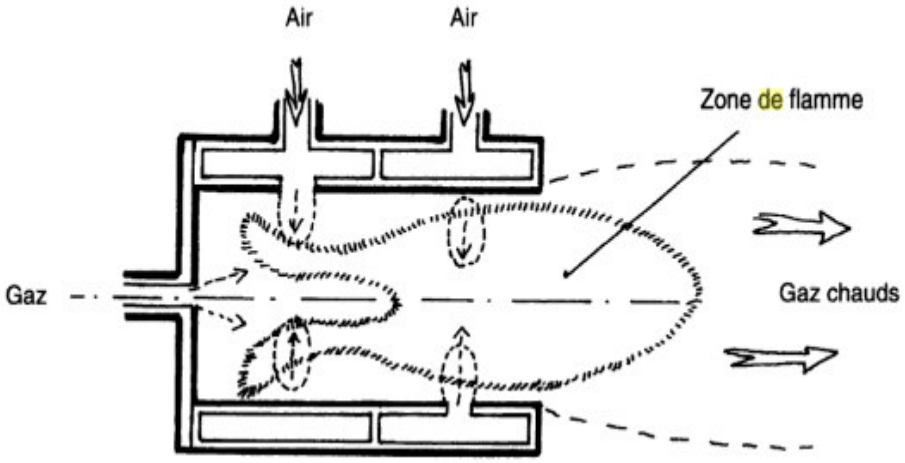


Figure .1.9. Bruleur à gaz « contre- rotation » [13].

- **Brûleur à fuel-oil [17]**

Dans les fours industriels ou les chaudières les bruleurs à fuel-oil les plus répandus sont ceux à jets axiaux, (voir la figure 1.10) L'injection du fuel-oil se fait sous la forme de gouttelettes fournies par le jet central tandis que l'air est amené par le jet annulaire. Une idée afin d'accrocher la flamme sans utiliser un obstacle, se base sur la mise en rotation du jet périphérique par rapport à l'axe du brûleur. Cette rotation engendre une dépression qui produit ensuite une zone de recirculation assez proche de buses de fuel-oil permettant de stabiliser le noyau de gaz chauds (en combustion). A partir de ce noyau une flamme de Diffusion commence à se développer. La longueur de la flamme est considérée parmi les

paramètres importants dans le dimensionnement et la fabrication des fours et/ou des chaudières.

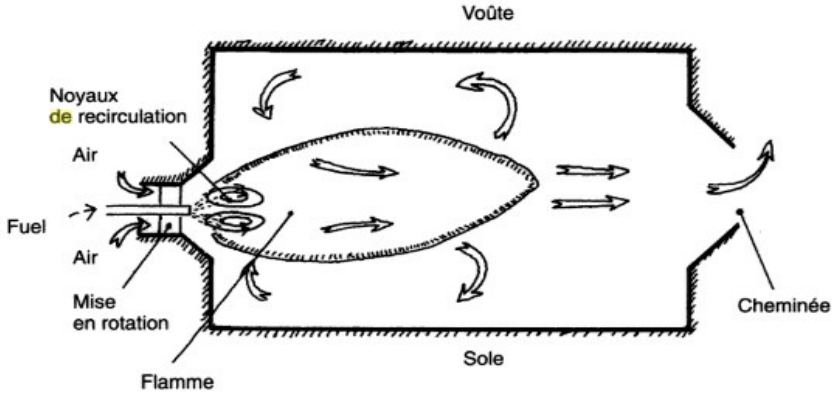


Figure .1.10. Schéma d'un bruleur à fuel-oil dans un four industriel [17].

- **Brûleur à charbon**

sont très utilisés dans le monde, mais sont mainte- nant bien plus rares que par le passé en France ;de plus, leur conception a changé de façon assez radicale. Les premiers brûleur ou foyers à charbon uti - lisaient le même principe (ou presque) que le classique poêle de nos grand- mères. Le même principe(ou principe) que le classique poêle de nos grand- mères. Le charbon, cassé en morceaux de taille notable (plusieurs cents - mètres) était répandu sur une grille, et brûleur avec l'air que passait au travers de cette grille et autour des morceaux .De tels foyers ne sont plus utilisés de nos jours dans l'industrie, sauf lorsqu'on veut brûleur des ordures ou d'autres produite à la place de charbon . Les brûleurs à charbon utilisent maintenant du « charbon pulvérisé »,C'est-à-dire broyé en particules de diamètre plus fin que le millimètre ; ces particules peuvent alors être emportées dans un courant d'air, traverser le circuit d'alimentation et être injectées dans le brûleur un peu de la même façon que le serait un liquide . Les brûleurs à charbon pulvérisé ressemblant donc maintenant à des brûleurs à fuel-oil [13].

1.8.3.3. Brûleurs LOW NO_x, la nouvelle génération

Les avancées technologiques en matière de brûleurs ont permis la mise en place de brûleurs qui émettent moins de résidus de fuel (surplus de fuel non brûlé), principalement des oxydes d'azote (désignés par le terme générique NO_x), qui sont le résultat du mélange de l'azote (N) rejeté dans l'air après la combustion et du dioxygène (O_2)[14]. on peut citer là :

- **Brûleurs LOW-NOX à swirl élevé HSB (High-Swirl Burner)**

La conception typique d'un brûleur à tourbillon élevé consiste en une section tourbillonnante annulaire avec des aubes incurvées ou plates fixées à un corps central plein. Le carburant est généralement injecté à travers des rayons placés juste en amont ou en aval de chacune des aubes ou à travers les aubes elles-mêmes. Le corps central agit comme une ancre de flamme en produisant dans son sillage un vortex toroïdal étroit qui entraîne et fait recercler les produits de combustion chauds pour enflammer en continu les réactifs [15].

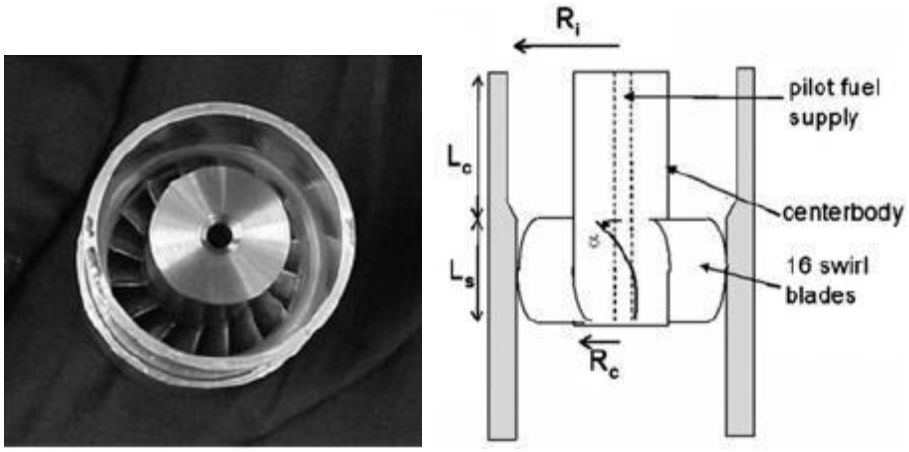


Figure .1.11. Forme de brûleur HSB (High Swirl Burner) [23].

Le brûleur HSB utilise les zones de recirculations pour obtenir une stabilité de flamme.
La complexité de la structure de la zone de recirculation est la principale cause des caractéristiques non linéaires des flammes générées par HSB. Ces non-linéarités ont moins d'effets sur les brûleurs non pré-mélangés et les brûleurs partiellement pré-mélangés, mais peuvent être préjudiciables aux brûleurs pré-mélangés qui fonctionnent à des conditions très économes en carburant pour le contrôle des NOX. Dans ce HSB, la flamme pré-mélangé pauvre devient instable avec la diminution de la richesse à une valeur limitée et finit par s'éteindre avec une réduction supplémentaire de la richesse [15].

- **Brûleurs low-NOX à faible swirl LSB (Low-Swirl Burner)**

Le mécanisme de stabilisation des flammes à faible tourbillon fonctionne selon un principe différent. Il exploite le concept de vitesse des flammes turbulentes en permettant à une flamme détachée de se propager librement dans un champ d'écoulement divergent.

Cette flamme s'établit lorsque la vitesse locale est égale à la vitesse de la flamme et la région de divergence du débit (générée par un faible swirl) au-dessus du tube du brûleur est l'élément clé de cette technologie .

Ce LSB introduit par Cheng (1995) a été une configuration expérimentale très utile pour les études des structures de flamme turbulente pré-mélangée. Il a de faibles limites de LBO et une bonne stabilité de combustion dans des conditions très pauvres et très turbulentes. L'adaptation de ce nouveau concept à l'équipement de chauffage a été couronnée de succès [15]

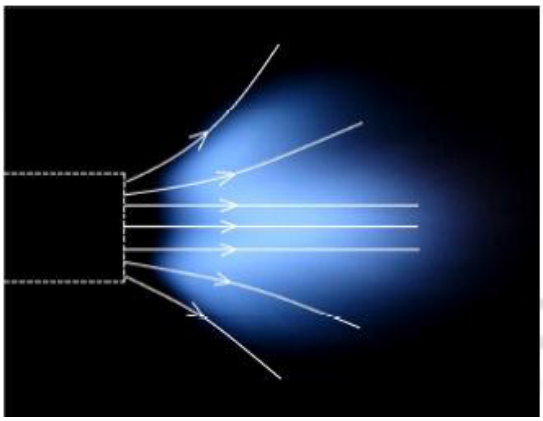


Figure 1.12. Flamme Brûleur LSB[18].

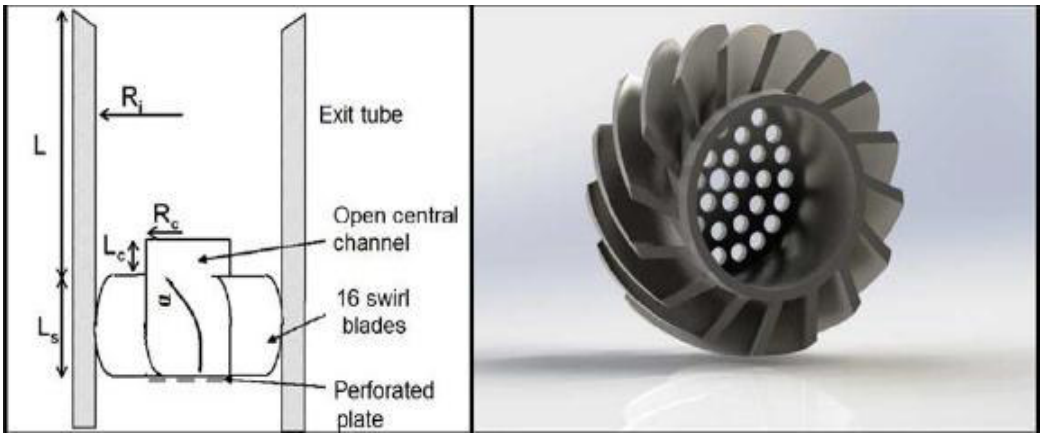


Figure.1.13. Brûleur LSB (Low-Swirl Burner)[18].

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit une notion générale de la phénoménologie de la combustion et les brûleurs ensuit on a donné des généralités sur les écoulements réactifs swirlés.

Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les brûleurs LSB

2.1. Introduction

Cette étude bibliographique est une synthèse des travaux portés sur les flammes prémélangées turbulentes de méthane-air stabilisées par swirl adoptant une configuration LSB ou LSI. Elle se compose de recherches numériques, expérimentales et analytiques.
Ces recherches œuvrent à décrire les paramètres régnants sur ce type flammes, à savoir ; les techniques de stabilisation des flammes, la compréhension des instabilités de la combustion liées à la fluctuation de la richesse, de la géométrie du bruleur, la fluctuation de vitesse et celle de la turbulence et le comportement des flammes en régime pauvre.

2.2. Déroulement chronologiques des recherches sur la combustion pré-mélangée du méthane

- **Bidat B. and Cheng R.K. (1995)[19]**

Ils ont présentés une étude expérimentale sur le comportement des flammes prémélangées dans une turbulence intense et isotrope. Ils ont mis au point une méthode d'analyse des flammes en utilisant un bruleur qui est munis d'un générateur de turbulence qui stabilise la flamme par un faible tourbillon. Ils ont montré que la configuration du bruleur proposé produisait des flammes stables avec une large gamme de conditions de mélange et d'intensités turbulentes. Ils se sont servis de l'anémométrie laser doppler (LDV) et des techniques de diffusion de Rayleigh pour la détermination des statistiques de turbulence et des scalaires étudiés.

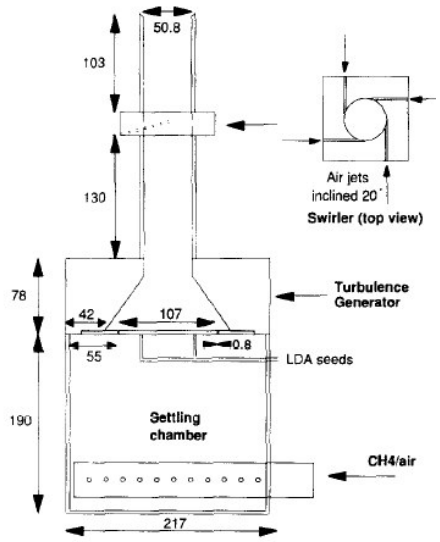


Figure 2.1. Configuration du bruleur de Bidat B. and Cheng R.K. (1995) [19].

La figure 1.1 montre la structure du bruleur développé par Bidat B. and Cheng R.K.(1995). Cette configuration a été le début des recherches sur les techniques d'optimisation des bruleurs LSB dans le but de réduire le nombre de swirl.

- **Yegian, D. T et al (1996) [20]**

Ils ont développé une étude expérimentale d'un swirler économique et simple permettant de remplacer le jet swirler du brûleur Weak-Swirl par le swirler à ailettes (vane-WSB) pour le but de produit le champ d'écoulement divergent nécessaire pour stabiliser une flamme pré-mélangée pauvre au-dessus de la sortie du tube du brûleur.

En termes des performances, le WSB à palettes utilisant dans une turbine, améliore les émissions de CO tout en obtenant le même rendement thermique et de faibles émissions de NO.

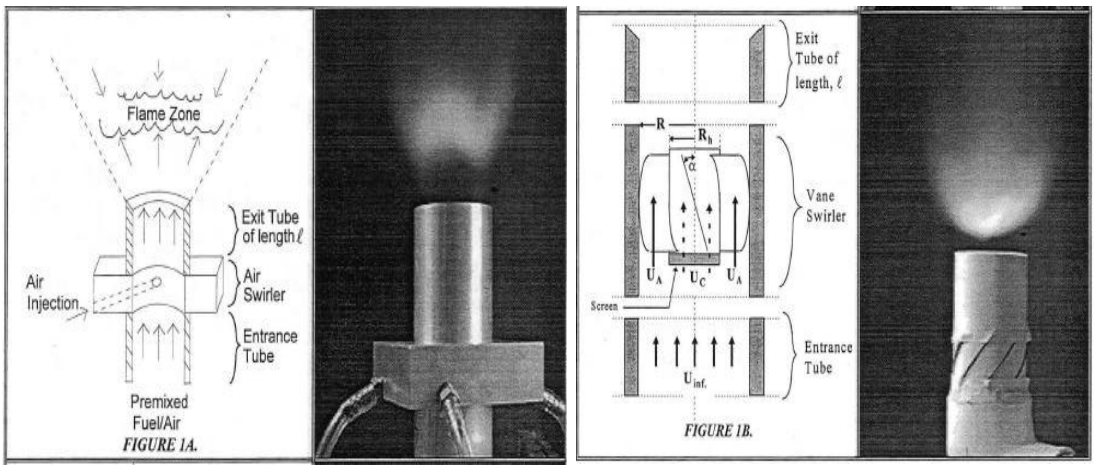


Figure 2.2. Schémas du LSB à air-injecter (à gauche) et du LSB à ailette (à droite)[20].

- **R. K. Cheng et al (1999) [21]**

Ils ont réalisé expérimentalement des essais dans un simulateur de chauffe-eau au laboratoire de combustion d'Irvine de l'Université de Californie dans le but d'étudier et comparer les performances de deux LSB avec un nombre de swirl entre S=0.02 à 0.1. La génération de swirl dans la première configuration était avec un jet d'air par contre la deuxième avec un guide-vane.

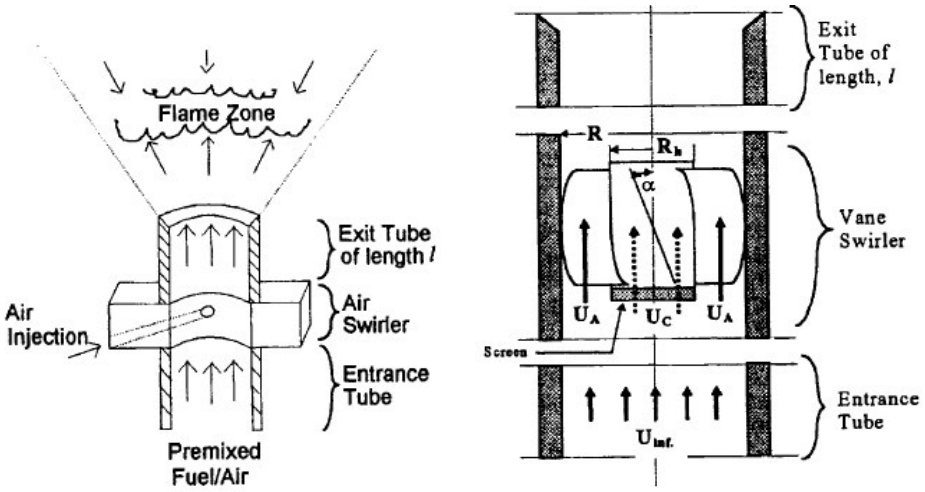


Figure 2.3. Deux Configurations du LSB choisies par R. K. Cheng (2017) : (a) à jet d'air et (b) avec un guide-vane [21].

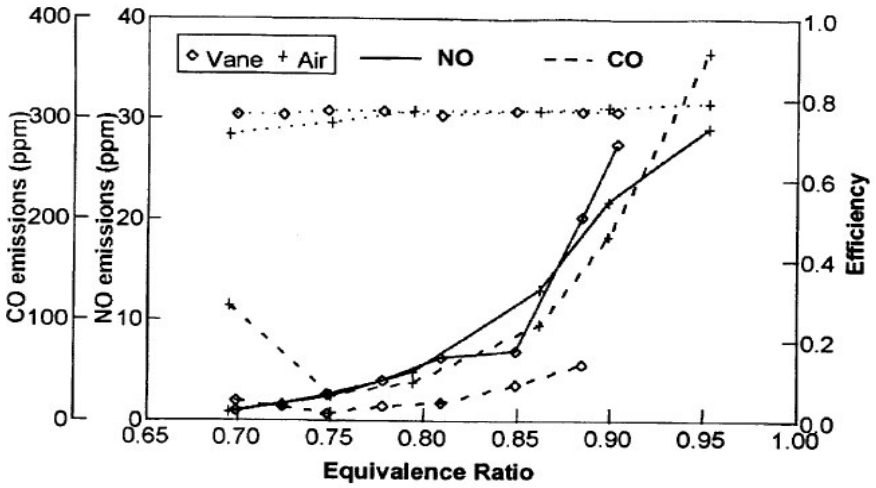


Figure 2.4. Comparaison des performances des LSB à jet d'air et à guide-vane montés dans un simulateur de chauffe-eau de 15 Kw [21].

Ils ont trouvé que les efficacités, les émissions de NO et les flammes générées par les deux systèmes sont presque identiques en atteignant un rendement proche de 80% d'efficacité pour une richesse (0,7< Φ <0,9) et avec NO moins de 10 ppm à Φ <0,85.Cependant, le LSB à guide-vane offre une amélioration significative dans les émissions de CO, ainsi que la plage de son fonctionnement est assez grande de 12 à 120 kW pour une richesse (0.60 < Φ <1.0).

- **Plessing T. et al (2000)[22]**

Ils ont développé une étude expérimentale où ils mesurent la vitesse de flammes turbulente et la structure des flammes prémélangées dans des bruleurs à faible nombre de swirl. Ils ont développés un procédé qui permet de déterminer avec précision la vitesse de flamme turbulente pour six flammes de méthane-air en mélange pauvre. Ils ont mesuré le champ de vitesse en combinant simultanément l'OH-Laser induit par fluorescence (OHPLIF) et la (PIV).

Leurs mesures du champ d'écoulement bidimensionnel montrent une zone de recirculation en aval de la zone de stabilisation de flammes qui se positionne à proximité de la sortie du brûleur. Cette zone n'est pas influencée par la zone de recirculation. Leurs résultats montrent une similitude entre les valeurs de vitesses captées par la LDV et la PIV.

- **Johnson M.R. et al (2005) [23]**

Une nouvelle approche pour les chambres de combustion des turbines à gaz a été étudiée en modifiant l'injecteur à fort nombre de swirl (HSI de S = 0.73) par l'injecteur à faible nombre de swirl (LSI de S= 0.5). Ce LSI a été configuré en laboratoire et étudié expérimentalement par la PIV en couvrant une gamme de puissance comprise entre 9KW et 87 KW, avec des vitesses initiales comprises entre 1 m/s et 10 m/s. Egalement, cette configuration a été testé dans des conditions de fonctionnement de turbine à gaz simulées de 0.08MW à 2.2 MW avec des vitesses initiales comprises entre 20m/s et 50 m/s, ainsi à des températures d'entrée de combustion comprises entre 230°C et 430°C et à des pressions comprises entre 6 atm et 15 atm. En utilisant la PIV, les résultats montrent que les champs d'écoulement du LSI sont dépourvus de grandes zones de recirculation dominantes, différemment de celles observés pour le cas des HSI où les zones de recirculations sont prédominantes. Cette absence de zone de recirculation peut fournir une explication de la réduction de NOX d'environ 60% entre le HSI et le LSI.

Enfin, ils ont démontré que la technologie LSI est une solution simple et économique très prometteuse pour atteindre une cible d'émissions extrêmement faibles (<5 ppm) de NOX (corrigé à 15% d'$O2$) dans les turbines à gaz.

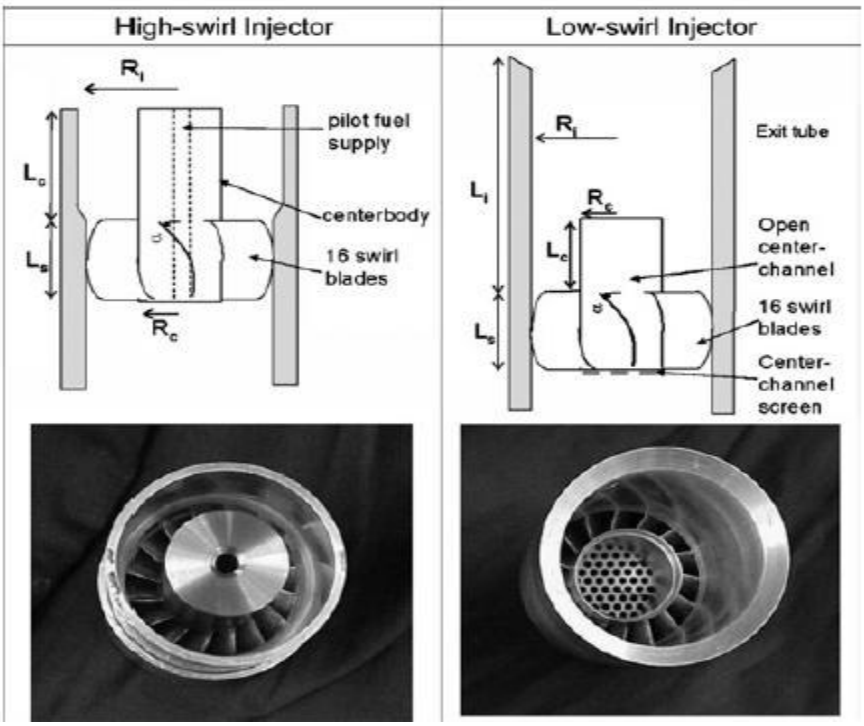


Figure 2.5. Bruleurs développé par Johnsona M.R. et al (2005)[23].

- **Littlejohn .D and Cheng R.K. (2007) [24]**

Ils ont mené une étude expérimentale pour examiner l'effet du carburant sur les flammes pré-mélangées turbulentes. Cette étude s'est concentrée sur des turbines à gaz dotées d'injecteurs à faible nombre de swirl, qui ont montré leur capacité à résister à des flammes stables pour sept hydrocarbures dilués et non dilués avec des émissions de NOx de 5 ppm.

Ils ont constaté que les vitesses de flamme turbulentes des combustibles hydrocarbonés concordaient avec celles des flammes méthane-air, affirmant l'existence d'une corrélation linéaire avec l'intensité de la turbulence. Par ailleurs, leurs résultats montrent que la configuration LSI (Low swirli njector) n'a pas besoin de subir des modifications importantes pour fonctionner avec les combustibles hydrocarbonés.

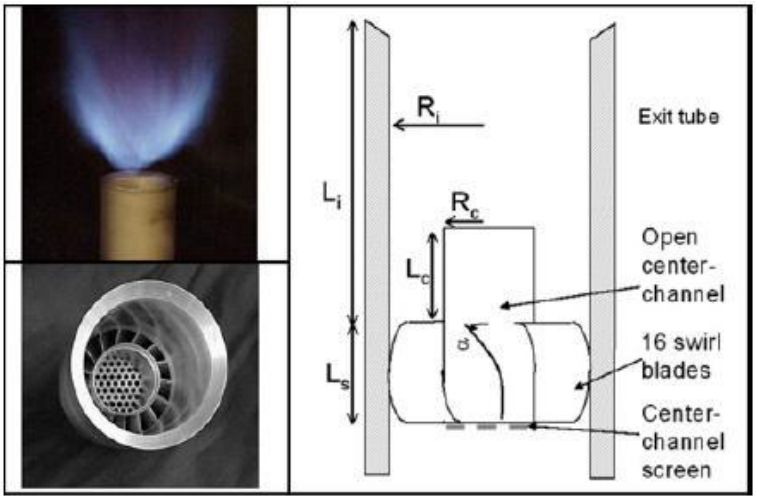


Figure 2.6. Schémas et photographies de low swirl injecteur[24].

- **Cheng, R. K et al (2008) [25]**

Ils ont dirigé une étude expérimentale pour observer attentivement effets de la géométrie de la chambre de combustion sur les champs d'écoulements (flow fields), et les propriétés de flamme d'un injecteur à faible swirl (LSI). L'objectif de cet article est d'étudier ces effets en effectuant des mesures de vélocimétrie par image de particules (PIV) dans des différentes flammes produites par un LSI.

Son principe de base est décrit par un modèle analytique de niveau supérieur qui relie la position de la flamme aux paramètres de similarité du champ d'écoulement et à la corrélation de vitesse de flamme turbulente. Le modèle était basé sur des mesures expérimentales dans des flammes de laboratoire ouvertes. Ces résultats montrent que les effets de l'enceinte sur le LSI sont fortement liés au type de carburant et à la géométrie du plan de déversement, mais dépendent moins de la taille de l'enceinte

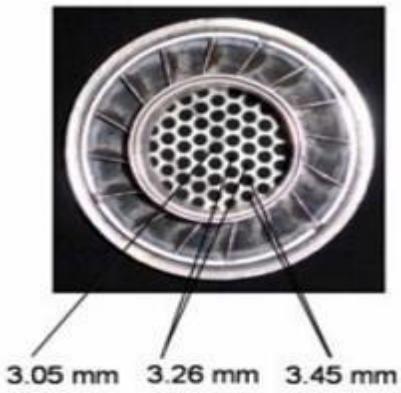


Figure 2.7. Dimension de brûleur LSI [25].

- **Galpin J. et al (2008)[26]**

Ils ont effectué une simulation numérique à grande échelles (LES) d'une flamme turbulente prémélangée pauvre. La configuration du bruleur adoptée a été étudiée préalablement avec une approche expérimentale. Ils ont comparé les champs de vitesses, de températures et de concentrations des espèces principales à des résultats expérimentaux. Ils ont pris en considération les échelles de turbulences et les fluctuations de température en utilisant une fonction PDF présumée avec un modèle de flammelette à chimie détaillée. Leur objectif est d'assurer un bon couplage entre les tables chimiques et les solutions instables des équations de Navier-Stokes dans leur forme entièrement compressible, ce qui représente des contraintes inhérentes aux moyens de calculs. Ils ont discuté leurs résultats qui ont été comparés à l'expérience. Ils ont proposé l'introduction d'un terme supplémentaire pour tenir compte de la différence de la taille du filtre utilisé. Ensuite ils ont comparé la vitesse, la température, et les principales espèces aux mesures où ils ont trouvé une reproduction caractéristiques des flammes.

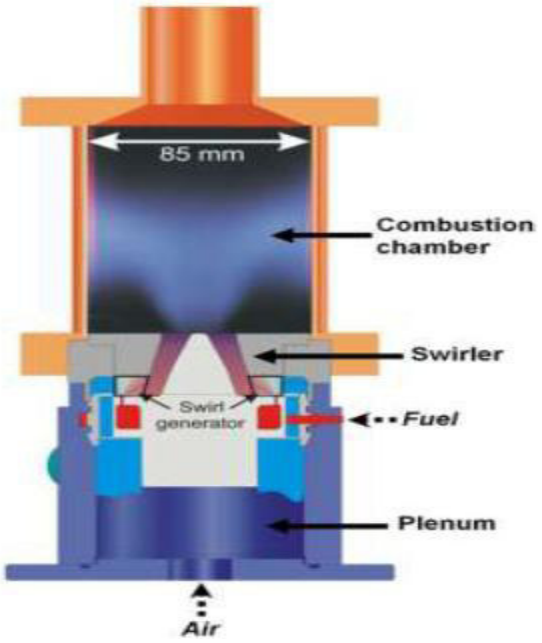


Figure 2.8. Bruleur développé par Galpin J. et al (2008)[26].

- **Nogenmyr K.J. et al (2009) [27]**

Cet article présente une simulation numérique à grande échelle (LES) du brûleur de Cheng R.K. (1995) et une étude expérimentale avec le diagnostic laser d'une flamme pauvre de méthane / air pré-mélangée dans le but de comparer deux différents modèles qui traitent la

chimie : le modèle G-level-set équation basé sur le modèle de flammelette et le modèle C-Equation basée sur une chimie infiniment rapide avec schéma réactionnel réduit. Ils ont développé un brûleur (LSB) à jet hélicoïdal de laboratoire à pression atmosphérique dans lequel le pré-mélange est injecté dans un écoulement à basse vitesse où la flamme est stabilisée au dessus du brûleur.

Leurs résultats montrent une grande similitude des structures des flammes prédite par les deux modèles couplé à l'approche LES et les données expérimentales favorisant l'un pour le champ dynamique et l'autre pour la prédiction des espèces chimique.

Figure 2.9. Bruleur développé par Nogenmyr K.J. et al (2009)[27].

- **Cheng R.K. (2009) [28]**

Ils ont élaboré des expériences dans une turbine à gaz pour caractériser les comportements globaux et les émissions des flammes pré-mélangées turbulentes produites par un injecteur à faible nombre de Swirl (LSI).L'objectif était d'étudier les effets de l'hydrogène sur les processus de combustion pour l'adaptation d'une turbine à gaz dans une centrale à cycle combinée à gazéification intégrée (IGCC).

Leurs expériences à hautes pressions et températures ont montré que le LSI peut fonctionner avec 100% H_2 jusqu'à une richesse de $\Phi = 0,5$ et à une tolérance au flashback légèrement supérieure à celle d'une conception idéalisée à fort nombre de swirl.

L'analyse des données de vitesse obtenues par la PIV montre que la stabilisation de mécanisme du LSI reste inchangée jusqu'à 60% H_2 et avec l'augmentation de la concentration du carburant H_2 la flamme de LSI levée commence à se rapprocher à la

sortie du bec et finalement se fixe au bord de ce dernier et prend une forme différente à 100% H_2.

Ce changement de position de la flamme est attribué à l'augmentation de la vitesse de la flamme turbulente. D'autre part, Les émissions de NO_X montrent une dépendance linéaire logarithmique de la température de la flamme adiabatique et les concentrations sont similaires à ceux obtenus précédemment dans un prototype LSI développé pour le gaz naturel.

Ils ont conclu que le LSI présente les mêmes comportements globaux dans les conditions STP et d'une turbine à gaz et donc un tel aperçu sera utile pour mise à l'échelle du LSI pour qu'il fonctionne dans les conditions IGCC.

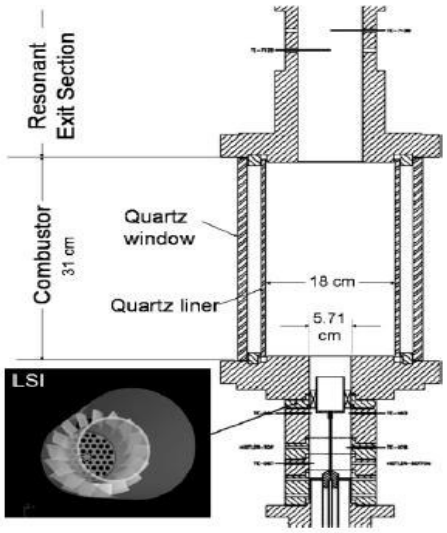


Figure 2.10. Configuration d'une chambre de combustion (SimVal) choisie par R.K.Cheng (2009)[28].

- **Littlejohn D. et al (2010)[29]**

Dans cette étude ils ont développé un bruleur de laboratoire à faible nombre de swirl (LSB) doté d'une technologie de combustion prémélangée pauvre dans le but den l'adapter à des turbines à gaz. Leur but principal est d'adapter cette configuration à un fonctionnement avec plusieurs combustibles ayant comme objectif la compréhension fondamentale de l'effet des gaz de synthèses sur le comportement des flammes. Ils se sont intéressés aux émissions polluantes et aux champs d'écoulement, leurs expériences ont été menées sur

deux installations vérifiant ainsi le fonctionnement au gaz de synthèse à des températures et pressions élevées.

Leurs résultats montrent que la conception de base LSB est apte à opérer avec du gaz de synthèse avec un maximum de 60% de H2.

La PIV leurs a montrée des similarités des champs d'écoulement et de vitesses de flamme turbulente entre le gaz de synthèse, d'hydrocarbures et d'hydrogène pur ou dilué.

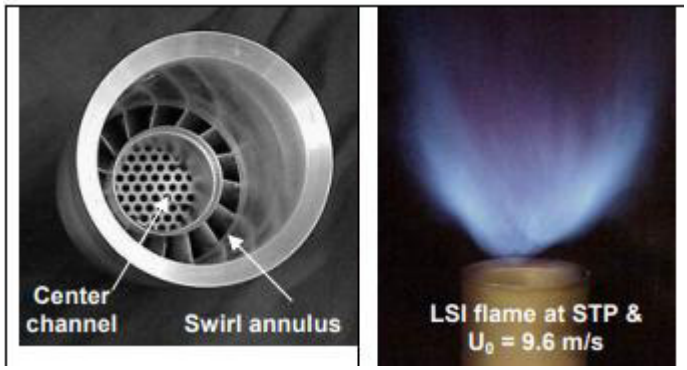


Figure 2.11. Bruleur de Littlejohn D. et al (2010) [29].

- **Lecocq G. et al (2011) [30]**

Ils ont présenté une simulation numérique à grande échelle LES pour des flammes prémélangées turbulentes de méthane-air. Ils ont adopté le de combustion Presumed Conditional Moments-Flame Prolongation of Intrisic Low Dimensional Manifolds (PCM-FPI) pour l'évaluation des vitesses de flammes. Ils ont mis en évidence la limite de la gamme de fonctionnement ce modèle. Ce qui permet d'identifier l'évolution de vitesses similaires aux prédictions du modèle Extended Coherent Flame Model for Large-Eddy Simulation (ECFM-LES) dans lequel les zones sont limitées en termes de largeur des échelles du filtre et des sous échelles de la viscosité turbulente. Ils ont proposé une alternative pour le modèle ECFM-LES et pour le modèle PCM-FPI se rapprochant ainsi en un seul modèle qui intègre leurs principales forces. A cet effet, ils ont proposé deux modèles hybrides qui ont été testés avec la LES. Leurs résultats en termes de statistiques de températures et fractions massiques des espèces chimiques ont été comparés à des travaux expérimentaux. Ils ont concluent que le couplage de ces deux modèles a été capable de localiser proprement la zone de réaction avec une bonne prédiction de l'évolution chimique.

- **Orbay R.C. et al (2013)[31]**

Ils ont élaboré une étude expérimentale avec une simulation à grande échelle LES sur un bruleur comportant un écoulement de gaz naturel-air pour le cas réactif et inerte. Ils ont utilisé la PIV, LDV (Laser Doppler velocimetry) et la simulation numérique à grande échelle LES afin de réduire les incertitudes des résultats. Leur but était de caractériser les principales structures de l'écoulement et de la turbulence dans une chambre de combustion en application à des turbines à gaz. Les flammes étudiées de gaz naturel-air avaient une richesse de Φ=0.47, un nombre de swirl S=1.4 et un nombre de Reynolds Re=20 000. Ils ont montré l'effet du dégagement de chaleur et de la géométrie de la chambre de combustion sur la structure des flammes. Leurs résultats montrent un accord acceptable pour les champs d'écoulement moyens, cependant pour la fluctuation de vitesse, les résultats de la LDV et la LES s'accordent, par ailleurs, la PIV montre des intensités turbulentes plus faibles. Ils ont constatés que le champ d'écoulement moyen est caractérisé par trois zones de recirculations qui résultent de l'expansion brusque de la chambre de combustion (éclatement du vortex) et des conditions d'entrées de l'écoulement (swirl). D'autre part, ils ont affirmé que la géométrie de sortie de la chambre de combustion avait un impact significatif sur la désintégration des vortex et que le dégagement de chaleur favorise l'augmentation de la turbulence à proximité de l'axe de la chambre de combustion mais il ne modifie pas la structure fondamentale du vortex.

- **Xing. LI et al (2014) [32]**

Dans une étude expérimentale et numérique ils ont examiné l'effet de swirl sur la formation des émissions polluantes et les caractéristiques des flammes à jets de méthane à des hautes températures d'air avec deux configurations swirlée et non swirlée en utilisant le modèle de turbulence Reynolds Speziale-Sarkar-Gatski (SSG), le modèle de combustion Eddy-dissipation (EDM) et les mécanismes Thermal-NO et Prompt-NO pour évaluer la formation de NO.

Leurs résultats numériques montrent une bonne similitude avec les résultats expérimentaux. Egalement, ils ont constaté que la flamme avec swirl créer une répartition stable de température tandis que la distribution de la flamme non swirlée est totalement différente.

La formation de NO d'une flamme non swirlée est beaucoup plus élevée que dans le cas avec swirl. Ainsi que la formation Thermal-NO est plus importante que celle de Prompt-NO dans les deux conditions swirlée et de non swirlée.

- **Yasir M. Al-Abdeli et al (2015) [33]**

Dans cette revue, Ils ont rassemblé les travaux expérimentaux de la flamme swirlée à l'échelle de laboratoire dans une étude porte sur des brûleurs à combustible qui couvrent une combustion pré-mélangée, partiellement pré-mélangée et non pré-mélangée avec quatre configurations à l'état confiné (Tecflam et Turbomeca, Dual Swirl et Sydney) et deux à l'état non confiné (Tecflam et Sydney).

D'autre part, Ils ont résumé la compréhension des effets du swirl et du confinement sur le comportement de l'écoulement, les caractéristiques d'émission, la stabilisation de la flamme et l'instabilité du débit dans les brûleurs à swirl à l'échelle de laboratoire.

Les figures suivantes donnent un aperçu sur les différentes configurations des brûleurs à swirl[15]. :

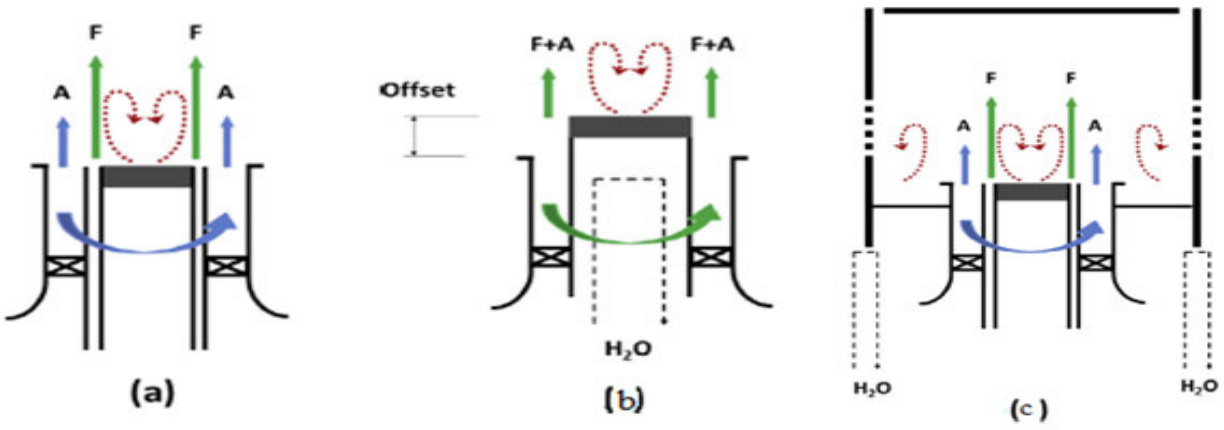


Figure 2.12. Brûleur Tecflam Swirl et ses principaux états: (a-b) état non confiné et (c) état confiné[33].

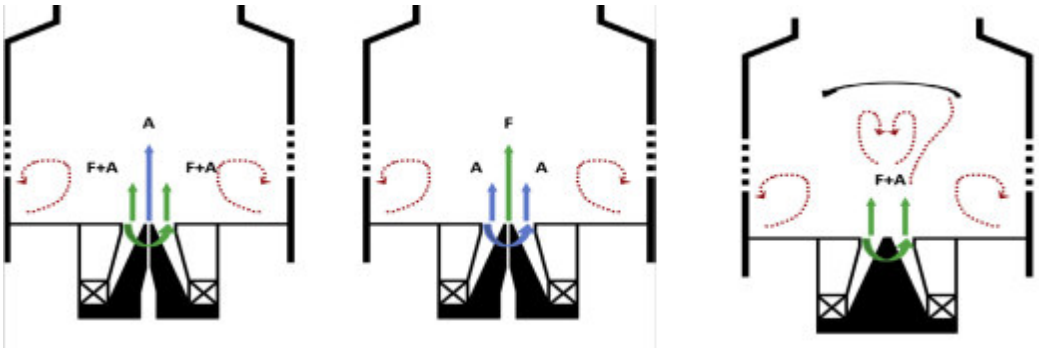


Figure 2.13. Brûleur Turbomeca Swirl Nozzle et ses principaux états confinés[33].

- **Muppala S.P.R. et al (2015) [34]**

Cette étude porte une simulation numérique qui vise a comparer entre cinq différents modèles de combustions : Bray-Moss-Libby, Linstedt-Vaos (LV), une version modifiée du modèle LV, le modèle de fermeture à vitesse de flamme turbulente (TFC) et le modèle

AFSW (modèle de rides froissées à la surface de la flamme algébrique) avec et sans nombre de LEWIS. Egalement, la turbulence a été modélisée par le modèle k-ε RNG.

La validation a été effectuée à l'aide de nombreuses données expérimentales obtenues par un brûleur à faible nombre de swirl de D.Little john et al (2007) avec une richesse de Φ= 0.4 et 0.59, une pression d'entrée P=0.1 MPa et plusieurs fractions d'hydrogène : 0% H_2, 40% H_2, 60% H_2, 80% H_2 et 100 H_2% injectés a une vitesse de U_0= 18m/s.

Leurs résultats montrent que pour tous les modèles utilisés la diffusion préférentielle et l'effet du nombre de Lewis sont des paramètres importants sur la prévision des flammes méthane/air enrichies en hydrogène. Ainsi que la prédiction du modèle AFSW est en bon accord avec l'expérience par rapport aux autres modèles

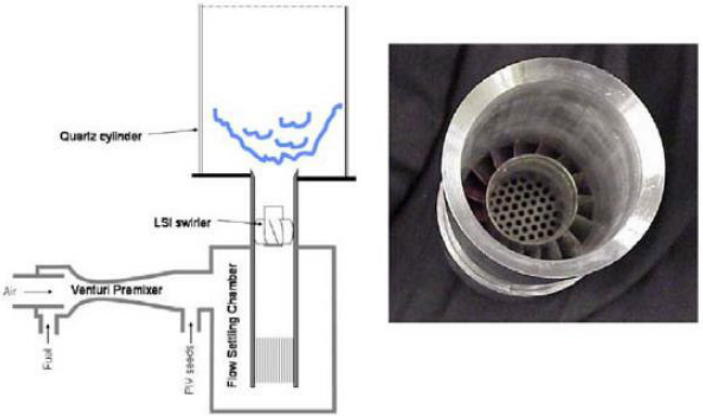


Figure 2.14. Configuration de Cheng (1995) choisie par S.P.R. Muppala et al (2015)[34].

- **Ouali .S et al (2016) [35]**

Ils ont effectué une la simulation numérique des flammes pré-mélangées turbulentes suspendus de méthane/air stabilisées par swirl pour un brûleur de configuration LSB avec un bec de 50 mm du diamètre pour deux configurations ; 2D et 3D où l'effet de la richesse du méthane (Φ de 0.6 à 1.4) a été étudié pour les deux. Tandis que l'effet du nombre de swirl (S de 0.5 à 1.0) a été étudié uniquement en configuration 3D.

Ils ont utilisé le modèle RANS k-ε STANDARD pour la modélisation de la turbulence et deux modèles pour la modélisation de la combustion ; EDM (Eddy Dissipation Model) et Partially-Premixed.

L'intérêt particulier de leurs étude est de trouver un compromis entre le maximum de température qui puisse être atteint et la limite du nombre de swirl et de la richesse qui

puissent être imposés avec le minimum d'émissions de NOX et de CO tout en assurant le maintien de la stabilité et la localisation de la flamme.

Leurs résultats obtenus par la simulation numérique avec ceux disponibles dans la littérature offrent une bonne similarité pour tous les paramètres de flammes étudiées tels que :

les champs de vitesse, température, la distribution du méthane (CH4) et la formation des polluants (NOX et CO). Tandis qu'ils ont montré que la fraction de masse maximale de NOX est de 0.18 cela indique que l'augmentation de l'intensité du swirl dans ce type de configuration reste négligeable.

- **Cheng T et al, 2016[36]**

Ont étudiés expérimentalement avec chimioluminescence globale OH imagerie la structure de la flamme et les performances des émissions de contre-rotation des flammes swirlées dans des conditions d'écoulement et de mélange stratifiées. Ils sont variées les richesses de Φ= 0,7-0,93, avec deux configuration : un flux interne avec un S= 0,77 et externe S = 1,04. Leurs résultats montrent que dans l'interne anneau le taux d'émissions de NO et CO est plus élevé de 91% et de 49% respectivement, par contre dans l'anneau extérieur est légèrement supérieur de 3% et 9% respectivement. Donc, ils ont affirmé que la mesure des émissions montre la mise en place de flammes extérieures enrichies n'entraîne que des niveaux légèrement plus élevés de NO et de CO par rapport à un mélange de base homogène. Inversement, l'enrichissement de l'anneau interne entraîne des émissions de NO et de CO significativement plus élevées par rapport à la ligne de base.

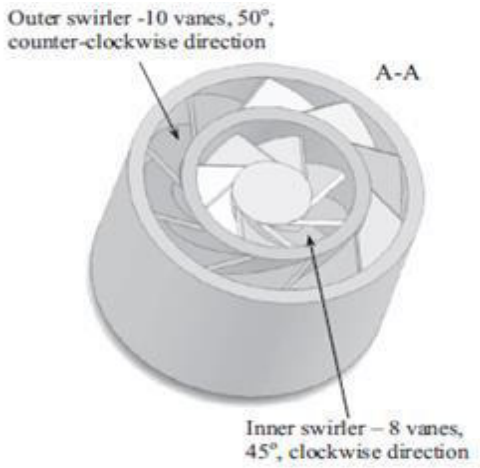


Figure 2.15. Structure du brûleur à double anneaux à contre rotation de Cheng Tung Chong (2016)[36].

- **Deng, Yangbo et al (2017) [37]**

Ils ont réalisé une étude expérimentale sur les caractéristiques de combustion et d'émission de l'écoulement à travers un injecteur à faible swirl (LSI) qui a été mesurée à l'aide de la technique de vélocimétrie par image de particule (PIV).Les combustibles utilisés dans l'expérience comprennent le propane, le méthane et le méthane avec de l'hydrogène.

Cette étude expérimentale a un but de réalisé la structure de la flamme, la répartition de la température et les émissions d'échappement d'une combustion pré-mélangée dans des conditions de nombre de swirl différent et de composition du combustible différente.

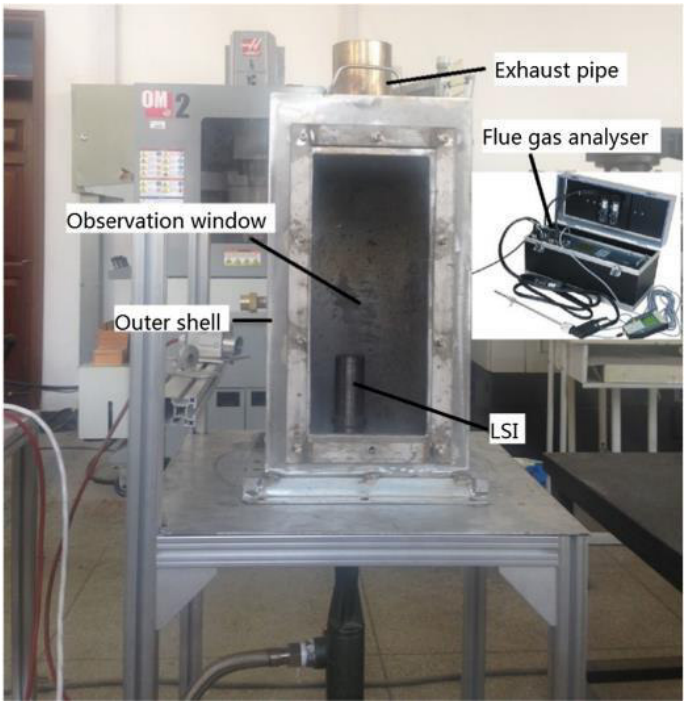


Figure 2.16. Expérience d'installation expérimentale dans un environnement fermé[37].

- **Tong, Y et al (2018) [38]**

Ils ont adoptées une méthode de la photographie et d'analyse d'images pour capturer la chimioluminescence CH∗ de la flamme de diffusion de suie, par Particle Image Velocimetry (PIV) et Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF).Le bluff-body et le swirl flow sont couramment utilisés pour stabiliser les flammes de diffusion dans les applications industrielles

Les méthodes expérimentales et numériques ont été adoptées pour approfondir les structures de la flamme et ses émissions

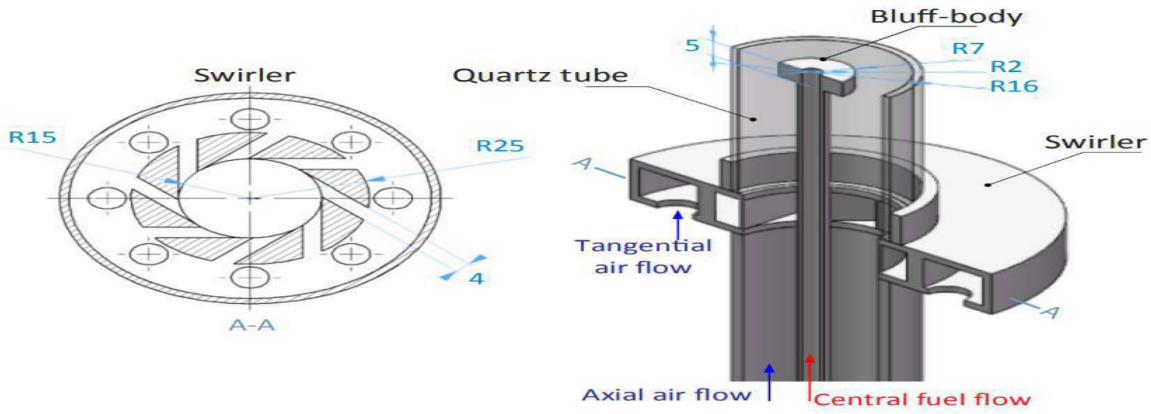


Figure 2.17. Schéma du brûleur à swirl variable et le swirler[38].

- **Yinli Xiao et al (2018) [39]**

Ils ont effectué une étude expérimentale afin d'acquérir une compréhension fondamentale sur le comportement et les champs d'écoulement de la flamme pré-mélangée turbulente de méthane/air via un brûleur LSB fonctionnant à des conditions atmosphériques avec différents nombres de swirl et trois régimes de combustion selon le tableau suivant :

Cases	Radius ratio	Blockage ratio	Swirl angle	Swirl number
1	0.72	0.75, 0.80, 0.85	37°	0.46, 0.52, 0.57
2	0.56	0.64	37°, 40°, 42°, 45°	0.50, 0.541, 0.564, 0.595
3	0.56	0.76	37°, 40°, 42°, 45°	0.543, 0.597, 0.630, 0.664
4	0.64	0.76	37°, 40°, 42°, 45°	0.571, 0.623, 0.659, 0.715

Tableau 2.1. Conditions de fonctionnement de Yinli Xiao et al (2018) [39].

Les mesures du champ de vitesse et les structures des flammes ont été réalisés à l'aide de la vélocimétrie par image des particules (PIV) bidimensionnelles et l'OH-Laser induit par fluorescence respectivement.

Leurs résultats présentent des structures des flux significativement différentes sous trois modes de flamme: flamme attachée, flamme détachée en W et flamme planaire. Ils ont observé que, si la vitesse de l'air entrant n'est pas suffisamment élevée, la flamme pénètre dans l'injecteur à faible nombre de swirl ce qui provoque un retour de la flamme. Enfin, ils ont conclu que la position et la taille de la recirculation varient brusquement avec le nombre de swirl qui joue un rôle dominant sur le mode de la flamme, les limites de la stabilité, la longueur de la flamme et l'angle d'étalement.

- **Weijie Liu et al (2019) [40]**

Ils ont réalisé une étude numérique sur la structure des flammes turbulentes pré-mélangées de méthane/air stabilisées par un faible nombre de swirl dans une chambre de combustion avec deux configurations du brûleur multi-becs en utilisant la simulation à grande échelle LES. Ce brûleur à multi-becs comprend dans la première configuration un réseau co-swirling dans lequel les cinq becs agissent dans la même direction et un réseau contre-swirling dans la deuxième configuration dans lequel le bec central se trouve dans le sens de rotation inverse des becs extérieurs.

Les résultats de la LES sont en bon accord avec les données de la fluorescence induite par laser OH planaire en termes de concentrations en OH et de variables de progression de la combustion.

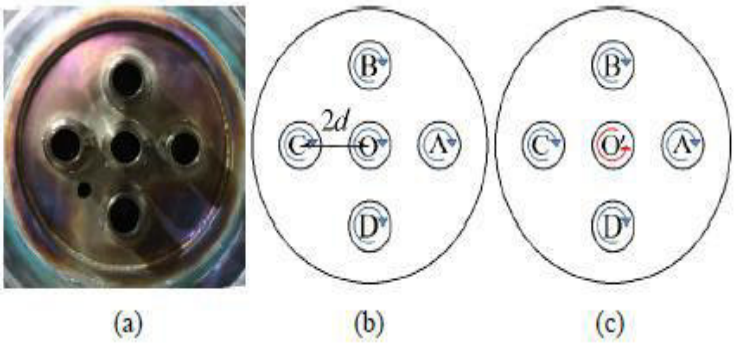


Figure 2.18. Brûleur multi-becs avec différentes configurations : (b) co-swirling et (c) contre-swirling de Weijie Liu et al (2019) [40].

Leurs résultats numériques montrent que dans la configuration co-swirling le flux se développe en un mouvement tourbillonnant unifié similaire à un flux unique, tandis que le flux maintient des structures tourbillonnaires individuelles dans la configuration contre-swirling.

Par conclusion, le réseau de swirl n'exerce qu'une influence minime sur les combustions à multi-becs en termes de distribution de la température et de progression des flammes pré-mélangées à faible nombre de swirl.

- **Akinyemi, O. S et al (2019) [41]**

Ils ont conçu un nouveau injecteur à double fluide à mélange interne, appelé injecteur Swirl Burst (SB), qui incorpore de l'air de pulvérisation swirlée au Flow-blurring (FB)

concept pour améliorer l'atomisation secondaire et obtenir un angle de pulvérisation plus large pour une meilleure dispersion du carburant, un mélange air / carburant, et acquérir une combustion pré-mélangée propre et stable, même pour les huiles visqueuses. Globalement, le nouvel injecteur SB améliore encore la pulvérisation fine, et évite ainsi les flammes trop élevées, permet une combustion propre et pré-mélangée, améliore la propreté de la flamme, sa durabilité, et la stabilité. L'injection de SB permet potentiellement une combustion pré-mélangée propre et soutenue, même pour les huiles de source très visqueuses (telles que le VO) de biodiesel, économiser les coûts de conversion et d'énergie, et donc biocarburants neutres en carbone viables sur les plans technique et économique.

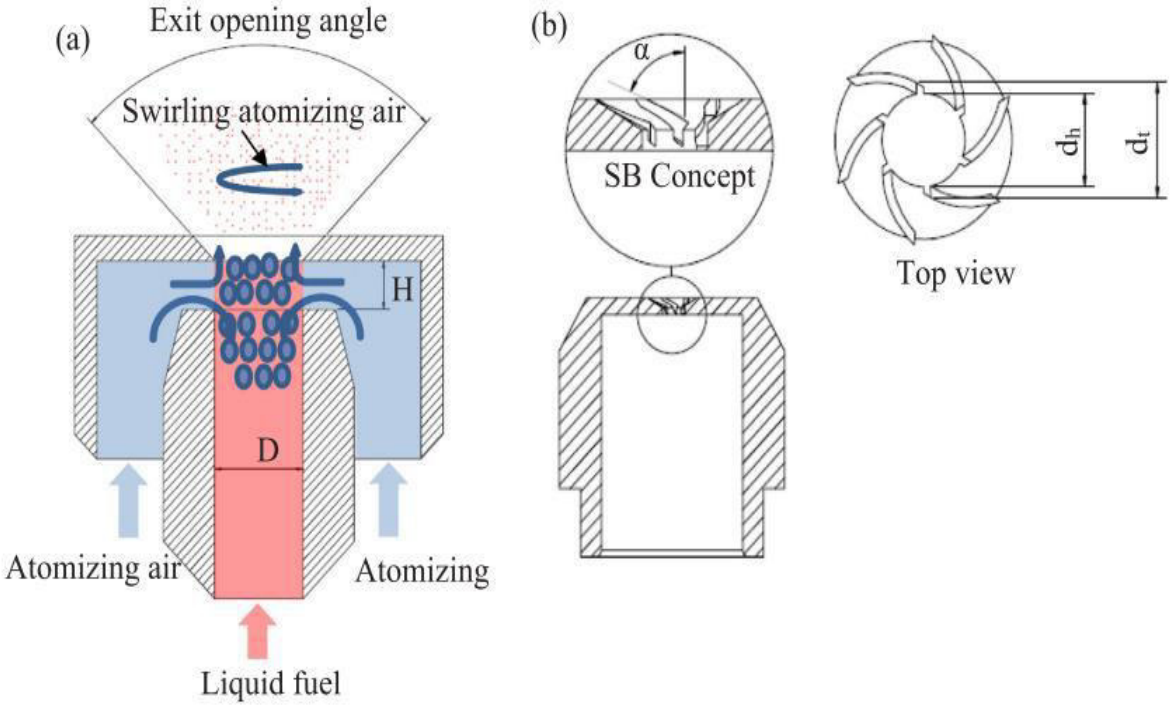


Figure 2.19. (a) Principe de fonctionnement de l'injection de SB et (b) concept SB [41].

2.3. Conclusion :

D'après cette revue bibliographique, on peut résumer les principaux objectifs et résultats des recherches portées sur les flammes prémélangées turbulentes à faible nombre de swirl comme suit :

- Toutes les nouvelles propositions de configurations des bruleurs (LSB ou autres) sont issues d'études expérimentales.
- L'approche expérimentale est un point de repère pour la validation et la comparaison des résultats numériques.

- Les recherches d'actualités sur les LSB œuvrent pour la plupart d'entre elle à réduire les émissions polluante en général et les NO_x en particulier.

Chapitre 3 : Formulations mathématique et simulation numérique

3. 1. Introduction

Pour mettre en évidence les différentes propriétés de la turbulence, on analysera les équations fondamentales, qui décrivent l'écoulement visqueux. Dans ce chapitre on va détailler les méthodes et les moyens utilisés, on va aussi décrire la position exacte du problème, les géométries et maillages adoptés seront expliqués, les conditions aux limites fixées et les critères de convergences posés seront aussi éclairés.

3. 2. Formulations mathématiques

Les équations utilisée pour résoudre les écoulements dans les turbomachines dérivent généralement des équations de Navier Stocks et sont accompagnées d'hypothèses simplificatrices associées à des considérations sur la géométrie, les bilans énergétiques,ou la séparation des vitesses en une valeur moyennes et une partie fluctuante. En dehors du repère absolu, les équations peuvent aussi s'exprimer dans le repère relatif, en termes de la fonction nous présentons ici l'ensemble des équations générales de la mécanique des fluides régissant l'écoulement dans les turbomachines.

La détermination d'un écoulement nécessite la connaissance de la vitesse $\mathbf{V}$ $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$, de la température $\mathbf{T}$ de la masse volumique $\boldsymbol{\rho}$et de la pression $\mathbf{P}$ en chaque point.

1. Ces espèces sont caractérisées par leurs fractions massiques $\boldsymbol{Y_K}$ pour $\mathbf{k = 1}$ à $\mathbf{N}$ où $\mathbf{N}$ est

le nombre d'espèces dans le mélange réactif. Les fractions massiques $\mathbf{Y_K}$sont définies par:

$$Y_K = \frac{m_k}{m} \quad \text{(3.1).}$$

Où :

- m_k : la masse de l'espèce.
- k : présente dans un volume donné V**.**
- m : masse totale du gaz dans le volume V.

3.2.1.Equation de conservation de masse et d'espèces

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.

$$\frac{\partial}{\partial} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{.....(3.2).}$$

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

$\frac{\partial y_k}{\partial} + \frac{\partial}{\partial_x}(\rho(u_i + v_{k.i})y_k) = \omega_k$ pour $k = 1, N$ ....(3.3).

Avec $v_{k,i}$, , la composante **i** de la vitesse de diffusion de l'espèce k et $\omega_{\boldsymbol{k}}$et le taux de production de l'espèce k .

Généralement, la vitesse de diffusion est donnée par la loi de fick

$v_{k,i} = D_k \frac{1}{Y_K}\frac{\partial Y_K}{\partial X_i}$ pour ($k = 1,\ldots,N_K$)..(3.4).

Ou D_K est le coefficient de diffusion de l'espèce k dans le mélange.

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

$\frac{\partial y_k}{\partial t} + \frac{\partial u_i y_k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho D_K \frac{\partial Y_K}{\partial x_i}) + \dot{w}_k$ pour $k = 1, \ldots, N$ ....(3.5).

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

3.2.2. Equations de conservation de quantité de mouvement

Le principe de conservation de quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques de fluide, son mouvement et les causes qui le produisent. Si on suppose que le fluide incompressible et newtonien (relation contrainte –déformation linéaire), les équations de quantités de mouvement s'écrivent sous la forme tensorielle suivante

$\frac{\partial(\rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho \sum_{k=1}^{n} Y_K F_{kj} = \frac{\partial \sigma}{\partial x_i} + \rho \sum_{k=1}^{n} Y_K F_{kj}$ ....(3.6).

Ou ,F_{kj} est la force de volume agissante sur l'espèce k dans la direction j etτ_i est le tenseur visqueux, donné par

$\tau_{ij} = -\frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$..(3.7).

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

$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - p\,\delta_{ij}$ ....(3.8).

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

3.2.3Equation de la conservation d'énergie

L'équation de conservation de l'énergie pour un écoulement réactif peut s'écrire avec la formulation de l'enthalpie comme suit :

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h_s) = \dot{\omega}_T + \dot{Q} + \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho \sum_{K=1}^{N} V_{k,i} Y_k h_{s,k}\right) \ldots (3.9).$$

- Le flux d'énergie $\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}$ 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 une source de chaleur additive ($\dot{Q}$=0 dans notre cas).
- $\dot{\omega}_T$ est le dégagement de chaleur du à la réaction chimique (combustion), il est donné par :

$$\dot{\omega}_T = -\sum_{K=1}^{N} \Delta h_{f,k}^0 \, \dot{\omega}_k \ldots\ldots (3.10).$$

3.2.3.1. Equations d'état

L'équation d'état des gaz parfait peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P = \rho \frac{R}{W} T \ldots\ldots (3.11).$$

Cette équation ferme le système adéquation de Navier –Stockes.

- T : la Température.
- R : constante des gaz parfait.
- $\rho_k = \rho Y_K$et W_K sont respectivement la densité et la masse moléculaire de l'espace k.

Pour le mélange réactif étudier, la masse moléculaire moyenne du mélange W donne par

$$\frac{1}{w} = \sum_{k=1}^{N} \frac{Y_k}{W_k} \ldots\ldots (3.12).$$

La chaleur spécifique a pression donnée par :

$$C_p = \sum_{k=1}^{N} C_{p_k} Y_k \ldots\ldots (3.13).$$

Ou C_{PK} est la chaleur spécifique de l'espèce k a pression constante, elle est donne par

$$C_{p_k} = 2.5 \frac{R}{W_k} \ldots\ldots (3.14)$$

La chaleur spécifique a volume constant du mélange C_V est donnée par :

$$C_v = C_p - r \quad \text{(3.15)}$$

r : le constate des gaz parfait par

$$r = \frac{R}{W} = R \sum_{k=1}^{N} \frac{Y_k}{W_K} \quad \text{(3.16)}$$

3.2.4. Equation de conservation des espèces chimiques

La combustion fait apparaitre et disparaitre des espèces chimiques. Dans le cas étudié, c'est la combustion du méthane-air qui fait diminuer la fraction massique du CH4, O_2 et N_2 et fait apparaitre les produits de combustion. L'équation qui prend en considération ces changements est donnée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \frac{\partial \rho u_j Y_k}{\partial x_j} = -\frac{\partial R_j^k}{\partial x_j} \dot{\omega}_k \quad \text{(3.17)}$$

R_j^k est le flux de diffusivité moléculaire.

3.2.5. 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 :

$$V'_F C_m H_n + V'_{O_2} O_2 \rightarrow V''_{CO_2} CO_2 + V''_{H_2O} H_2O \quad \text{(3.18)}$$

Les coefficients stœchiométriques sont définis par

$$V'_F = 1\,, \quad V'_{O_2} = m + \frac{n}{4}\,, V''_{CO_2} = m \quad \text{et} \quad V''_{H_2O} = \frac{n}{2}$$

On définit le rapport stœchiométrique de masse *s* qui représente la masse minimale d'oxydant par unité de masse du combustible nécessaire pour une combustion complète :

$$S = \left(\frac{Y_O}{Y_F}\right) = \frac{V'_O W_O}{V'_F W_F} \quad \text{(3.19)}$$

On définit aussi le coefficient d'excès d'air λ par le rapport suivant :

$$\lambda = \left(\frac{Y_F}{Y_O}\right) \Big/ \left(\frac{Y_F}{Y_O}\right)_{st} = \frac{1}{S}\frac{Y_O}{Y_F} \quad \text{(3.20)}$$

Un autre paramètre fréquent correspondant à la réciproque du coefficient d'excès d'air est la Ø richesse définie par :

$$Ø = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{Y_F}{Y_O}\right)_{st} \Big/ \left(\frac{Y_F}{Y_O}\right) \quad \text{(3.21)}$$

• Mélange riche : $\emptyset > 1$.

• Mélange stœchiométrique : Ø=1.

• Mélange pauvre :$\emptyset < 1$.

3.2.6. Ecoulements swirlés

On dit qu'un écoulement est "swirlé" lorsque le fluide a un mouvement de rotation par rapport à la direction principale de l'écoulement. Les écoulements swirlés sont présents dans de nombreuses applications industrielles. Pour les écoulements non réactifs, on peut citer le séparateur cyclone, les tourbillons de sillage des avions ou les machines d'épandage agricole. Pour les écoulements réactifs, on peut citer les turbines à gaz, les moteurs à piston et certains fours industriels. Des phénomènes naturels tel que les tornades ou les cyclones entrent aussi dans la catégorie des écoulements swirlés[42].

3.2.6.1. Nombres de swirl S_n et S_{ng}

Nous distinguons deux expressions du nombre de swirl. La première expression que nous notons Sn est rappelée ici (Gupta et al. ,1984):

$$S = \frac{G_{ang}}{G_x R_i} \quad \text{.....(3.22).}$$

Ou
$$\begin{cases} G_Z = \int_0^R [\rho V_Z^2 + (P - P_\infty)] r dr \\ G_\Theta = \int_0^R \rho V_\Theta V_r r^2 \, dr \end{cases} \quad \text{.....(3.23).}$$

G_Z est l'intégrale du flux de quantité de mouvement axial et G_Θ l'intégrale du flux de moment angulaire et R un rayon caractéristique. Plus ce nombre est élevé, plus l'intensité de la rotation est importante.

Nous pouvons aussi définir une autre expression théorique du nombre de swirl, que nous notons S_{ng} à partir de la géométrie du swirle

$$S_{ng} = \frac{1}{1-\psi}\left(\frac{1}{2}\right)\frac{1-\left(\frac{R_{tube}}{R_b}\right)^4}{\left(\frac{R_{tube}}{R_b}\right)^2}\tan(\alpha_0) \quad \text{.....(3.24).}$$

où R_{tube}désigne le rayon externe du tube central, $R_b$le rayon du tube coaxial, **ψ** est le coefficient de blocage, et α_0 l'angle de la pale sur le bord externe du swirler comme le montrela figure (2.1).

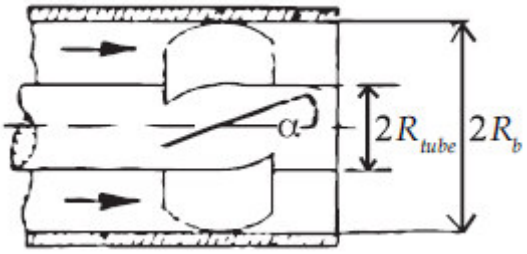


Figure .3.1. Paramètres géométriques du swirler [43].

Le nombre de swirl géométrique S_{ng}est conservé lorsque l'enrichissement en oxygène évolue.

Pour cela, dans notre étude de simulation numérique portée sur un bruleur LSB, on a exploité l'équation (3.25) qui a été développée et proposée pour le calcul du nombre de swirl S et de la vitesse tangentielle [Johnsona M.R. et al (2005), Littlejohn D. and Cheng R.K. (2007)] :

$$S = \left(2/3\right) * tan\alpha \left[\frac{1-R^3}{1-R^2+\left(m^2*\left(\frac{1}{R^2}-1\right)^2*R^2\right)}\right] \quad \text{(3.25).}$$

3.3 . Modélisation de la combustion

Pour la modélisation de la combustion, dans ce qui va suivre on prendra en considération le Modèle Eddy Dissipation sur lequel est basée la modélisation des taux de réaction de cette étude.

3.3.1. Modèle EDM (Eddy Dissipation Model) [44]

Dans la plupart des processus de combustion, le phénomène est supposé rapide et le taux global de la réaction est contrôlé par le mélange turbulent. Pour les flammes non prémélangées qu'on a étudiées, la turbulence mélange lentement les réactifs encore non brules et les produits de combustion chauds dans les zones de réaction, ou elle se produit rapidement, dans ce cas elle est appelée combustion limitée par le mélange, et souvent, les taux de cinétiques chimiques complexes peuvent être négligés .

Le modèle utilisé (EDM) fournit une interaction chimie –turbulence basée sur les travaux de Magnussen B.F. and Hjertager B.H. (1976) ou le taux net de production de l'espèce i dansla réaction r, est donné par la plus petite valeur (minimisation) des deux expressions suivantes :

$$B_{i,r}=v'_{i,r}\,.\,M_{w,i}.\,A\,.\,\rho\,\frac{\varepsilon}{k}\;min_R\left(\frac{Y_R}{v'_{R,r}\;.\;M_{w,R}}\right) \quad \text{(3.26).}$$

$B_{i,r}=v'_{i,r}\,.\,M_{w,i}.\,A.B\,.\,\rho\,\frac{\varepsilon}{k}\left(\frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N v''_{j,r}\,.M_{w,j}}\right)$ …….....…. (3.27).

Où

$v'_{i,r}$: Coefficient stœchiométrique du réactif i dans la réaction r.

$v''_{j,r}$: Coefficient stœchiométrique du produit j dans la réaction r.

M: La masse moléculaire.

Y_R : est la fraction massique d'un réactif particulier R.

Y_P : est la fraction massique de n'importe quelle espèce de produit.

A : est une constante empirique égale à 4.0.

B : est une constante empirique égale à 0.5.

Dans les équations (3.26) et (2.27), le taux de réaction chimique est gouverné par les grandes échelles de temps du mélange k/ε comme dans le modèle d'Eddy-Break-Up (EBU) proposé par Spalding D.B. (1970) affirmant que la combustion se produit tant que la turbulence est présente (k/ε>0) et qu'elle n'a pas besoin d'un terme source pour l'initiation de la combustion.

Bien que le modèle EDM offre des bons résultats, il reste limité par son mécanisme réactionnel à une ou deux étapes maximum. La raison est que les mécanismes réactionnels à plusieurs étapes sont basés sur les taux d'Arrhenius, qui diffèrent pour chaque réaction. Alors que pour le modèle EDM, les réactions ont le même taux de turbulence, donc le modèle ne peut pas prédire les espèces chimiques contrôlées par la cinétique de réaction comme les radicaux. D'autre part, le modèle exige des fractions massiques des produits de combustion non nulle afin d'amorcer la réaction, c'est pour cela que le code ANSYS Fluent utilisé, injecte des fractions massiques de 0.01 par défaut pour les produits de combustion (H_2O et CO_2) lors de l'initialisation du calcul numérique.

Dans notre travail, deux équations de réactions chimiques ont été exploitées pour nos cas ($\mathrm{CH_4/air}$) .

$CH_4 + 3/2(3.76N_2 + O_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + (^3/_2)3.76N_2$…….....…. (3.28).

3.3.2. Le modèle Partially Premixed [45]

Le deuxième modèle de combustion utilisé pour l'analyse des flammes étudiées est le modèle Partially Premixed, c'est un système de combustion de type prémélange avec des mélanges carburant-comburant non uniformes. Il prend en considération les jets de

prémélange qui se décharge dans l'atmosphère, les chambres de combustion de prémélange 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 prémélangées [ANSYS help (2012)].

Les flammes analysées dans cette étude se conforment parfaitement aux préconisations du modèle.

Dans le système Partially Premixed utilisé, on a exploité le modèle C-Equation pour le calcul de la variable de progression, le modèle de Zimont pour la détermination de la vitesse de flamme turbulente et le modèle Quemical Equilibrium basé sur une PDF pour le couplage chimie turbulence.

Le modèle Partially Premixed obéit aux mêmes restrictions et limitations du modèle de combustion Premixed comme l'utilisation du solveur Pressure-Based qui est primordiale.

Le modèle n'est pas adéquat avec le solveur Density-Based. D'autre part, le modèle n'est applicable qu'aux écoulements subsoniques turbulents. Le modèle de combustion Premixed ne peut pas être utilisé en conjonction avec les modèles de polluants (modèle NO).

Cependant, un système parfaitement prémélangée peut être modélisé par le modèle partiellement prémélangé (Partially-Premixed) qui lui, peut être utilisée avec les modèles de polluants (NO).

3.3.2.1. Le modèle C-Equation [45]

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 définit comme nul (c=0) dans le mélange imbrulé, et derrière la flamme « c » est définit comme unité (c=1) dans les gaz brulés, 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 $\overline{c}$:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho.\overline{c})\nabla(\rho.\vec{v}.\overline{c}) = \nabla\left(\frac{\mu_t}{S_{c_t}}\nabla\vec{c}\right) + \rho S_c \quad \text{(3.29)}$$

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 :

$\rho S_c = \rho_u . U_t . |\nabla c|$ ……(3.30).

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 :

$c = \frac{\sum_k \alpha_k (Y_k - Y_k^u)}{\sum_k \alpha_k . Y_k^{eq}} = \frac{Y_C}{Y_c^{eq}}$ ……(3.31).

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.
- α_k est une constante (α_k=0 pour les réactifs, α_k=1 pour les produits).

3.3.2.2. Le modèle d'équilibre et le modèle en fonction de densité de probabilité PDF [45]

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 :

$\bar{\phi} = \int_0^1 \int_0^1 \phi(f,c).\mathrm{p}\,(f,c)\, df.dc$ ……(3.32).

Le modèle de transport PDF proposé dans ANSYS Fluent 16 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.

3.3.2.3Le modèle de Zimont [45]

La vitesse de flamme turbulente pour les cas étudiés est modélisée par l'approche de Zimont. Dans le logiciel commercial utilisé ANSYS fluent 16.0, la fermeture de la vitesse de flamme turbulente de Zimont est calculée comme suit :

$U_t = A.(u')^{3/4}.U_l^{1/2}.\alpha^{-1/4}.l_t^{1/4}$ ……(3.33).

$U_t = A.u'.\left(\frac{\tau_t}{\tau_c}\right)^{1/4}$ ……(3.34).

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 (m2/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 :

$$l_t = C_D \frac{(u')^3}{\varepsilon} \quad \text{.....(3.35).}$$

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

3.4. Description du problème

Cette simulation numérique se porte sur les effets de choix de modèle de la turbulence et de la combustion pour des flammes pré-mélangées turbulentes swirlés. L'effet de ces derniers a été étudié pour la structure bidimensionnelle (2D). Cette analyse s'intéresse à la capacité des modèles utilisés à prédire les paramètres fondamentaux d'une flamme ; la température, la vitesse, la pression et la distribution des espèces chimiques (CH4).

3.5. Création de la géométrie

La géométrie a été réalisée à l'aide de logiciel **GAMBIT**; qui est un outil de préparation de la géométrie d'usage général , c'est une moitié du domaine afin d'utiliser la symétrie avec swirl, les formes et dimensions sont montrées sur la **Figure.3.2.** L'entrée d'air a été décalée vers l'arrière de 20 mm conformément à la structure expérimentale proposée par Muppala S.P.R et al (2015).

Le bec du brûleur à un rayon de 28.55 mm, il se compose de deux parties ; la plaque perforée axiale où le mélange réactif est injecté avec une vitesse purement axiale d'un rayon de 20 mm et d'un espace annulaire swirlé de 8.55 mm où le mélange réactif est injecté avec deux composantes de vitesses : axiale et tangentielle.

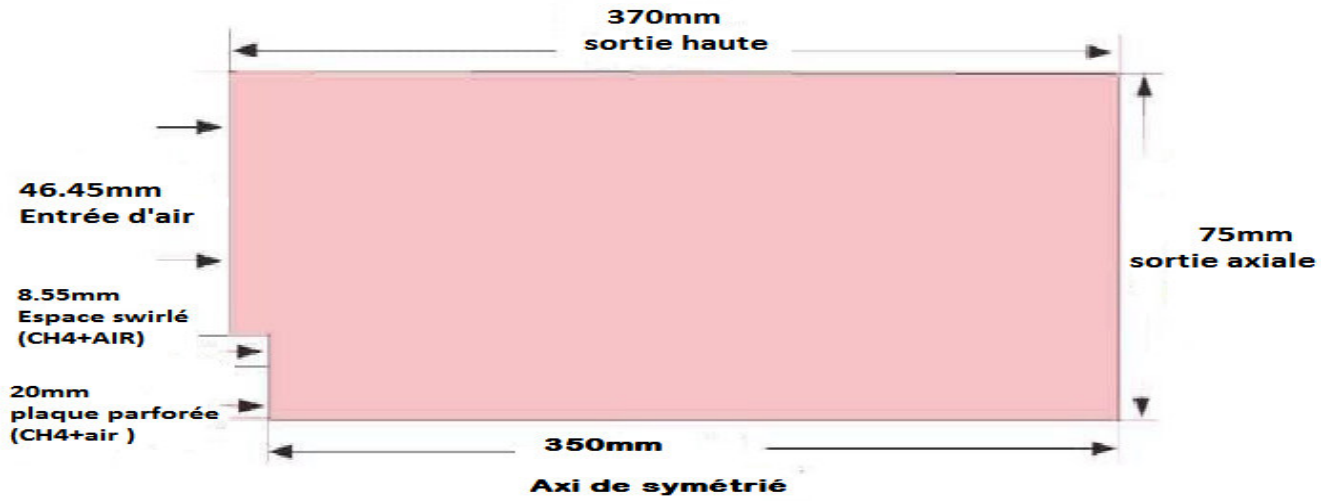


Figure. 3.2. Structure du domaine de calcul selon «Muppala S.P.R et al (2015) »

3.6. Les conditions aux limites

Dans cette partie on va définir les paramètres utilisés lors de la simulation numérique ainsi que les conditions aux limites imposées.

Pour le cas de l'étude 2D, seul l'effet de la richesse du CH4 a été effectué.

Section	Conditions aux limtes
Entrée d'air	Entrée de vitesse
Plaque perforée axiale	Entrée de vitesse
Espace annulaire swirlé	Entrée de vitesse
Sortie haute	Symétrie
Sortie axiale	Sortie de pression
Axe centrale	Axe
Parois	mur

Tableau 3.1. Les conditions aux limites imposées sur les deux configurations.

- **Entrée d'air :**

	U_{ax}(m/s)	**I(%)**	**D_h(mm)**	Fraction massique du CH_4	Fraction massique de l'O_2	Fraction massique du N_2
Muppala S.P.R et al (2015)	**0.35**	**0.1**	**122.9**	**0**	**0.23**	**0.77**

Tableau 3.2. Les conditions aux limites à l'entrée d'air.

- **Plaque perforée axiale**

	U_{ax}(m/s)	I(%)	D_h(mm)	Fraction massique du CH_4	Fraction massique de l'O_2	Fraction massique du N_2
Muppala S.P.R et al (2015)	**10.8**	**10**	**40**	**0.0332**	**0.2253**	**0.7415**

Tableau 3.3. Les conditions aux limites imposées sur la plaque perforée.

- **Espace annulaire swirlé :**

	U_{ax}(m/s)	U_{st}(m/s)	I(%)	D_h(mm)	Fraction massique du CH_4	Fraction massique de l'O_2	Fraction massique du N_2
Muppala S.P.R et al (2015)	**24.94**	**20.92**	**10**	**17.1**	**0.0332**	**0.2253**	**0.7415**

Tableau 3.4. Les conditions aux limites imposées l'espace annulaire swirlé.

3.7. Conditions opératoires

Paramètre	Désignation
Modèle de combustion	EDM (Eddy Dissipation) Partially Premixed
Modèle de turbulence	k-ε standard, k-ε RNG, k-ε Réalisable k-Omega standard, k-Omega SST
Solveur	Axisymétrique swirl
Pression de service (Operating pressure)	1 Atm
Richesse	0.59
Température d'entrée	300 K
Vitesse d'entrée moyenne U0	18m/s
Nombre de swirl	0.5

Tableau. 3.5. Conditions opératoires

3.8. Structure et test de maillage

Le maillage à structure bidimensionnelle adopté dans cette étude est structuré uniforme.

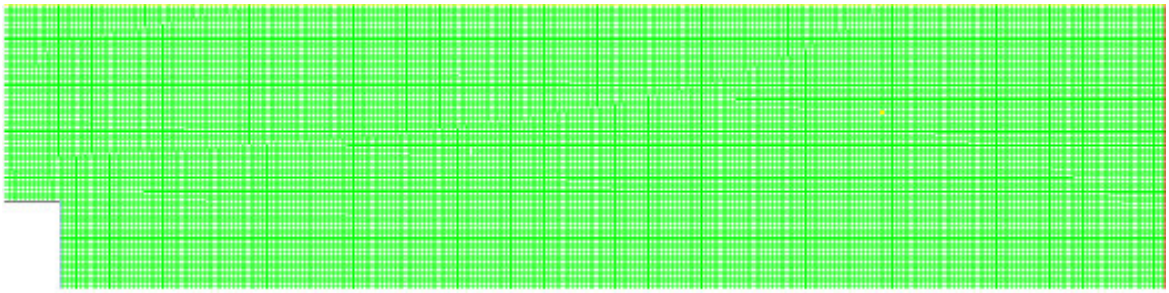


Figure 3.3. Structure de maillage.

Plusieurs cas de maillages ont été testés en variant les nombres des nœuds (Tableaux 3.1) pour le géométrie, afin d'atteindre des solutions indépendantes du la grille.

	Maillage N°1	Maillage N°2	Maillage N°3	Maillage N°4	Maillage N°5	Maillage N°6	Maillage N°7	Maillage N°8
Nombre de Nœuds	7114	13760	22578	27616	39655	76730	53866	62094

Tableau 3.6. Différents nombres des nœuds.

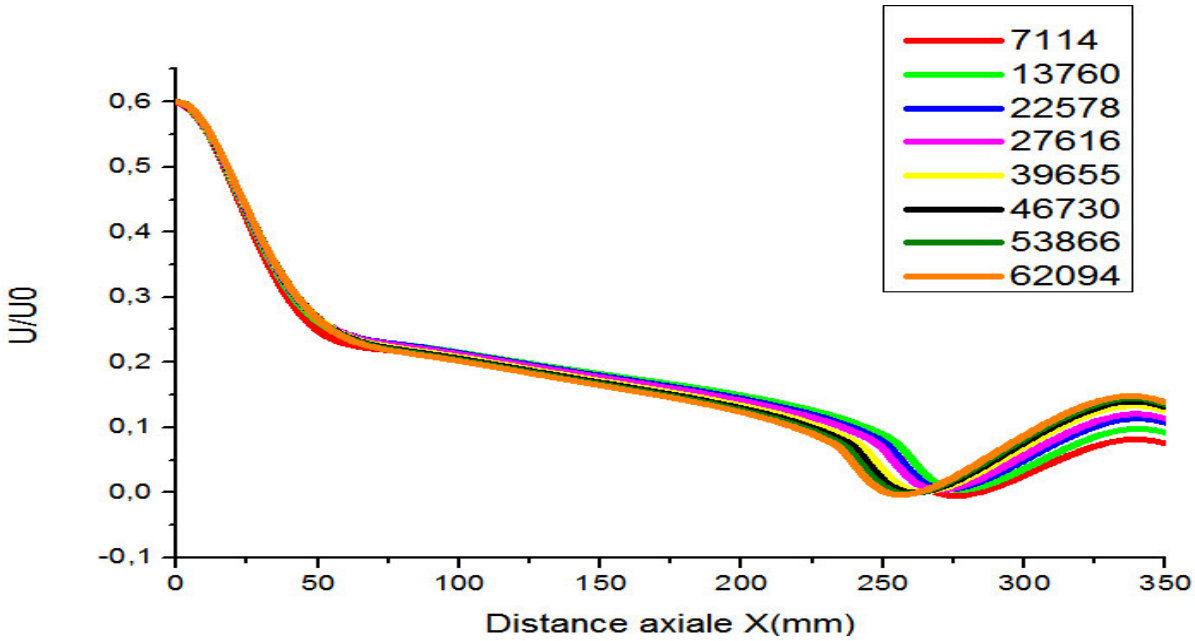


Figure 3.4. Vitesses axiales sur l'axe du brûleur pour différents nombres de nœuds.

Les figures précédentes montre que les profils des Vitesses axiales sur l'axe du brûleur pour différents nombres de nœuds du maillage. L'indépendance est claire à partir de 46730 nœuds.

3.9. Les propriétés physico-chimiques et thermiques des fluides (air, méthane)

Fluide	« **air** » à une $T_{ref} = 298.15$
Chaleur massique $C_p\ (kg/m^3)$	1006.43
Conductivité thermique $\lambda\ (j/kg.K)$	0.0242
Viscosité dynamique $\mu\ (w/m.K)$	$1.7894.10^{-5}$
Masse molaire (g/mol)	28.966
Masse volumique $\rho\ (kg/m^3)$	1.23

Tableau 3.7. Les propriétés physico-chimiques et thermiques de l'air.

Fluide	« **méthane**» à une $T_{ref} = 298.15$
Chaleur massique $C_p\ (kg/m^3)$	2222
Masse molaire (g/mol)	16.04303
Masse volumique $\rho\ (kg/m^3)$	1.23
Pouvoir calorifique inferieur PCI (kj/kg)	50020
Enthalpie à l'état standard (j/mol)	$-7.489518.\ 10^{-7}$
Entropie à l'état standard $(j/mol.k)$	186040.1
Température d'auto-inflammation (c°)	537
Point de fusion (c°)	-182
Point d'ébullition (c°)	-161.5
Domaine d'explosivité (% vol)	5 – 15

Tableau 3.8. Les propriétés physico-chimiques et thermiques de méthane.

3.10. Paramètres adoptés sous ANSYS Fluent 16.0

Les paramètres adoptés au cours de cette simulation comme les solveurs, couplage pression-vitesse, facteurs de sous relaxation…etc.) sont présentés dans les tableaux[3.9] et [3.10]:

Solveurs	**Presure-Based, Steady (stationnaire) et Axisymmetric swirl**
Couplage pression-vitesse	Algorithme « Simple »
Schéma de discrétisation	Quick
Schéma d'interpolation de la pression	PRESTO

Tableau 3.9. Paramètres adoptés sous ANSYS Fluent.

Facteurs de sous relaxation						
Pression	Densité	Quantité de mouvement	Vitesse swirlé	Energie cinétique turbulent	Taux de dissipation turbulent	Viscosité turbulente
0.3	0.8	0.7	0.9	0.8	0.8	0.8

Tableau 3.10. Facteurs de sous relaxation adoptés.

3.11. Critère de convergence

Au cours de la simulation, la convergence et la stabilité du calcul ont été suivis par les courbes d'évolutions des résiduelles au cours des itérations. La figure (3.4) montre les courbes des résidus par rapport aux itérations.

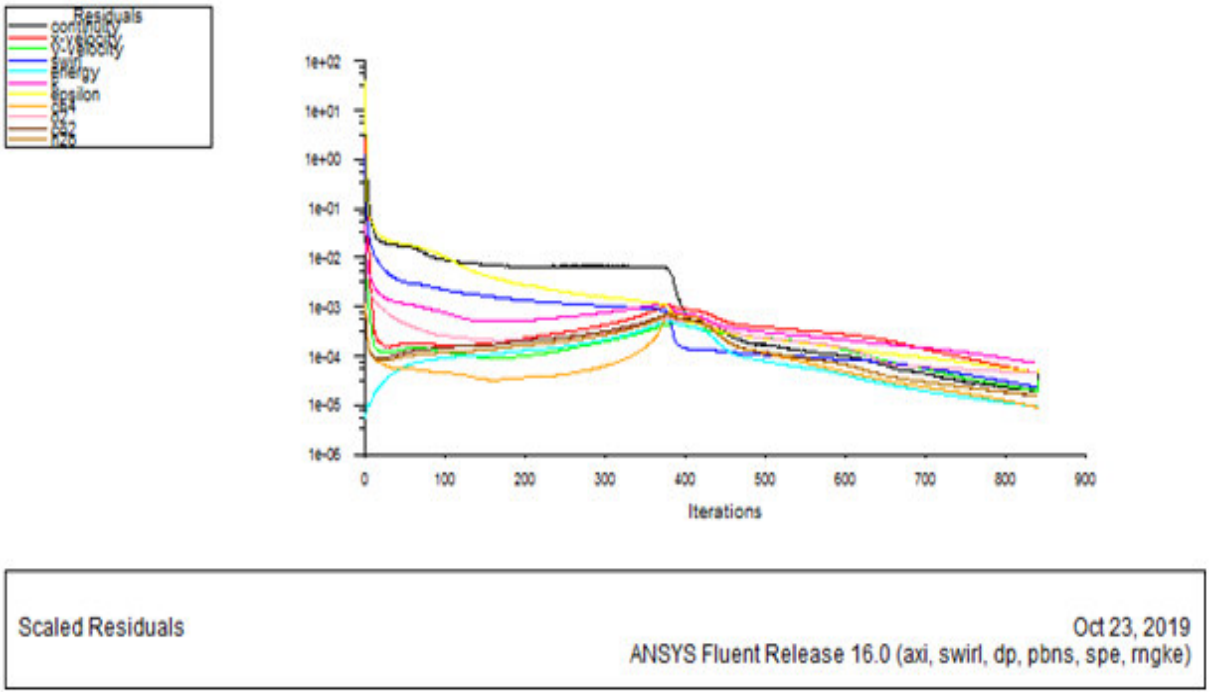


Figure 3.5. Courbe de convergence du cas de simulation.

Les valeurs de tolérances des résidus ont été fixées à des niveaux très acceptables par rapport aux préconisations proposées par le guide du logiciel utilisé ANSYS Fluent 16.Les résidus imposés sont montré sur le tableau (3.11) :

	Continuité	V_{ax}	V_r	swirlé	Energie	K	**ε**	Fmean	Fvar	premix	NO
Résidus	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}

Tableau 3.11 .Résidus imposés pour l'étude de simulation numérique.

3.5.Conclusion

Ce chapitre résume les moyens numériques exploités lors de cette étude. La méthode des volumes finis et discrétisation ont été détaillées, le problème a été décrit, les géométries et les maillages adoptés ont été étudiés pour les configurations 2D et les conditions aux limites et opératoires posées sont citées et justifiées. Les paramètres utilisés lors de l'étude de l'effet de la richesse et du swirl ont été détaillés ainsi que la stationnarité les critères de convergences du problème et la stabilité du calcul.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4.1. Introduction

Dans ce chapitre , nous intéressons à l'analyse des résultent obtenus par simulation numérique élaborée ; l'effet de la richesse du méthane (CH4) ainsi pour des flammes de méthane-air prémélangées turbulente swirlés.

Les modèles utilisés d'examiner le pertinence de deux modèles de combustion EDM et Partially-Premixed et les modèles de turbulence RANS (k-ε standard, k-ε RNG, k- ε Réalisable, k-Omega standard, k-Omega SST) dans le modèles de combustion EDM, dans le but d'aboutir au modèle de combustion le plus convenable pour les brûleurs swirlés LSB.

4.2 Choix du modèle de turbulence

4.2.1. Investigation de cas réactif pour le brûleur

La simulation de l'écoulement dans le cas réactif du brûleur LSB concerne l'écoulement du gaz durant la combustion. Dans notre cas, le traitement de la simulation a été basé sur l'utilisation de Cinq modèles de turbulence à savoir le modèle (k-ε Standard, k-ε RNG, k-ε Réalisable, k-ω Standard et le modèle k-ω SST), couplé avec le modèle de combustion Eddy Dissipation (EDM).

- **profils des vitesses axiales**

La Figure 4.1 présente l'évolution de la vitesse axiale sur l'axe du bruleur en configuration bidimensionnel pour différentes modèles de turbulence.

On constate que les deux courbes (expérimentale et numérique) dans la Figure 4.1ont presque la même allure.

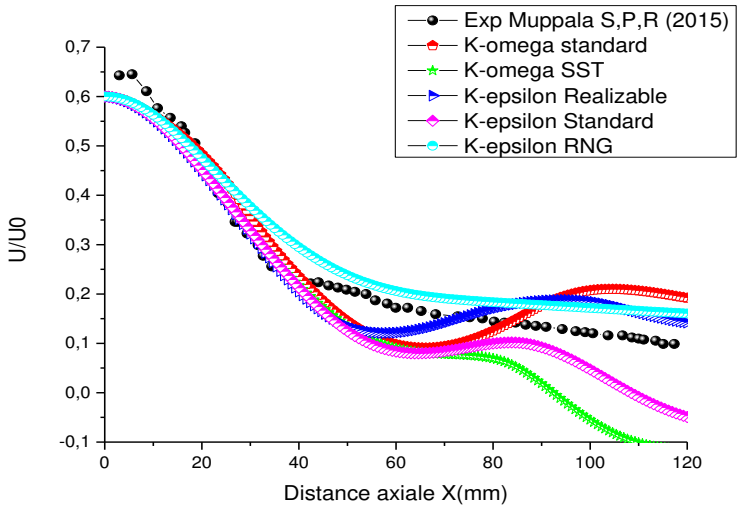


Figure.4.1. Comparaison des profils de vitesse axiale sur l'axe du bruleur

La **Figure 4.2** montre l'évolution de la vitesse axiale pour chaque modèle de turbulence sur l'axe du bruleur. On remarque que le modèle k-ε RNG reproduit le mieux aux résultats expérimentaux.

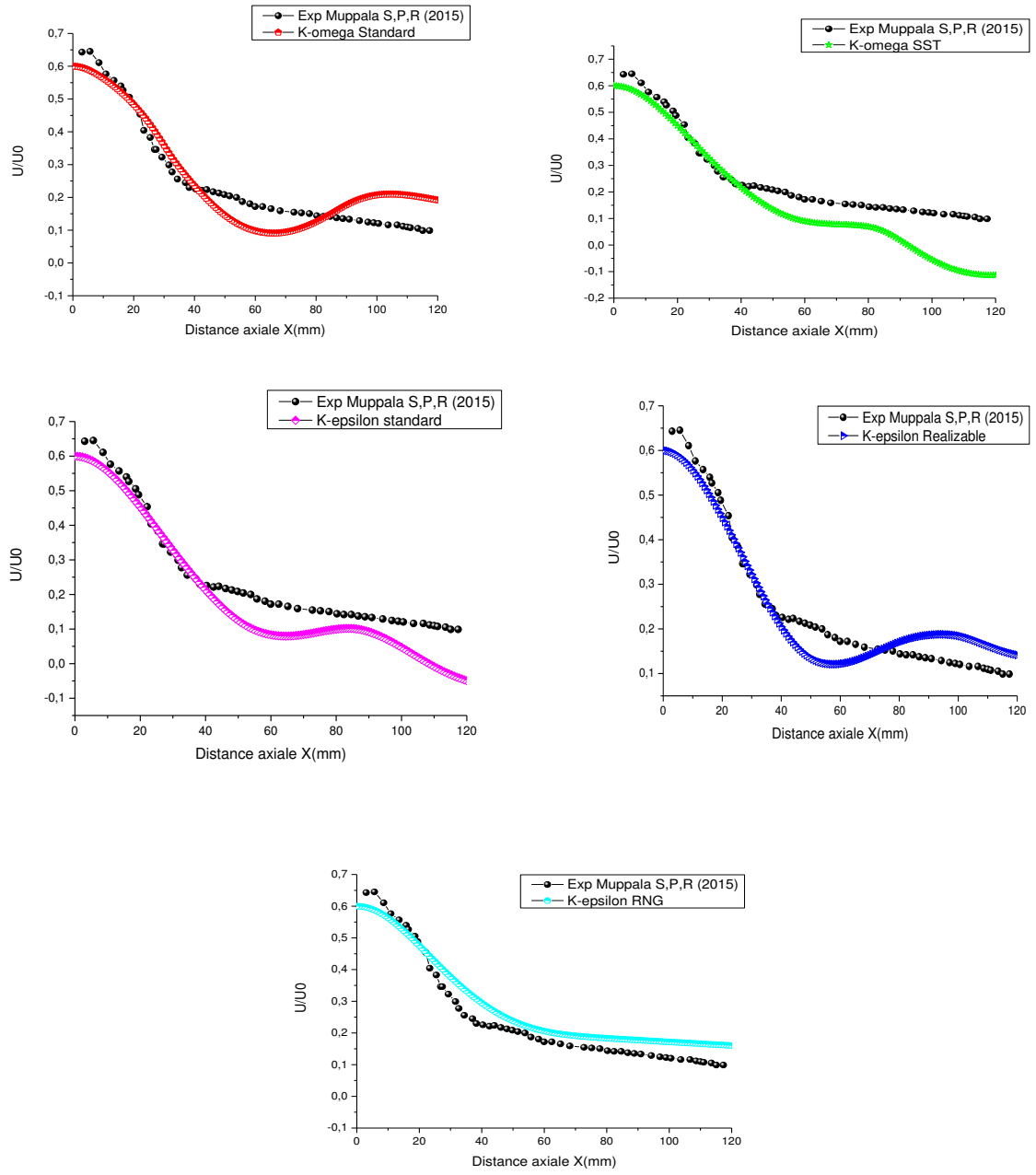
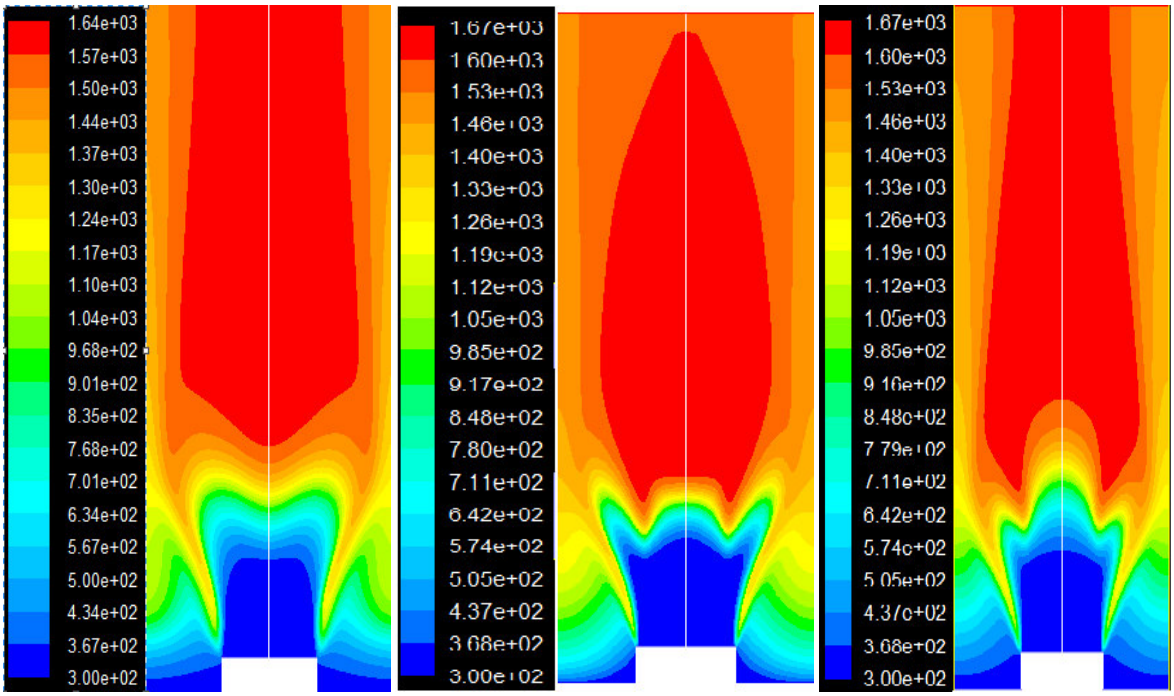
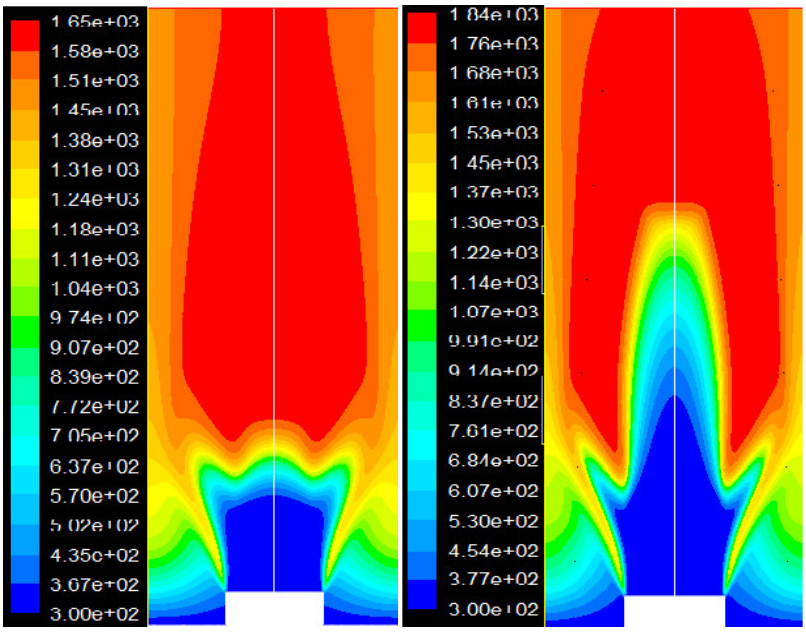


Figure.4.2. Comparaisons des profils de vitesses axiales sur l'axe de bruleur dans le cas réactif.



k-omega Satndard k-omega SST K-epsilon Realizable



K-epsilon Standard K-epsilon RNG

Figure .4.3. Contours de la température sur l'axe du brûleur.

4.3. Choix du modèle de combustion

La comparaison des profils de vitesses axiales de chaque modèle de combustion a été effectuée de Muppala S.P.R (2015) un cas réactif.

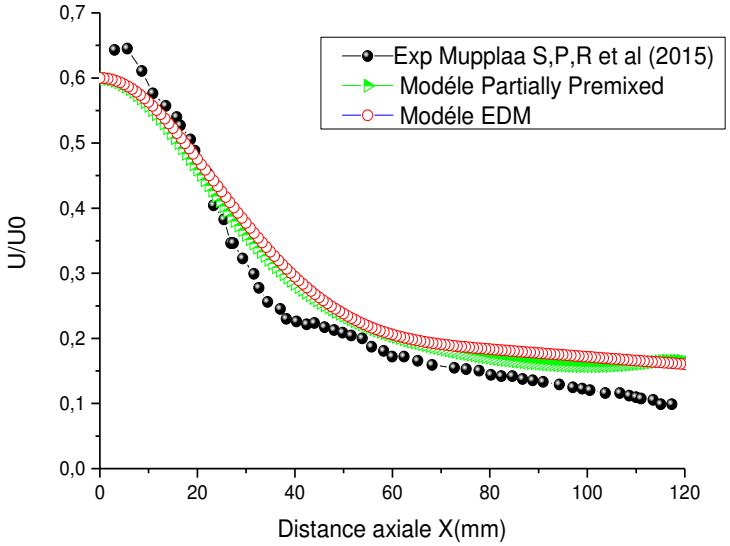
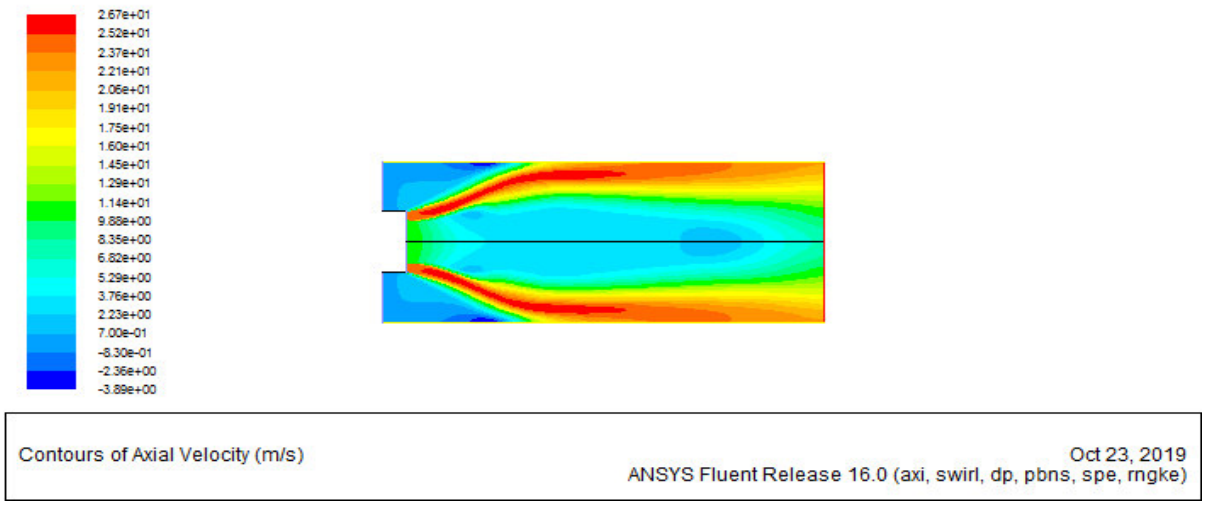
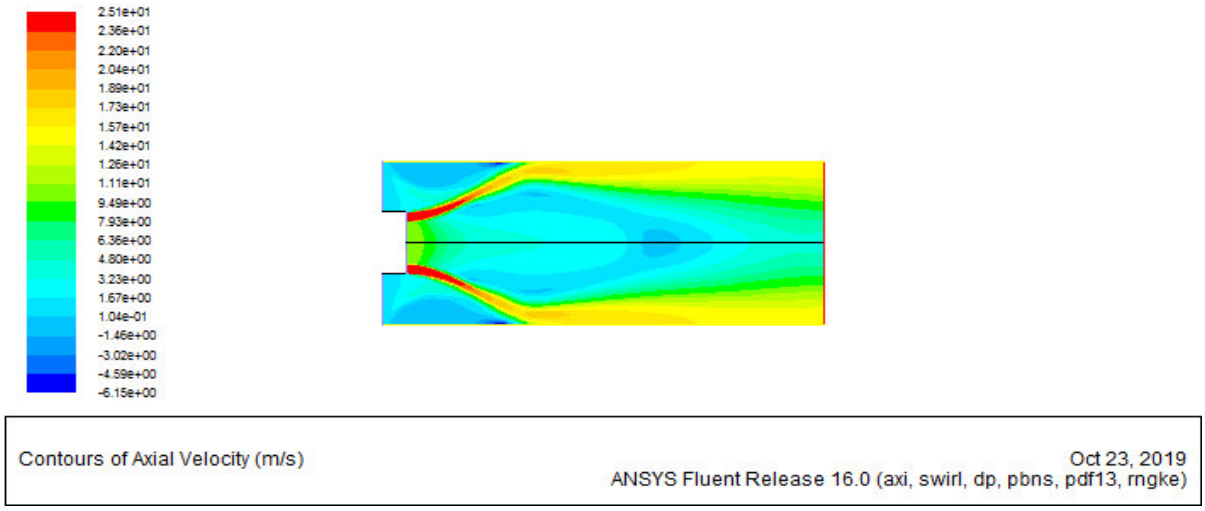


Figure 4 .4. Influence de modèles de combustion sur les profils de vitesses axiales sur l'axe du brûleur dans le cas réactif.

Les figures. 4. 5.montrent la comparaison des profils de vitesses axiales sur l'axe du brûleur pour les données expérimentales de Muppala S.P.R, et al (2015) et ainsi que pour les prédictions de deux différents modèles de réaction , EDM et Partially- Premixed.



(a)



(b)

Figure 4.5. Contours de vitesses axiales : (a) Modèle EDM ; (b) Modèle Partially- Premixed.

En comparant les contours de vitesses de deux modèles de combustions utilisés, on peut observer que :

- La flamme avec le modèle Partially-Premixed produit des régions de recirculations plus larges et plus grandes qu'avec le modèle EDM.
- La flamme avec le modèle EDM peut atteindre des valeurs de vitesses plus importantes qu'avec le modèle Partially-Premixed. Cela peut être justifié par la chimie infiniment rapide du modèle EDM qui néglige les réactions d'amorçage endothermique. Cette négligence engendre une surestimation de température qui va influer sur la densité du mélange en augmentant les valeurs de la vitesse.

La figure (4.7) présente une comparaison des profils de distribution du CH4 obtenus par les deux modèles de combustions EDM et Partially-Premixed. Cette figure montre qu'à la sortie du brûleur à x=0 jusqu'à environ x=180 mm, les valeurs de fractions massiques du CH4 représentent les valeurs des conditions aux limites imposées pour les deux modèle de combustion ; sachant qu'à cet endroit la flamme ne s'est pas encore développée. Puis, à partir de x=180 mm à peu près, on remarque une diminution considérable de la fraction massique du CH4 ; ceci est dû au déclenchement de la flamme.

La distribution du CH4 avec le modèle de combustion EDM est totalement brûlée au cours de la combustion, tandis qu'avec le modèle Partially-Premixed est partiellement brûlée.

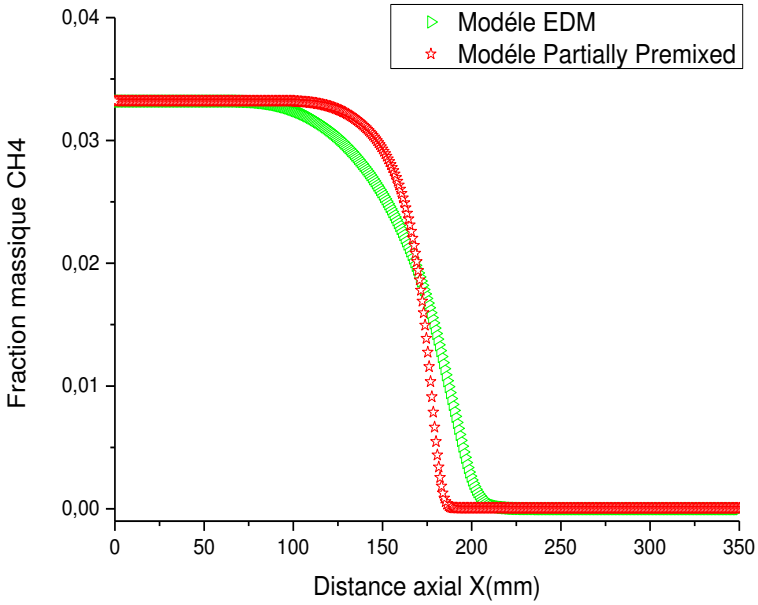


Figure 4.6. Influence de modèles de combustions sur la distribution du **CH_4**.

4.4. Effet de la richesse du CH4

Dans cette partie l'influence de la richesse a été analysée en utilisant le modèle de combustion choisi : Partially Premixed.

La variation de la richesse du CH4 a pour but d'analyser le comportement des bruleurs LSB en mélange pauvre, stoechiométrique et riche , l'analyse de son effet a été investiguer sur plusieurs paramètres : la vitesse, la température.

4.4.1. Paramètres de l'analyse de l'effet de la richesse du CH4

Cette analyse a été effectuée pour les deux configurations Mupalla S.P.R et al en variant la richesse du CH4 afin d'étudier le comportement des flammes prémélangées dans le domaine pauvre, stoechiométrique et riche.

Les différentes compositions du mélange réactif utilisées sont résumées dans le tablea(3.9) et ont été calculés à partir de l'équation (3.21) et (3.28) :

	Muppala S.P.R et al (2015)			
		Composition du mélange		
cas	Richesse du CH_4	Fraction massique du CH4	Fraction massique de l'O_2	Fraction massique du N_2
1	0.59	0.0332	0.2253	0.7415
2	0.7	0.0391	0.2239	0.737
3	0.8	0.0445	0.2227	0.7328

Tableau .4.1 . Distribution des espèces chimiques sur la plaque perforée et l'espace annulaire swirlé en variant la richesse.

4.4.2. Effet de la richesse du CH4 sur la température

L'effet de la richesse sur la température a été effectué sur le brûleur de Muppala S.P.R, et al (2015) .

Les figures (4.8) et (4.9) on remarque que dans les régimes pauvre ($\Phi = 0.59$ et 0.7 et 0.9),un présentent l'effet de la richesse sur l'évolution et les champs de températures. l'augmentation brutale de la température est un des résultats de la combustion. L'augmentation de la richesse Φ a montré un rapprochement entre le front de flamme et le bec du bruleur. Ce rapprochement peut provoquer la perturbation de la flamme qui est censé se maintenir à une certaine distance du bruleur (principe du LSB).Ceci va impliquer une rupture précoce de la structure du bruleur sensée être maintenue à la température d'entrée des réactifs.

Dans le domaine pauvre l'augmentation de la richesse fait augmenter les températures de manière considérable de 1650 K à 2000 K. Alors que dans le domaine riche l'augmentation de la richesse influe inversement sur la température. Cette diminution de la température peut être justifiée par le manque d'oxygène dans le milieu réactionnel.

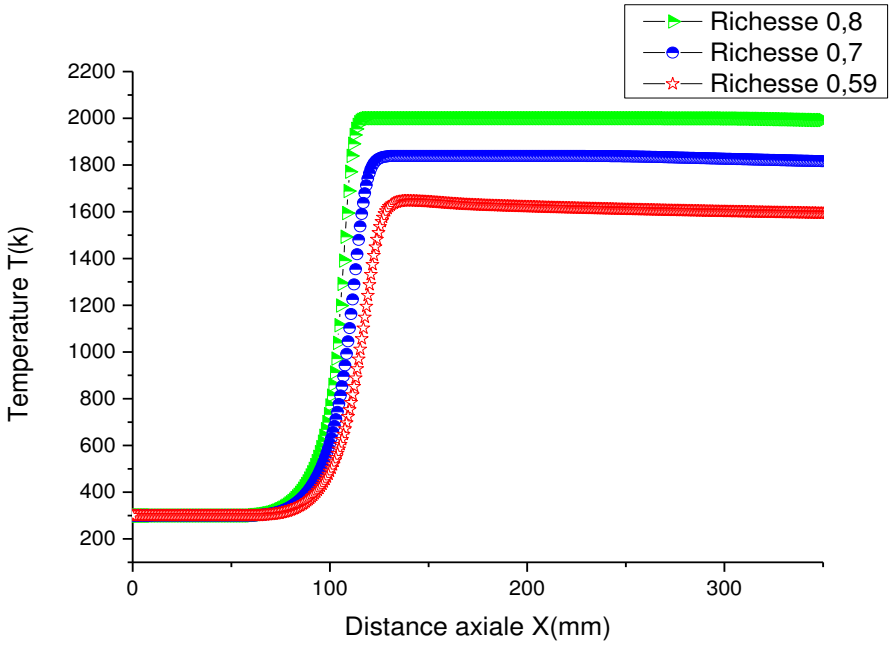
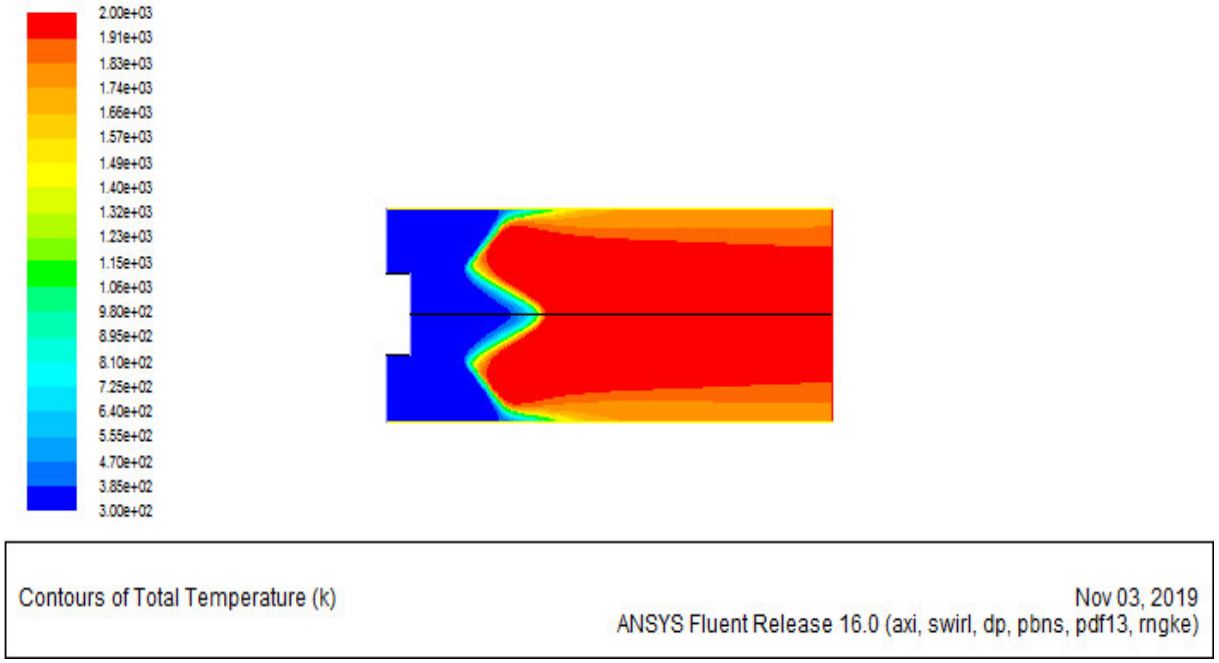
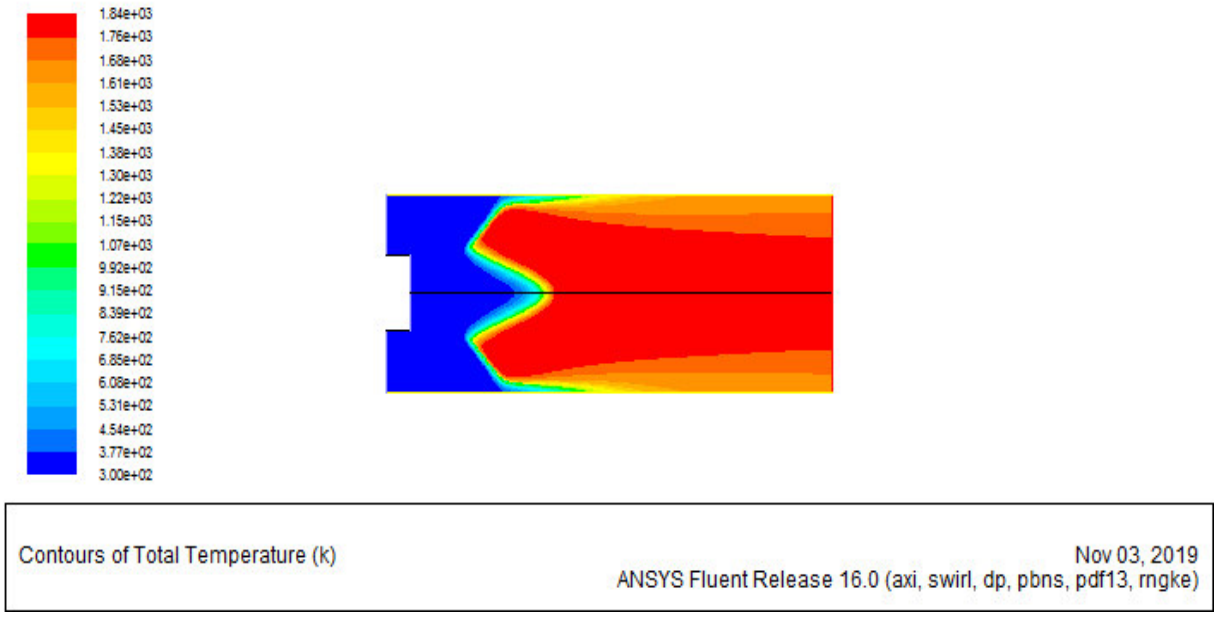


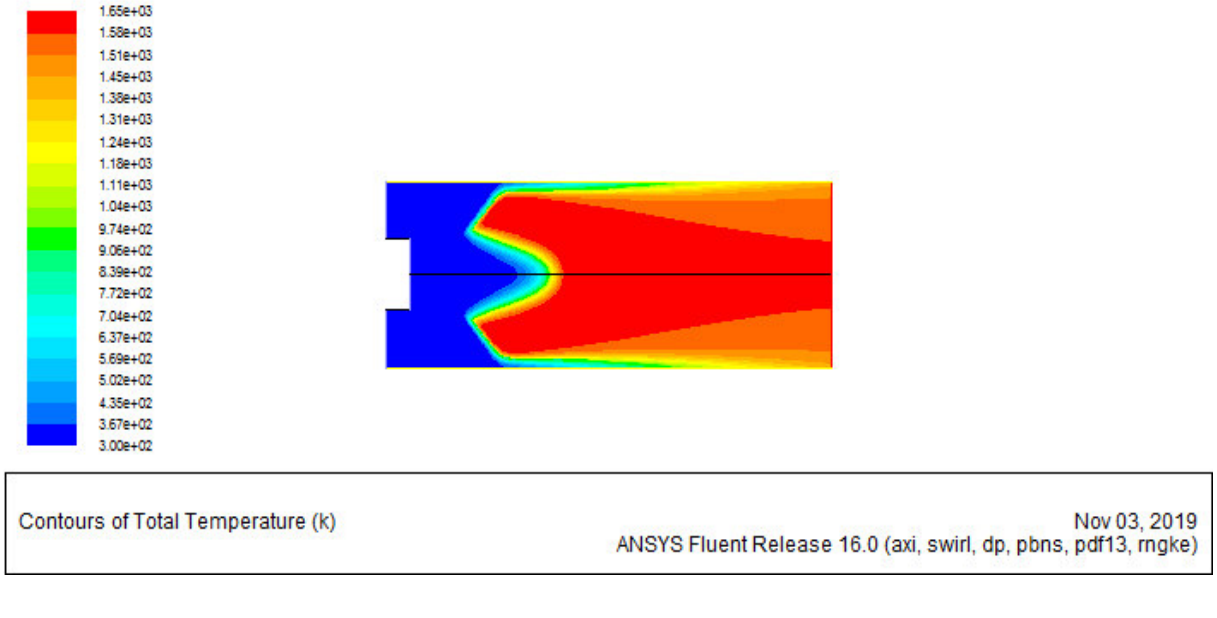
Figure 4.7. Effet de la richesse sur profils de température sur l'axe du brûleur.



Φ=0.8



Φ=0.7



Φ=0.59

Figure 4.8. Effet de la richesse sur les champs de températures.

4.4.3. Effet de la richesse du CH_4 sur la vitesse axiale

Effet de la richesse sur la vitesse axiale a été effectué sur le brûleur de Muppala S.P.R, et al (2015) .

Les figures (4.10) et (4.11) montre l'influence de la richesse sur la tendance des profils et les champs des vitesses axiales. La comparaison entre le cas réactif est inerte montre une absence

totale des zones de recirculations, les valeurs des vitesses axiales sont purement positives. Ce résultat prouve encore la particularité des bruleurs LSB pour réduire l'existence des zones de recirculations.

Les valeurs des vitesses axiales augmentent proportionnellement à la richesse pour le domaine pauvre (Φ =0.59 et 0.7 et 0.8).

En comparant les contours de vitesses, on peut observer que l'augmentation de la richesse fait diminuer les zones de recirculations en développant des champs des vitesses plus larges avec des maximums des valeurs qui sont déplacés radialement en s'éloignant de l'axe du bruleur.

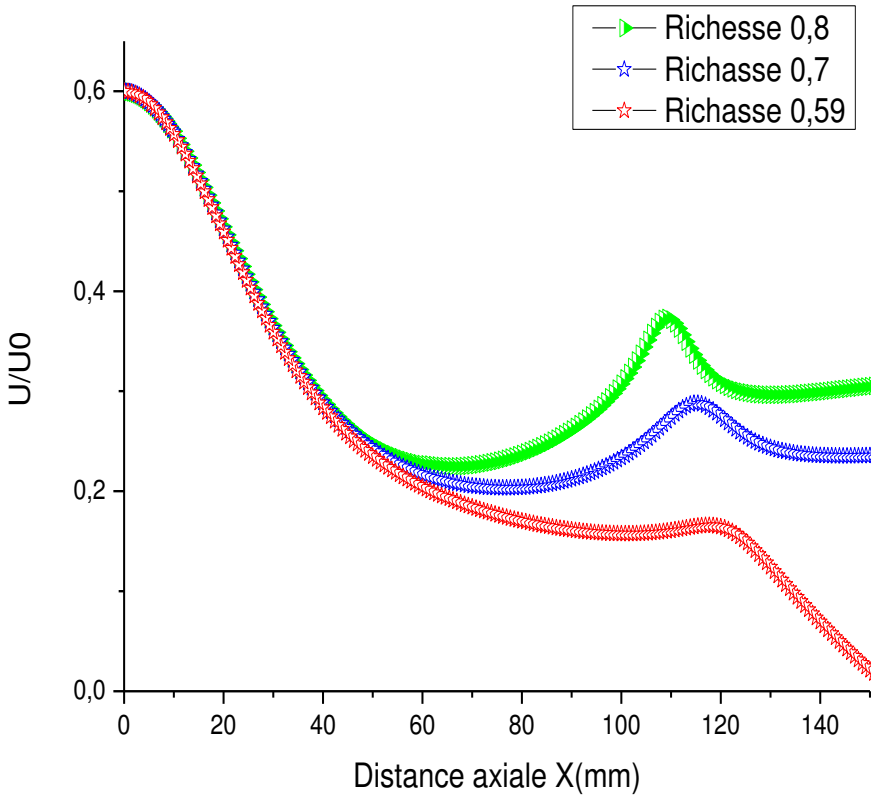
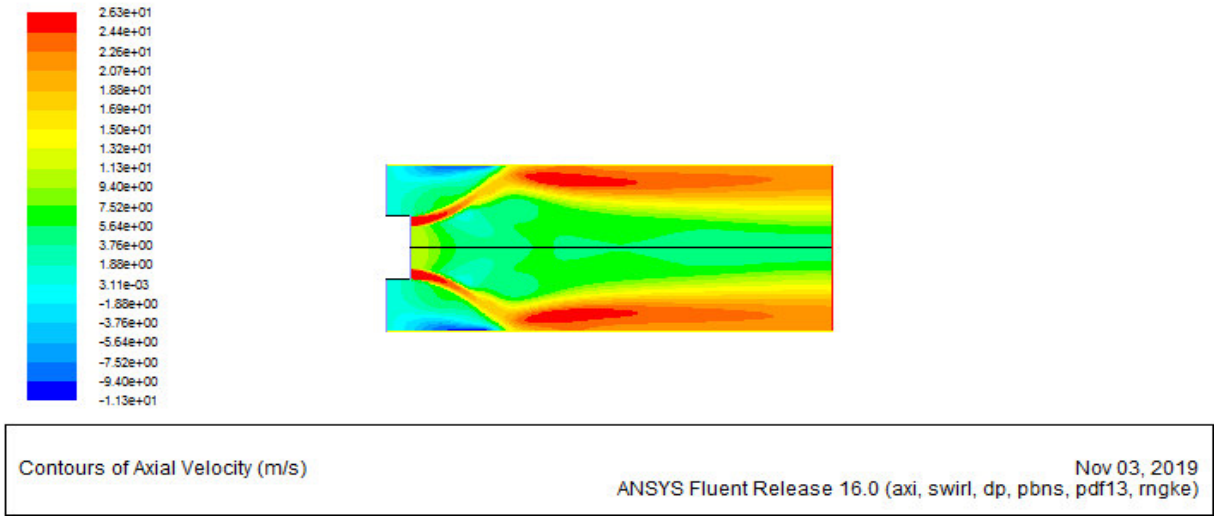
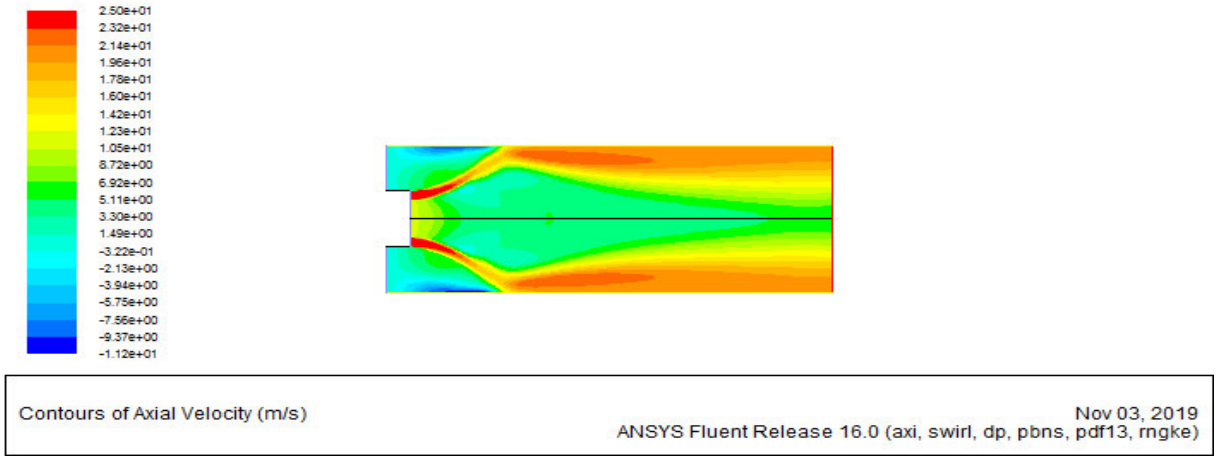


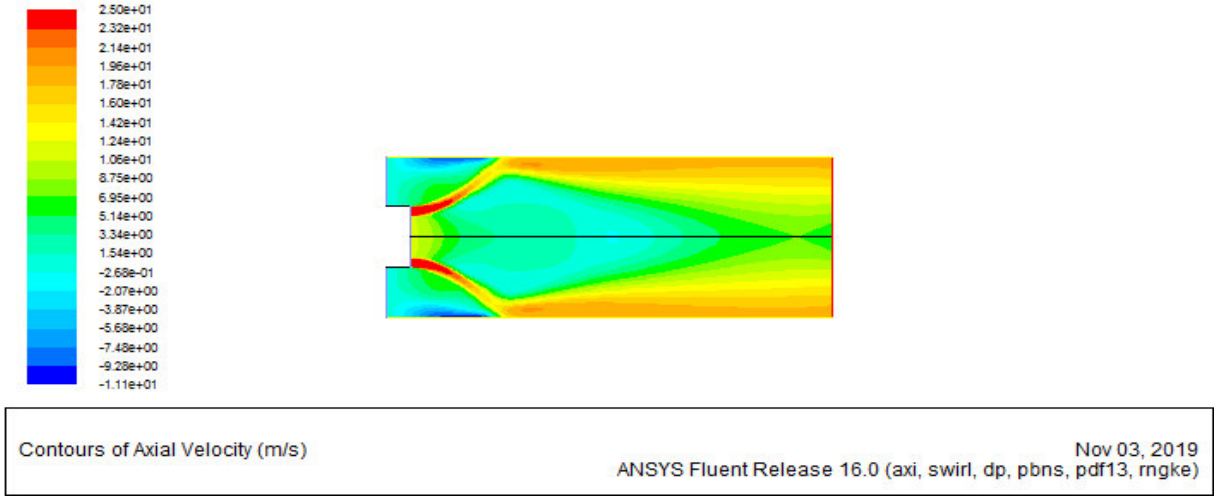
Figure 4.9. Effet de la richesse sur les profils de vitesses axiales.



Φ=0.8



Φ=0.7



Φ=0.59

Figure 4.1. Effet de la richesse sur les contours de vitesses axiales.

4.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation numérique de l'effet de choix de modèles de turbulence sur des flammes pré-mélangées turbulente de méthane-air swirlées pour une configuration de bruleur LSB.

D'après la comparaison effectuée dans cette section entre le modèle EDM et le modèle Partially-Premixed en validant avec les résultats de la littérature de [Muppala S.P.R (2015)] ; le choix de modèle de combustion consiste en modèle Partially-Premixed pour étudier effet de la richesse car il offre une bonne similarité dont il reste une alternative de taille par rapport aux moyens de calculs qu'il requière.

Le bruleur LSB introduit par **Cheng (1995)** a été une configuration expérimentale très utile pour les études des structures des flammes turbulentes pré-mélangées en mélange pauvre combinée à des adaptations de stabilisation de flamme.

Dans ce stade, notre travail de recherche à visé la pertinence de couplage des deux modèles de combustion EDM et Partially-Premixed avec les modèles de turbulences RANS (k-ε standards, k-ε RNG et k-ε Realizable, k-ω STANDARD, k-ω SST) dans le but d'aboutir au modèle de combustion le plus convenable pour les brûleurs swirlés (LSB). Pour cela, des comparaisons avec les résultats expérimentaux de la littérature sont réalisés. En suite, le modèle choisi est utilisé pour investiguer l'influence de certains paramètres (effet de la richesse) sur la température et la vitesse de ce type de brûleur.

La modélisation numérique peut potentiellement résoudre certains de ces problèmes, mais la simulation de ces types de brûleurs s'est avérée difficile en raison de la large gamme d'échelles spatiales et temporelles du système ; l'essentiel de l'analyse à ce jour a été expérimental.

L'analyse des résultats obtenus à partir de notre investigation numérique nous a permis de conclure :

- Pour la validation de notre cas méthane/air ; le modèle de combustion Partially-Premixed offre des résultats très acceptables dans l'analyse des espèces chimiques, champ thermique et champ dynamique et il reste une alternative de taille par rapport aux moyens de calculs qu'il requière.
- Dans le mélange CH_4/air l'augmentation de la température et la vitesse dépend directement de la richesse du mélange.
- On peut dire que la technologie des brûleurs LSB offre des résultats les plus satisfaisants sur la réduction des émissions polluantes et à la préservation des installations industrielles de par sa technique de stabilisation des flammes pré-mélangé turbulentes (CH_4/ air).
- Les températures de flamme dans les bruleurs LSB est plus basses parce que la flamme est détaché de bec du bruleur et ce dernier augmentent sa durée de vie et l'efficacité en termes de rendement thermique et réduisent considérablement la quantité d'oxydes d'azote (NOx) et de gaz à effet de serre produits.

[1] CHEKIRED MOURAD. « Etude Numérique de la Combustion Turbulente Prémélangée d'un mélange Gazeux(Air/Combustible) dans un Brûleur à Bec Bunsen »,2005.

[2] Soufi Aida .Bounab Nasser . « Etude, par modélisation cinétique, de l'oxydation du Diméthyléther dans un réacteur parfaitement agité PSR ».UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI,2017.

[3] BAKHA Abd errahmane . MERNIZ Abdarrazek. « MODELISATION DE L'EFFET DU DOPAGE PAR N-BUTANOL SUR LA FORMATION DES PRINCIPAUX PRECURSEURS DE SUIE ISSUS DE LACOMBUSTION DU BENZÈNE ».2016.

[4] Merabet mourad .Haraoubia mohamed .amine « Simulation numérique de la combustion en utilisant les modèles EDM /LFM ». UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES,20170

[5] Aya Bilal . Messalem Chaouki. « Simulation Numérique de la Combustion Non Pré-mélangée Méthane-Hydrogène dans l'air : Application dans une Chambre de Combustion Cylindrique ». Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued.Algérie,(2017).

[6] LADJANE .M . « Etude numérique et expérimentale de la flamme non per mélange » UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES.

[7]Mohammed El Hadi ATTIA « Etude de l'Effet d'Injection de H_2 sur une Flamme Non-Prémélangée ». Université de LarbiTébessi–Tébessa, 2017.

[8]Guillaume Albouze. « Simulation aux grandes échelles des écoulements réactifs non prémélangés » DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ TOULOUSE, 2009.

[9]NOUI Samira. « Etude Numérique de la Combustion des Gaz dans un Four de Cimenterie » UNIVERSITE HADJ-LAKHDAR BATNA, 2006.

[10] Xavier CORON « Étude expérimentale d'une flamme de prémélange stabilisée dans un écoulement turbulent à point d'arrêt ».Docteur de l'Universit´e de Poitiers.2002.

[11] Kim Quoc .Nguyen KHA. « Contribution à la modélisation et à la simulation numérique de la combustion turbulente pré-mélangée dans des régimes d'interaction chimie-turbulence extrêmes : Prise en compte des écarts à l'hypothèse de flamme mince. »DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MECANIQUE ET D'AEROTECHNIQUE ,2016

.

[12] Fabien HALTER. « Caractérisation des effets de l'ajout d'hydrogène et de la haute pression dans les flammes turbulentes de prémélange méthane/air ». A L'UNIVERSITE D'ORLEANS ,(2005).

[13] BORGHI .R .DESTRIAU .M . « La combustion et les flammes ». L'Université de Rouen, 1995.

[14] https://www.fioulreduc.com/blog/le-bruleur-la-base-du-systeme-de-fonctionnement-dune-chaudiere-a-fuel-2. Publié le 25/07/2018 par L'équipe FioulReduc dans Fioul'Pratique : conseils & astuces.Mis à jour le 08/10/2019

[15]MAZHOUDI .H. « Modélisation et étude des flammes prémélangées dans les brûleurs LSB méthane et méthane-hydrogène/air ». UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, (2019).

[16]Charles E. Baukal, Jr.Vladimir, Y. Gershtein, et Xianming Li. « Industrial burners hand book. Computational Fluid Dynamics in Industrial Combustion, (2003).

[17] Hassan BOUALIA. « Etude numérique et expérimentale des champs dynamiques et scalaires dans un écoulement turbulent fourni par un brûleur coaxial. Effet de la stratification »,2018.

[18] M.E. Feyz, J.A. Esfahani, I. Pishbin, S.M.R.M. Razavi, «Effect of Recess Length on the Flame Parameters and Combustion Performance of a Low Swirl Burner», Applied Thermal Engineering (2015), doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.007.

[19]Bidat .B .and R. K. CHENG. « Experimental Study of Premixed Flames in Intense Isotropic Turbulence. Combustion Group». Energy & Environment Diuision. Lawrence Berkeley Laboratory. Berkeley, (1995).

[20] Yegian, D. T., and R. K. Cheng. «Development of a vane-swirler for use in a low NOx weak-swirl burner." American Flame Research Committee International Symposium, Baltimore, MD, Sept. 1996.

[21] R. K. Cheng, « Lean Premixed Combustion Stabilized by Low Swirl A Promising Concept for Practical Applications», Environmental Energy Technologies Division, (1999).

[22] PLESSING, T., KORTSCHIK, C., PETERS, N., *et al.* « Measurements of the turbulent burning velocity and the structure of premixed flames on a low-swirl burner». *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, vol. 28, no 1, p. 359-366.

[23] Johnson M.R. , D. Littlejohn, W.A. Nazeer, K.O. Smith, R.K. Cheng. « A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbine». Proceedings of the Combustion Institute 30 2867–2874, (2005).

[24] D. Littlejohn ,R.K. Cheng. « Fuel effects on a low-swirl injector for lean premixed gas turbines». Proceedings of the Combustion Institute 31 (2007) 3155–3162

[25] Cheng, R. K., and D. Littlejohn. «Effects of combustor geometry on the flowfields and flame properties of a low-swirl injector» ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2008.

[26] Galpin, J., Naudin, A., Vervisch, L., Angelberger, C., Colin, O., & Domingo, P. (2008). « Large-eddy simulation of a fuel-lean premixed turbulent swirl-burner. Combustion and Flame». 155(1-2), 247–266. doi:10.1016/j.combustflame.2008.04.004

[27]K.J. Nogenmyr, C. Fureby, X.S. Bai , P. Petersson , R. Collin , M. Linne. « Large eddy simulation and laser diagnostic studies on a low swirl stratified premixed flame». Combustion and Flame 156 25–36, (2009).

[28] Cheng R.K, D. Littlejohn. Laboratory investigations of a low-swirl injector

with H2 and CH4 at gas turbine conditions». Proceedings of the Combustion Institute 32 3001–3009. (2009)

[29] Littlejohn D., Cheng R.K., Noble D.R., Tim L. (2010) Laboratory investigations of low-swirl injectors operating with syngases». J Eng Gas Turbines Power vol. 132/011502-1 (2010) doi: 10.1115/1.3124662

[30] Lecocq, G., Richard, S., Michel, J.-B., & Vervisch, L. (2011). A new LES model coupling flame surface density and tabulated kinetics approaches to investigate knock and pre-ignition in piston engines. Proceedings of the Combustion Institute», 33(2), 3105–3114. doi:10.1016/j.proci.2010.07.022

[31]Orbay, R. C., Nogenmyr, K. J., Klingmann, J., & Bai, X. S. (2013). Swirling turbulent flows in a combustion chamber with and without heat release. Fuel, 104, 133–146. doi:10.1016/j.fuel.2012.09.023

[32] Xing LI , JIA Li, Investigation on Combustion Characteristics and NO Formation of Methane with Swirling and Non-Swirling High Temperature Air» , Journal of Thermal Science Vol.23, No.5 472479 (2014).

[33]Yasir M. Al-Abdeli, Assaad R. Masri, «Review of laboratory swirl burners and experiments for model validation». Experimental Thermal and Fluid Science 69 178–196, (2015).

[34] MUPPALA, S., MANICKAM, B., et DINKELACKER, F. « A comparative study of different reaction models for turbulent methane/hydrogen/air combustion». Journal of Thermal Engineering, vol. 1, no 5, p. 367-380.2015

[35] S. Ouali, A. H. Bentebbiche and T. Belmrabet. «Numerical Simulation of Swirl and Methane Equivalence Ratio Effects on Premixed Turbulent Flames and NOX Apparitions. Journal of Applied Fluid Mechanics». Vol. 9, No. 2, pp. 987-998, (2016).

[36] Cheng Tung Chong, Su Shiung Lam, Simone Hochgreb, « Effect of mixture flow stratification on premixed flame structure and emissionsundercounter-rotating swirl burner configuration». Applied Thermal Engineering xxx, xxx–xxx, (2016).

[37] Deng, Yangbo, Hongwei Wu, and Fengmin Su. «Combustion and exhaust emission characteristics of low swirl injector». Applied Thermal Engineering 110 (2017): 171-180.

[38] Tong, Y., Liu, X., Wang, Z., Richter, M., &Klingmann, J. (2018). « Experimental and numerical study on bluff-body and swirl stabilized diffusion flames». Fuel, 217, 352–364. doi:10.1016/j.fuel.2017.12.061

[39] Yinli Xiao, Zhibo Cao, Changwu Wang, « Flame stability limits of premixed low-swirl combustion». Advances in Mechanical Engineering. Vol. 10(9) 1–11, (2018).

[40] Weijie Liu1, Bing Ge, Shusheng Zang, Huiru Wang. Large-eddy simulation of low-swirl multi-nozzle combustion withco- and counter-swirl ingarrays» . Journal of Mechanical Science and Technology 33 (1) 423~431, (2019).

[41] Akinyemi, O. S., & Jiang, L. (2019). « Development and combustion characterization of a novelt win-fluid fuel injector in a swirl-stabilizedgas turbine burner operating on straight vegetable oil». Experimental Thermal and Fluid Science, 102, 279-290.doi:10.1016/j.expthermflusci.2018.11.014.

[42] F. Bouras. «Simulation de la combustion turbulente non-premelangee par le modéle «L.E.S» ». Université de BATNA .Algérie ,2006.

[43] Nazim MERLO. «Caractérisation expérimentale d'une flamme turbulente non prémélangée swirlée : effet de l'enrichissement en oxygène ». UNIVERSITÉ D'ORLÉANS.2014.

[44] Haddar S et Harhat z . «simulation de la combustion stœchiométrique de méthane CH_4 dans une chambre à combustion » .UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ BOUIRA.2015

[45] OUALI Sofiane. « Etude et simulation numérique de la combustion turbulente des flammes prémélangées suspendues de Méthane-Air pour des bruleurs à faible nombre de swirl ». UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES