

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : installation Énergétique et turbomachines

Thème

**étude numérique d'effet de la variation de la
richesse et l'ajout d'hydrogène dans un brûleur LSB
prémélange méthane/air**

Présenté par :

- Belhaoua Fettouma
- Zerkoun Amina

Encadré par :

Mme : M. Ladjani

Promotion 2021- 2022

Remerciements

*Grace à Dieu tout-puissant qui m'a éclairé le chemin
vers cette réussite*

*Et qui m'a donné la force et le courage pour accomplir
ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier vivement mon encadreur, **Mme M.**
Ladjani qui*

M'a aidé, orienté, Et soutenue le long de ce travail.

*Je souhaite remercier sincèrement les membres du jury
qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail.*

*Aussi toute personne ayant participé de près ou de loin
à la réalisation de ce travail...*

Dédicaces

Je souhaite dédier ce modeste travail synonyme de concrétisation de

Tous mes efforts fournis ces dernières années

A la lumière de ma vie ma chère mère

En témoignage de mon affection et reconnaissance

Pour tout ce qu'elle m'a donné

Sans toi je ne serais jamais arrivé jusqu'à-là

Je te remercie pour ton soutien et votre amour inconditionnel

A ma très chère tante ANISSA ma deuxième maman

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour

Et ma très chère tante Nacira

A mon très chère père

A toutes ma famille

*A celui qui m'a soutenue tout au long de ce projet AMINA, Aucun mot ne
saurait t'exprimer mon profond attachement,*

La tendresse et la gentillesse dont tu m'as toujours entouré

A mes meilleures amies REBIAI SELMA, MOULAI LYNDA

A toutes mes amies.

Dédicaces

A ma très chère maman et mon très cher père

*En témoignage de mon affection et reconnaissance Pour tout ce qu'ils m'ont
Donnés*

Sans vous je ne serais jamais arrivé jusqu'à

là

Je vous remercie pour votre soutien et votre amour inconditionnel

A mes frères Mohammed sghir et Ahmed et mes sœurs

*A la personne qui m'a soutenu tout au long de ce projet, mon binôme
FETTOUMA*

*A ma meilleure des amies SARAH ET SABRINA KAMECHE, REBIAI
SELMA, MOULAI LYNDA*

A tous mes collègues et confrères

Liste des figures

Fig I.1 : Traingle de feu	4
Fig I.2 : Classification des flammes selon leur type d'écoulement	5
Fig I.3 : Schéma du brûleur	8
Fig I.4 : Organigramme sur les classifications de brûleur.	9
Fig I.5 : Représentation d'un écoulement à Swirl	11
Fig I.6 : Brûleur développé par Nogenmyr K.J. et al (2009)..	13
Fig I.7 : Brûleur à faible tourbillon.....	13
Fig I.8 : Brûleur multi-becs avec différentes configurations : (b) co-swirling et (c) contre-swirling de Weijie Liu et al (2019).	15
Fig II.1 : Aperçu sur les différents modèles de turbulence	22
Fig III.1 : Brûleur LSB adopté lors de cette étude	38
Fig III.2 : structure du domaine de calcul	39
Fig III.3 : Température sur l'axe du brûleur pour différents nombres de nœuds.....	42
Fig III.4 : structure de maillage.....	42
Fig IV.1 Influence de choix du modèle de turbulence RNG et les deux modèles de combustion sur les profils de températures sur l'axe du brûleur.....	44
Fig IV.2 : Effet de chaque modèle de combustion sur la structure de la flamme pré-mélangée de méthane/air : (a) modèle EDM ; (b) modèle Partially-Premixed	45
Fig IV.3 : Effet de la richesse du CH ₄ sur la température.....	47
Fig IV.4 : contours des flammes de l'effet de la richesse sur l'évolution et les champs de températures.	48
Fig IV.5 :effet de la richesse du CH ₄ sur l'émission du NO _x thermique.	49
Fig IV.6 : Effet de la richesse du CH ₄ sur les émissions du CO.....	50
Fig IV.7 : limite de soufflage LBO pour CH ₄ et CH ₄ /H ₂	51
Fig IV.8 : Effet de l'hydrogène sur la température dans l'axe du brûleur.....	52
Fig IV.9 : Effet de l'hydrogène sur la fraction massique NO _x dans l'axe du brûleur.....	53
Fig IV.10 : Effet de l'hydrogène sur la fraction massique de CO dans l'axe du brûleur	54

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 Avantages et inconvénients des modes de combustion.....	6
Tableau 1.2 Les composants du brûleur.....	8
Tableau 3.1 conditions aux limites imposées sur la structure du domaine de calcul.....	39
Tableau 3.2 conditions aux limites entrée d'air	40
Tableau 3.3 conditions aux limites à la plaque perforée.	40
Tableau 3.4 conditions aux limites de partie swirlé.	40
Tableau 3.5 Conditions opératoires.....	41
Tableau 3.6 Différents nombres de nœuds.....	41
Tableau 3.7 Paramètre adoptés sous FLUENT	43
Tableau 3.8 critère de convergence des résidus	43
Tableau 4.1 Fractions massique de CH ₄ , O ₂ , N ₂ on fonction de la richesse.....	46
Tableau 4.2 puissance donnée par le bruleur LSB CH ₄ /air	51
Tableau 4.3 puissance donnée par le bruleur LSB CH ₄ /H ₂ /air	51
Tableau 4.4 les résultats obtenus cas de mélange CH ₄ /H ₂ /air.	52

Lettres latines

Symbol		unité
c	Variable d'avancement de la réaction	[-]
\bar{c}	Variable d'avancement de la réaction moyenne	[-]
C_p	Capacité calorifique à pression constante	[J/kgK]
C_v	Capacité calorifique à volume constant	[J/kgK]
D	Diamètre du bec du brûleur	[m]
D_h	Diamètre hydraulique	[m]
D_K	Coefficient de diffusion de l'espèce k	[-]
F	Force de volume	[m / s ²]
G_φ	Débit du moment cinétique angulaire	[N . m]
G_X	Débit de quantité de mouvement axiale	[N]
h_t	Enthalpie totale	[J / Kg ⁻¹]
$h_{s,k}$	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'	Vitesse de fluctuation	[m/s]
w	Composante tangentielle de vitesse	[m/s]
V_{ax}	Composante de vitesse	[m/s]
V_s	Composante de vitesse tangentielle	[m/s]
U_0	Vitesse d'entrée moyenne	[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	[-]
β	Taux d'hydrogène en pourcentage %	[-]

Lettres grecques

ϵ	Taux de dissipation de la turbulence	$[m^2/s^3]$
λ	Conductivité thermique	$[W/mK]$
μ	Viscosité dynamique	$[Kg/ms]$
μ_t	Viscosité turbulente	$[Kg/ms]$
ν	Viscosité cinématique	$[m^2/s]$
ρ	Masse volumique du fluide	$[kg/ms]$
τ_{ij}	Tenseur des forces visqueuses	$[N/m^2]$
ϕ	Richesse du mélange en CH ₄	$[-]$
\mathbf{R}	Flux de diffusivité moléculaire	$[Kg/m^2s]$
σ_{ij}	Tenseur de la contrainte	$[N/m^2]$
δ_{ij}	Delta de Krönecer (=1 si $i=j$, =0 sinon)	$[-]$
$\dot{\omega}_k$	Taux de production de l'espèce k	$[mole/m^2s]$
$\dot{\omega}_T$	Taux de dégagement de chaleur due à la combustion	$[J/m^3s]$

Abréviations

CFD	Computaional fluid dynamics
RANS	Reynolds average Navier-Stokes
DNS	Directe numerical simulation
LES	Large Eddy simulatio
EDM	Eddy dissipation model
PDF	Probability density function
HSB	High swirl burner
LSB	Low swirl burner
HSI	High swirl injector
LSI	Low swirl injector
ppm	Particules par millions

Sommaire

Introduction générale.....	1
Introduction	3
I.1 Généralités sur la combustion.....	3
I.1.1 La combustion	3
I.1.2 Triangle de feu.....	3
I.1.3 Caractéristiques de la combustion.....	4
I.1.4 Classification des flammes.....	5
I.1.5 Avantages et inconvénients des modes de combustion.....	6
I.1.6 Propriétés du méthane	6
I.1.7 Applications industrielles de la combustion du méthane	6
I.1.8 Pouvoir calorifique	7
I.1.9 Les Brûleurs	7
I.1.9.1 Définition de Brûleur.....	7
I.1.9.2 Les composants d'un brûleur.....	7
I.1.9.3 Classification des brûleurs.....	9
I.2 Ecoulement swirlé.....	9
I.2.1 Définition du nombre de swirl « S »	10
I.2.2 La classification des écoulements swirlés	11
I.3 Revue bibliographie	12
Conclusion.....	16
Introduction.....	17
II.1 Formulation mathématique.....	17
II.1.1 Equation de continuité	17
II.1.2 Equations de la conservation de la quantité de mouvement	18
II.1.3 Equation de conservation de l'énergie	18
II.1.4 Equation de conservation des espèces chimiques.....	19
II.2 Modélisation de la turbulence.....	21
II.2.1 La méthode moyennée de Reynolds (RANS).....	22
II.2.1.1 Le modèle de fermetures du premier ordre RANS k-ε Standard	24
II.2.1.2 Le modèle de fermetures du premier ordre RANS k-ε RNG.....	25
II.2.1.3 Le modèle de fermetures du premier ordre RANS k-ε Réalisable.....	25
II.3 Modélisation de la combustion.....	26
II.3.1 Modèle EDM (Eddy Dissipation Model).....	27
II.3.2 Modèle PartiallyPremixed.....	28

II.3.2.1	Modèle C-Equation	28
II.3.2.1.1	Propagation du front de flamme	29
II.3.2.1.2	Modèles de vitesse de flamme turbulente.....	30
II.3.3	Modèle d'équilibre et le modèle en fonction de densité de probabilité PDF	31
II.3.4	Modèle de Zimont.....	31
II.3.5	Modèle de formation des polluants NOx thermiques de Zeldovich	32
Conclusion.....		32
Introduction		33
III.1	l'outil CFD	33
III.2	Méthode des volumes finis et discrétisation.....	33
III.3	Code de calcul	34
III.3.1	Gambit	34
III.3.2	Fonctionnalités de GAMBIT	35
III.3.3	Conditions aux limites et définition de domaines	35
III.3.4	FLUENT	36
III.3.5.	Utilisation de FLUENT	37
III.4.	Procédure numérique.....	37
III.4.1	Description de problème.....	37
III.4.2	Création de la géométrie.....	38
III.4.3.	Les conditions aux limites	39
III.4.4	Conditions opératoires.....	41
III. 4.5	Structure et test de maillage.....	41
Conclusion.....		43
Introduction		44
IV.1	Validation.....	44
IV.1.1	Influence du modelé de combustion sur les profils de la température	44
IV.2	Effet de la richesse du CH ₄	45
IV.2.1	Effet de la richesse du CH ₄ sur la température	47
IV.2.2	Effet de la richesse du CH ₄ sur l'apparition des NOx thermique	49
IV.2.3	Effet de la richesse du CH ₄ sur les émissions du CO	50
IV.3.1	L'effet de l'ajout d'hydrogène sur la température	52
IV.3.2	L'effet de l'ajout d'hydrogène sur la Fraction massique de NOx.....	53
IV.3.3	L'effet de l'ajout d'hydrogène sur la fraction massique de CO	54
Conclusion.....		54
Conclusion générale		56

Introduction générale

Ces derniers temps la combustion est le principal moyen de conversion de l'énergie. Elle est utilisée dans de nombreux systèmes pratiques aussi bien pour produire de la chaleur (chaudières ou fours domestiques et industriels), de l'électricité (centrales thermiques, turbines à gaz) que pour le transport (moteurs automobiles et aéronautiques, moteurs fusées) ou encore la destruction de déchets (incinérateurs). La combustion intervient aussi dans le problème de sécurité (incendies, explosions, détonations accidentelles). La combustion est un phénomène important puisqu'elle est utilisée comme source d'énergie principale. Le problème majeur de ce processus est la formation de polluants (CO, composés organiques volatils (COV), oxydes d'azote (NOx), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), suie...).

Une attention particulière a été accordée au domaine de la combustion, notamment à la recherche de nouvelle technologie plus efficaces et moins couteuse soit au niveau politique, économique, scientifique qu'environnemental.

Ce travail est une étude numérique d'effet du variation de la richesses en régime pauvre et l'ajout d'hydrogène avec des taux de 10% et 20% pour un bruleur à faible nombres de swirl (LSB) dans des conditions atmosphériques standards STP d'une flamme prémélangée de mélanges combustibles **méthane/air**.

Ce type de flammes a attiré l'attention depuis qu'il a été développé par RK Cheng en 1995.

La technologie de flamme prémélangée stabilisée par faible nombre de swirl est largement utilisé dans nombreuses applications telles que les turbines a gaz, les moteurs a combustion internes, les fours industriels et les chaudières. Elles peuvent fonctionnait dans des conditions des richesses près de la limite de soufflage LBO. A l'heure actuelle cette technologie a devenus une option important pour le contrôle des émissions de NOx, elles sont environ 60% inferieur a ceux de grand nombre de swirl.

Les écoulements turbulents swirlés réactif ou non réactif sont largement utilisés dans les applications industrielles. Dans les brûleurs, on les emploie pour augmenter la qualité du mélange combustible-air, stabiliser la flamme tout en réduisant sa longueur et réduire la formation de NOx.

Les carburants à base d'hydrocarbures conventionnels mélangés à de l'hydrogène sont une solution prometteuse vers une transition énergétique des unités de génération de puissance, car l'ajout d'hydrogène réduit les émissions carbonées. Il apporte de nouvelles contraintes au

niveau de la combustion, car sa vitesse de propagation est rapide et sa plage d'inflammabilité est grande.

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres, il est organisé comme suit :

- ❖ Le premier chapitre fait l'objet d'une présentation générale sur la combustion et les brûleurs ainsi que des recherches bibliographiques et quelques méthodes pour améliorer le brûleur LSB.
- ❖ Le second chapitre porte une présentation et l'analyse des Formulations mathématiques et physiques considérés dans notre étude, et la modélisation de la combustion turbulente pré mélange.
- ❖ Le troisième chapitre présente d'une part la procédure de la simulation numérique, ainsi que le code de calcul utilisé Fluent version 16.0.
- ❖ Le quatrième chapitre sera consacré à la validation des différents résultats obtenus suivis par des interprétations et discussions.
- ❖ On termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I
Généralités sur la
combustion et revue
bibliographique

Introduction

L'objectif de ce chapitre consiste à faire un rappel des généralités sur la combustion, puis une revue bibliographique qui rassemble les travaux expérimentaux et numériques des flammes turbulentes pré-mélangées suspendue de méthane/air stabilisées par la configuration à faible nombre du swirl LSB.

I.1 Généralités sur la combustion

I.1.1 La combustion

Le feu est la manifestation visible de la combinaison d'un corps combustible (perd un ou plusieurs électrons), avec un corps comburant (gagne un ou plusieurs électrons) en présence d'une énergie d'activation. [1]

Elle est aussi une réaction globalement exothermique (dégagement de la chaleur), au début lente mais pouvant devenir ensuite rapide, avec émission des rayonnements et élévation de température qui peut se traduire par dégagement de chaleur elle se produit dans un système <ouvert> ou dans un système <ferme>, c'est à dire avec ou sans échange avec le milieu extérieure. [3]



I.1.2 Triangle de feu

Pour qu'il y ait **combustion**, il faut qu'il y ait une association de 3 facteurs que sont **le combustible, le comburant, et l'énergie d'activation**.

Une combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments que l'on nomme de façon symbolique le triangle de feu (figure I.1). [4]

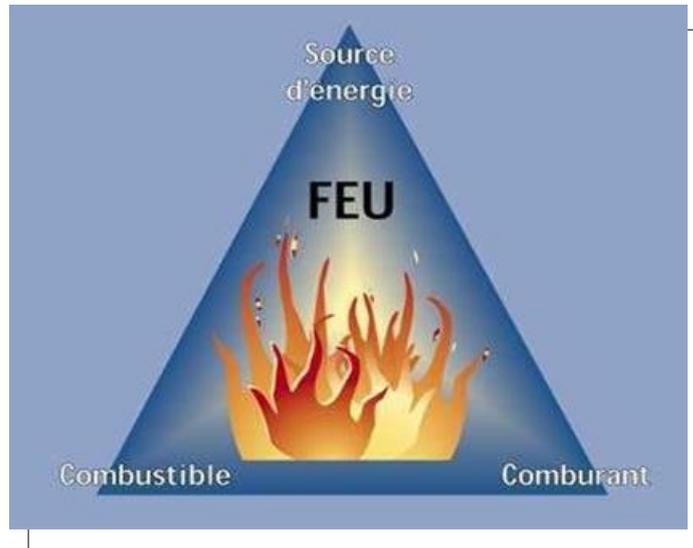


Fig. I.1 triangle du feu. [1]

1. Un combustible (réducteur) : c'est une substance qui peut brûler en présence d'un Comburant, est souvent un produit organique, c'est-à-dire composé principalement de carbone et d'hydrogène.

Dans notre étude on utilise comme Combustible le méthane CH_4 . [4]

Et aussi il peut être :

- ❖ un gaz (méthane, butane, gaz de ville, hydrogène...).
- ❖ un liquide (essence, gasoil, huile, kérosène ...).
- ❖ un solide (bois, papier, carton, tissu, plastique...).
- ❖ un métal (fer, aluminium, sodium, magnésium etc.) ;
- ❖ une huile de cuisson. [5]

2. Un comburant (oxydant) : généralement l'air se compose principalement de l'oxygène et l'azote.

I.1.3 Caractéristiques de la combustion

1-Combustion complète

Lors d'une combustion complète, le réactif réagira avec le comburant jusqu'à former des produits qui ne pourront plus être oxydés, c'est-à-dire que ces produits ne peuvent plus réagir avec le comburant. Dans le cas d'un hydrocarbure réagissant avec le dioxygène, les produits de combustion sont le dioxyde de carbone et de l'eau. Une combustion complète permet d'obtenir la quantité maximale d'énergie disponible par une substance et cette énergie est définie comme étant le pouvoir calorifique. [2]

2-Combustion incomplète

La combustion incomplète a lieu quand il n'y a pas assez de comburant pour permettre la réaction complète du combustible ou lorsque le temps de contact à une température rendant la combustion possible est trop faible. Elle produit donc des résidus de combustion, sous forme de cendres qui génèrent des fumées, dont certains composés sont très toxiques pour l'homme et pour l'environnement tel que le monoxyde de carbone (gaz mortel), des particules de carbone pur (suie, goudron...), des oxydes d'azote, des hydrocarbures. [2]

I.1.4 Classification des flammes

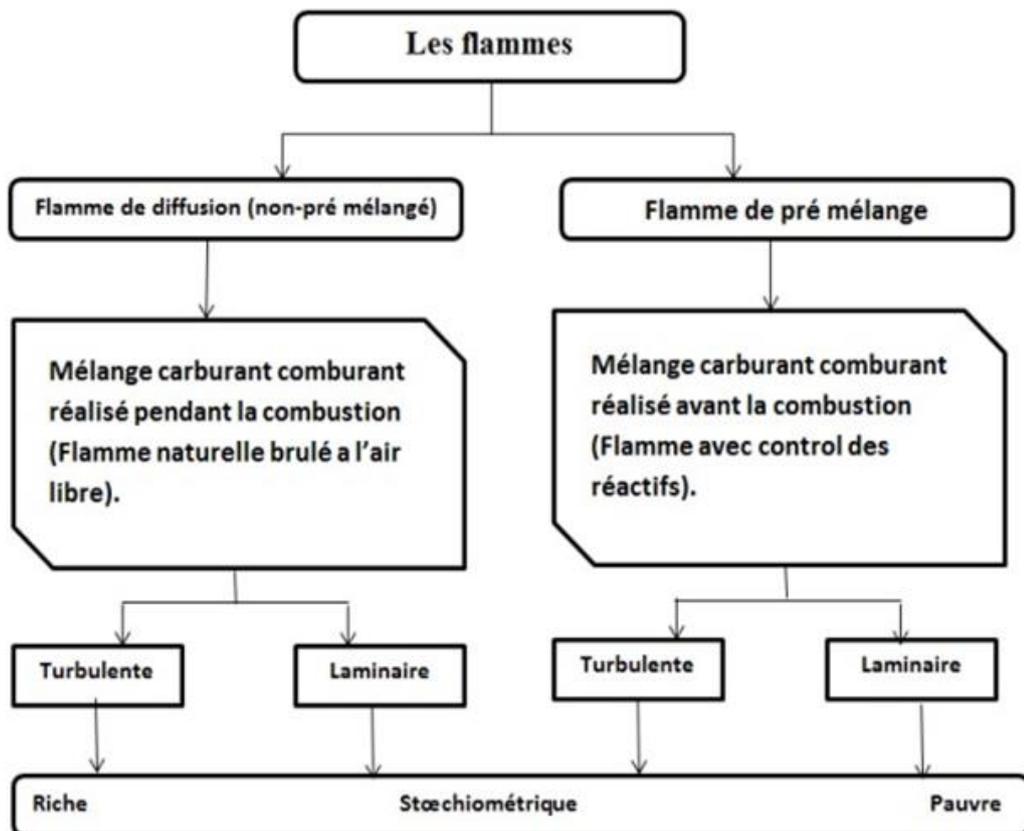


Fig. I.2 Classification des flammes selon leur type d'écoulement<14>

I.1.5 Avantages et inconvénients des modes de combustion

Mode de combustion	Avantages	Inconvénients
Pré mélangé	Peu polluant (En régime pauvre)	Instabilités de combustion, stockage du mélange
Non Pré mélangé	Stabilité de la flamme, Stockage du carburant en dehors des limites d'inflammabilité	Production d'oxydes d'azote
Partiellement Pré mélangé	Peu polluant (En régime pauvre), Stockage du carburant en dehors des limites d'inflammabilité	Instabilités de combustion

Tableau 1.1 Avantages et inconvénients des modes de combustion. [6]

I.1.6 Propriétés du méthane

- ❖ Le méthane est inodore, incolore ;
- ❖ La densité du méthane est d'environ la moitié de celle de l'air (et c'est pourquoi le méthane a tendance à monter) ;
- ❖ Le méthane a une très faible solubilité dans l'eau ;
- ❖ La combustion du méthane produit une flamme bleue et une grande quantité de chaleur. (2)

I.1.7 Applications industrielles de la combustion du méthane

- ❖ Moteurs à combustion interne.
- ❖ Turbine à gaz.
- ❖ Chaudières industrielles et domestiques.
- ❖ Statoréacteur, turboréacteur.

La conversion d'énergie chimique potentielle en énergie thermique, mécanique, rayonnante, électrique utilisée, directement ou indirectement, pour le chauffage, la propulsion, la production d'électricité. [2]

I.1.8 Pouvoir calorifique

1-Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)

Quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée.

2-Le pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur non récupérée ».

La différence entre le PCI et le PCS est la chaleur latente de vaporisation de l'eau (L_V), qui vaut environ $2\,250\text{ kJ kg}^{-1}$ (valeur dépendant de la pression et de la température), multipliée par la masse de vapeur produite (m). [7]

On a la relation : $\text{PCS} = \text{PCI} + m \cdot l_v$.

I.1.9 Les Brûleurs

I.1.9.1 Définition de Brûleur

Le brûleur est un élément mécanique constitué de plusieurs pièces assurant la combustion d'un carburant avec un comburant généralement de l'air afin de convertir l'énergie chimique contenue dans le combustible en énergie thermique. Le mélange (carburant/comburant) nécessite le meilleur réglage pour que le rendement de combustion soit maximum et que la combustion soit la meilleure possible, c'est-à-dire générant le moins possible d'imbrûlés et de polluants. [3]

I.1.9.2 Les composants d'un brûleur

- ❖ Le plénum est utilisé pour homogénéiser les flux du gaz entrants afin de les distribuer uniformément à la sortie du brûleur.
- ❖ Le bloc est un composant important aide à façonner la flamme et protéger les pièces internes contre la surchauffe.
- ❖ Le système d'allumage est un composant important du système du brûleur pour assurer une étincelle d'allumage de la flamme principale. [1]
- ❖ L'analyseur de flamme ou le détecteur de flamme qui est un système de sécurité pour s'assurer que le brûleur ou la veilleuse fonctionne. Ils sont connectés au système

d'alimentation en carburant de sorte que le débit de carburant sera arrêté si la flamme s'éteint afin d'éviter une éventuelle explosion pour les gaz combustibles non allumés entrant en contact avec une surface chaude.

❖ La figure suivante est un schéma avec les différents composants d'un brûleur :

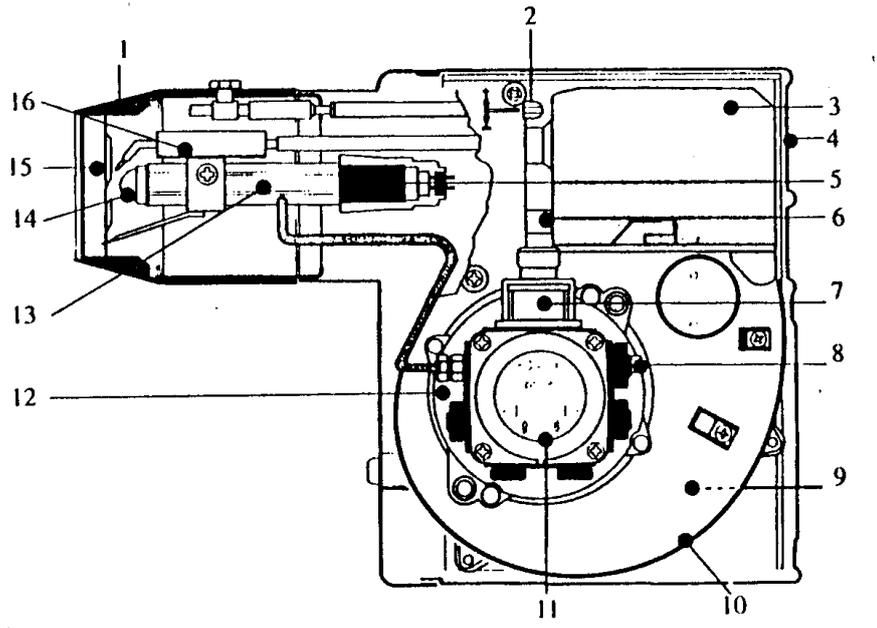


Fig. I.3 Schéma du brûleur

Le tableau suivant montre les différentes composantes d'un brûleur

Numéro	Nom	Numéro	Nom
1	Tête de combustion	9	Volet d'air
2	Réglage tête de combustion	10	Ventilateur
3	Boîtier de contrôle	11	Pompe
4	Capot	12	Moteur
5	Réchauffeur	13	Ligne de gicleur
6	Cellule	14	Gicleur
7	Electrovanne	15	Accroche flamme
8	Régulateur pression	16	Electrodes d'allumage

Tableau 1.2 Les composants du brûleur.

I.1.9.3 Classification des brûleurs

La classification des brûleurs n'est pas unique ; en fait, il y a beaucoup de critères de classification, tels que le potentiel, la structure, le type de combustible utilisé, qui peut être solide (par exemple charbon, éventuellement pulvérisé), un liquide (par exemple, naphte, éthanol, diesel, kérosène) Ou gazeux (par exemple, méthane). Et aussi selon le type d'écoulement qui est peut être laminaire, turbulent.

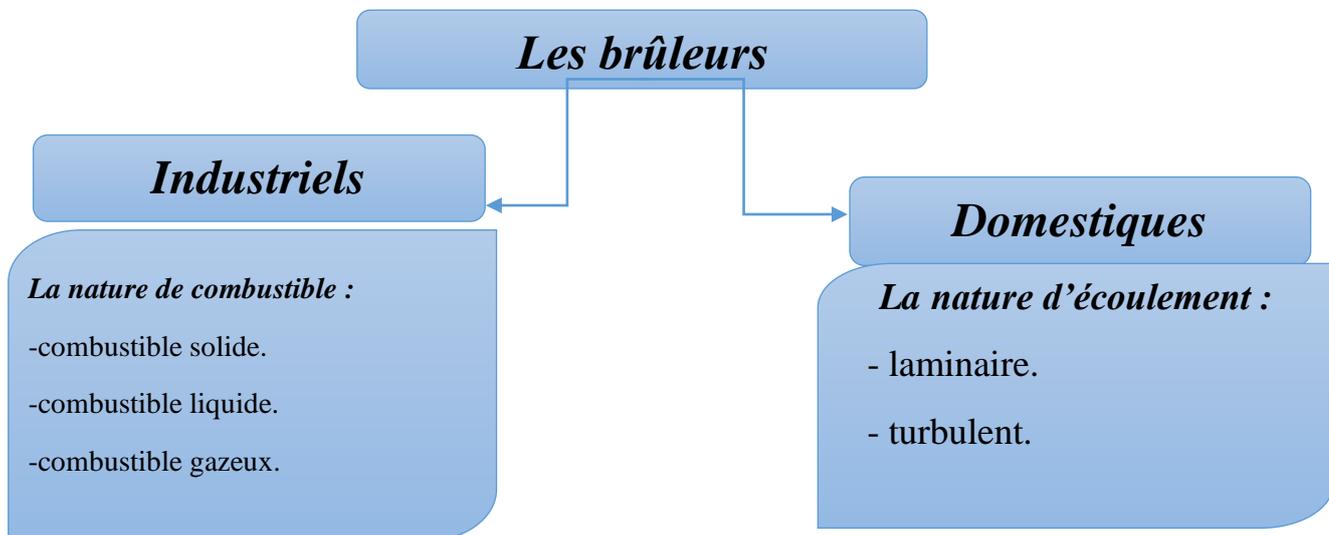


Fig. I.4 Organigramme sur les classifications de brûleur.

I.2 Ecoulement swirlé

Le swirl crée un écoulement hélicoïdal qui produit une dépression au centre de l'écoulement. Lorsque l'angle des pales du swirl est élevé, la dépression au centre devient suffisamment importante pour inverser le sens de l'écoulement. La taille et la forme de la recirculation interne (ZRI) dépend principalement du nombre adimensionnel "S" (nombre de swirl). La recirculation dépend aussi fortement de l'angle du divergent à l'entrée de la chambre de combustion et d'autres facteurs tels que la présence ou non : d'un bluff body, d'un confinement ou de la combustion. Un changement même faible de ces paramètres peut modifier fortement l'écoulement. L'apparition de la recirculation s'effectue en général pour un nombre de swirl d'environ 0.6 mais ce nombre peut être inférieur selon les conditions expérimentales.

I.2.1 Définition du nombre de swirl « S »

Les caractéristiques de l'écoulement « Swirlé », se base initialement sur deux grandeurs :

La première, est le nombre de Reynolds (Re) adimensionnel connue en, Mécanique de fluide qui exprime l'importance relative des forces d'inertie et de viscosité .il est définie par la relation suivante :

$$Re = \frac{\rho v x}{\mu}$$

Le deuxième est le nombre adimensionnel S qui correspond au flux de quantité de mouvement tangentielle divisé par le flux de quantité de mouvement axial. [8] [9].

$$S = \frac{G_{\varphi}}{RG_x}$$

Avec :

$$G_{\varphi} = \int_0^R 2\pi\rho r^2 U W dr$$

$$G_x = \int_0^R 2\pi\rho r U^2 dr$$

G_x : représente le flux de quantité de mouvement axiale.

G_{φ} : représente le flux de quantité de mouvement tangentielle.

D : est une longueur caractéristique (m), dans notre cas il s'agirait du diamètre de la sortie de la buse du bruleur.

U : représente la vitesse axiale (m/s).

Dans le cas d'un bruleur LSB, **R.K Cheng** propose l'expression suivante :

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

Avec

$$m = \frac{m_c}{m_s} = \frac{U_c \pi R_c^2}{U_s \pi (R_i^2 - R_c^2)}$$

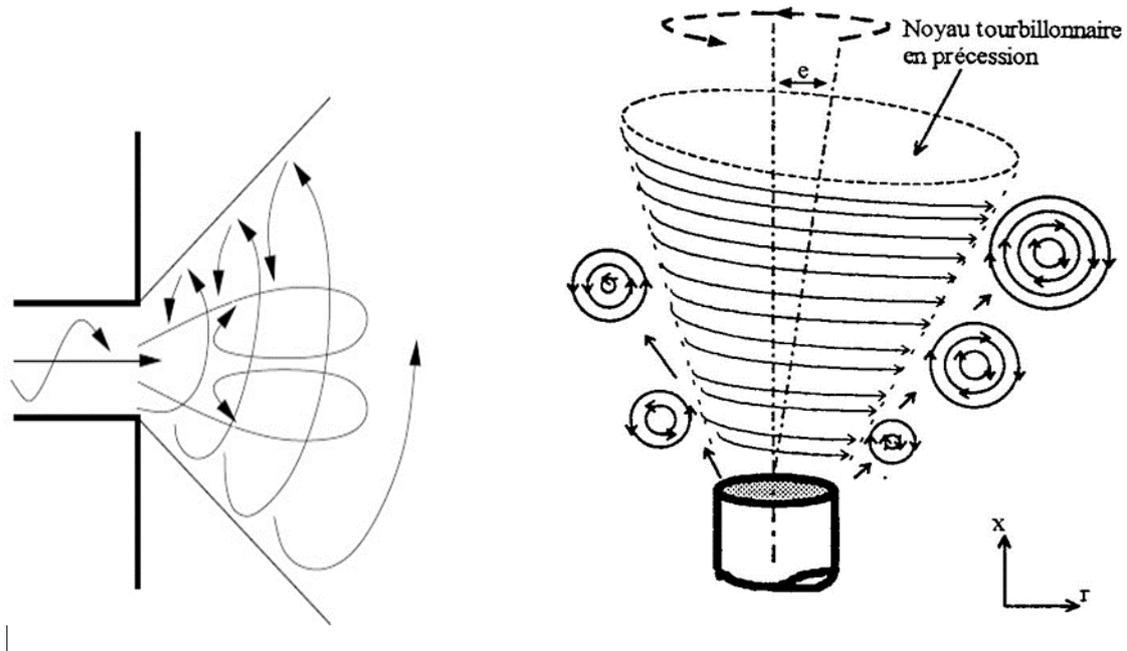


Fig. I.5 Représentation d'un écoulement à Swirl. [10]

I.2.2 La classification des écoulements swirlés

Nous pouvons décrire les écoulements swirlés en séparant en trois catégories :

- ❖ Écoulement faiblement swirlés type A « $S < 0.6$ ».
- ❖ Écoulement fortement swirlés double hélice type B ($0.6 < S < 1.3$).
- ❖ Écoulement fortement swirlé type C ($S > 1.3$)

❖ Écoulement faiblement swirlés type A : « $S < 0.6$ »

Pour des écoulements à faible nombre de swirl, il n'apparaît aucune zone de recirculation. Le swirl induit une augmentation de l'entraînement du fluide ambiant au repos et une diminution de la vitesse axiale de l'écoulement. Les profils de vitesse d'un écoulement faiblement swirlé restent gaussiens jus qu'à environ $S < 0.5$.

❖ Écoulement fortement swirlés double hélice type B ($0.6 < S < 1.3$)

A partir de $S=0.6$ environ, les gradients de pressions longitudinaux ne sont plus suffisants pour compenser l'énergie cinétique des particules fluides si bien qu'apparaît une zone de recirculation toroïdale dans l'écoulement. Une des caractéristiques importantes de cette zone de recirculation est que son centre se rapproche du nez de la buse (ou de l'injecteur principal) et que sa taille augmente quand le nombre de swirl de l'écoulement augmente.

❖ **Ecoulement fortement swirlé type C : ($S > 1.3$) :**

Enfin, pour $S > 1.3$ l'éclatement tourbillonnaire apparaît et la réorientation de la vorticité dans le cœur du jet génère un profil de sillage le long du cône. [11]

I.3 Revue bibliographie

La recherche bibliographies sera mentionnée conformément dans un ordre chronologique.

Plusieurs travaux s'intéressent aux brûleurs à faible swirl, l'idée des flammes stabilisées par la technologie LSB a été inventée par **Chan C.K** en 1992. Poursuivant l'effort de développement du LSB de travail précédent, en 1995, des tests supplémentaires ont été effectués par **Cheng et al**, ils ont effectué des travaux sur les études de flammes turbulentes prémélangées stabilisées par un faible nombre de tourbillons. Plus important leurs résultats ont été le point de départ de nombreuses études sur les méthodes de stabilisation de la flamme et la réduction des polluants (NO_x), et le brûleur à faible tourbillon (LSB) a été un élément clé de l'évolution de la technologie. [12] [13]

En 2000 **Zimont V.L** a élaboré une étude de simulation numérique sur la classe spéciale des flammes pré mélangées turbulentes appelées la propagation de flammes intermédiaires stables ISP (Intermediate steady propagation flammes). Ces flammes sont largement répandues dans les chambres de combustions industrielles qui opèrent avec des flammes pré mélangées à forte intensité turbulente. Il a trouvé que les pulsations de vitesses sont sensiblement plus importantes que la vitesse de combustion qui est caractérisée par une vitesse de combustion turbulente pratiquement constante. Et que cette dernière est contrôlée par la turbulence, la chimie, les processus moléculaires et par l'augmentation de la largeur de flammes contrôlées par la diffusion de la turbulence. [14]

En 2009 **Nogenmyr K.J. et al** ont comparé deux modèles différents de simulation à grands échelles LES (l'équation G-level-set basée sur la flammelet et le modèle C-Equation basé sur une chimie infiniment rapide avec un schéma de réaction réduit) avec des données expérimentales fait par diagnostic laser pour des flammes turbulente méthane-air avec une richesse de $\Phi=0.6$ et à la température ambiante et pression atmosphérique .

Leurs résultats montrent une bonne similarité des structures de flamme prédites par les deux modèles. [15]



Fig. I.6 Brûleur développé par Nogenmyr K.J. et al (2009). [13]

En 2010 **Yilmaz et al** ont fait une étude de l'effet l'addition d'hydrogène dans un brûleur a faible nombre de swirl en examinant le comportement de la flamme et sa stabilité .les résultats montrent que les caractéristiques de la combustion sont très sensible à la fraction d'hydrogène dans le mélange combustible améliorant la stabilité de la flamme. [16]

En 2012 **M. Emadi et al** ont mené une étude expérimentale sur la combustion pré mélangée en mélange pauvre du méthane et du méthane-hydrogène (0%, 20% et 40% d'hydrogène par volume) dans un brûleur LSB à plusieurs pressions dans une chambre de combustion. La pression varie des conditions atmosphériques à 3 atm. L'objectif de cette expérience est d'étudier les effets de l'ajout d'hydrogène sur les flammes pré mélangées. [17]

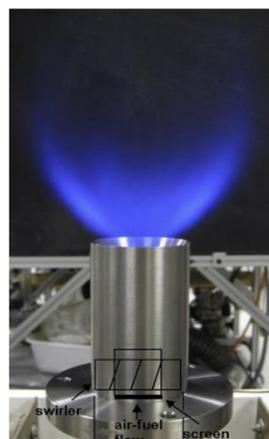


Fig. I.7 Brûleur à faible tourbillon.

Tidswell M. et Muppala S.P.R (2014) [18]

Cette étude a évalué la validité des modèle de vitesse de flamme turbulente disponibles dans FLUENT appliqués à la combustion hydrogène/méthane/air, avec 5 compositions de carburant différentes considérées de 0 à 100 % hydrogène. En conséquence, des tentatives ont été faites pour améliorer les résultats en réglant la constante de vitesse de flamme turbulente de Zimont lorsque le pourcentage de l'hydrogène est supérieur à 60 %, mais cela a produit une amélioration minimale des résultats.

En 2016 **S. Ouali et al** 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 $k-\varepsilon$ STANDARD pour la modélisation de la turbulence et deux modèles pour la modélisation de la combustion ; EDM (Eddy Dissipation Model) et Partially-Premixed. [19] L'intérêt de leurs études est l'optimisation de température et le nombre de swirl tout en assurant la stabilité avec le minimum d'émissions de NOx et de CO.

En 2019 **Weijie Liu et al** 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 là 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. Par conclusion, le réseau de swirl n'exerce qu'une influence minimale 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. [18]

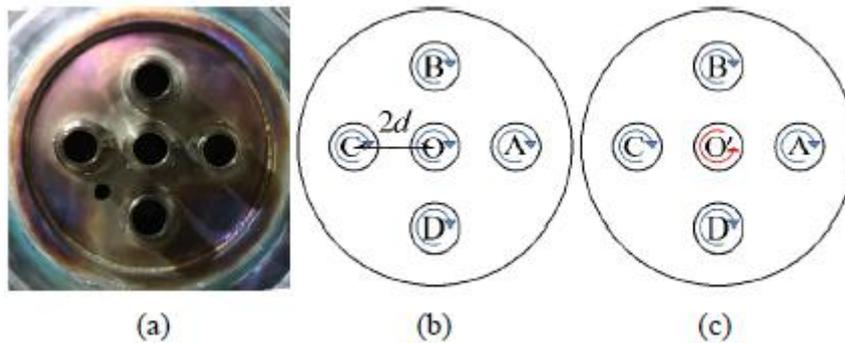


Fig1.8 Brûleur multi-becs avec différentes configurations : (b) co-swirling et (c) contre-swirling de Weijie Liu et al (2019). [20]

En 2020 **Dmitry pashchenko** a fait une modélisation CFD avec une validation expérimentale de la combustion des flammes swirlees de mélange pauvre .le modèle de combustion qu'il a utilisé est le modèle premixed combustion avec PDF et le modèle de turbulence le modèle k- ϵ RNG. L'écart entre les résultats et la modalisation CFD est d'environ 3% pour la température et de moins de 7% pour les émissions. [21]

En 2020 **Shilong Guo, et al** ont étudié l'effet de l'enrichissement en hydrogène sur des flammes pré mélangées stabilisées par le brûleur LSB à la limite du LBO. Ils ont procédé à une simulation LES (Large Eddy Simulation) avec une méthode qui simule le modèle Premixed et partially premixed. [22]

En 2021 Xin Liu et al ont investiguée expérimentalement la PIV et l'OH-PLIF les flammes pré mélanges de méthane/air, enrichis en hydrogène (25 % et 50 % d'hydrogène par volume), dans une chambre de combustion modèle de turbine à gaz, dans des conditions atmosphériques, à différentes nombre de Reynolds et ϕ . les résultats montre que la transition de la forme de la flamme M à la forme V, s'est produite a certain ϕ uniquement pour le cas enrichis en H₂. [23]

En 2022 **Mohamed ELBAYOUMI** a étudiée numériquement l'effet de l'ajout d'hydrogène au méthane et de l'intensité de l'écoulement turbulent swirl, dans des conditions de mélange pauvre et stœchiométrique. Une large plage d'ajout d'hydrogène (jusqu'à 90%) est utilisée pour différents niveaux d'intensité de swirl. les résultats démontrent que l'ajout d'hydrogène au méthane semble offrir une solution viable vers un carburant sans carbone. [24]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous décrivons les concepts généraux de la combustion et des brûleurs, puis nous présentons le brûleur LSB (faible nombre de swirl), le chapitre a été terminé par une revue bibliographique des brûleurs swirlés.

Chapitre II

Equations de modélisations

Introduction

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les équations qui modélisent les problèmes traités dans ce mémoire. Ces équations mettent en évidence le comportement des fluides en combustion turbulente prémélangée.

Dans le cadre de la mécanique des fluides, les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie constituent le système des équations de Navier-Stokes.

II.1 Formulation mathématique

Plusieurs simplifications ont été prises en considération pour la modélisation de la combustion turbulente pré-mélangée méthane-air dans un brûleur LSB.

- ❖ Le phénomène étudié est considéré permanent.
- ❖ Les forces gravitationnelles ont été négligées.
- ❖ L'écoulement est considéré incompressible avec des propriétés physiques constantes.

La formulation mathématique de l'état d'un fluide incompressible newtonien (méthane-air), repose sur les équations liant les différents paramètres de la combustion dans un système de coordonnées cartésien. Les équations régissant le phénomène avec les simplifications nécessaires sont obtenues à partir de :

- la loi de conservation de la masse (continuité).
- la loi de conservation de la quantité de mouvement.
- la loi de conservation de l'énergie.
- la loi de conservation des espèces chimiques.

II.1.1 Equation de continuité

Le phénomène étudié ne produit pas de masse, donc l'équation de conservation de la masse totale dans notre cas et l'équation de conservation de la masse du flux froid. La variation temporelle de la masse dans le volume de contrôle fixé dans un espace clos est égale à la somme de la masse transmise sur la frontière du domaine et de la masse extraite ou ajoutée dans le volume de contrôle par unité de temps. L'équation de continuité décrit, sous sa forme différentielle, la variation locale de densité ρ due au flux de densité de la surface contrôlé par le volume :

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (2.2)$$

Où ρ est la masse volumique du fluide et u_i la composante de vitesse suivant la direction i .

Sachant que dans notre problème, on analyse plusieurs espèces chimiques, donc l'équation 2.2 devient comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho(u_i + V_{k,i})Y_k) = \dot{\omega}_k \dots\dots\dots(2.3)$$

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

La vitesse de diffusion $V_{k,i}$ est donnée par la loi de Fick comme suit :

$$V_{k,i} = -D_k \frac{1}{Y_k} \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \dots\dots\dots (2.4)$$

Avec : $k = 1, \dots, N_k$ et D_k est le coefficient de diffusion de l'espèce k dans le mélange .

II.1.2 Equations de la conservation de la quantité de mouvement

L'équation de conservation de la quantité de mouvement générale s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k F_{k,j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k F_{k,j} \dots\dots\dots (2.5)$$

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

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

Le tenseur σ_{ij} est la combinaison de la pression et du tenseur visqueux :

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - P \delta_{ij} = -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - P \delta_{ij} \dots\dots\dots (2.7)$$

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

II.1.3 Equation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation d'énergie du flux de réaction peut être exprimée par la formule d'enthalpie générale suivante:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h_s) = \dot{\omega}_T + \dot{Q} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k} \right) \dots\dots (2.8)$$

Le terme de diffusion de chaleur est donné par la loi de Fourier : $(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i})$.

h_s Est l'enthalpie sensible,

$V_{k,i}$ Est la vitesse de diffusion de l'espèce k dans la direction

i et \dot{Q} représente une source de chaleur additive (=0 dans notre cas).

$\dot{\omega}_T$ Est le dégagement de chaleur du à la réaction chimique (combustion) donné par :

$$\dot{\omega}_T = - \sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^0 \dot{\omega}_k \dots \dots \dots (2.9)$$

II.1.4 Equation de conservation des espèces chimiques

La combustion provoque l'apparition et la disparition de produits chimiques. Dans le cas étudié, la combustion de l'air méthane réduit les fractions massiques de CH4, O2 et N2, et fait apparaître des produits de combustion. L'équation qui prend en compte ces changements est la suivante :

$$\frac{\partial \rho u_j Y_k}{\partial x_j} = - \frac{\partial \mathcal{R}_j^k}{\partial x_j} + \dot{\omega}_k \dots \dots \dots (2.10)$$

\mathcal{R}_j^k est le flux de diffusivité moléculaire.

Ces substances sont caractérisées par leur fraction massique Y_k , $k = 1$ à N ,

Où N est le nombre de substances dans le mélange réactionnel. Ce dernier est défini comme:

$$Y_k = \frac{m_k}{m} \dots \dots \dots (2.1)$$

Où m_k est la masse de l'espèce k présente dans un volume donné V et m la masse totale du gaz dans le volume V .

La pression totale d'un mélange gazeux est défini par la somme des pressions partielles :

$$P = \sum_{k=1}^N P_k \dots \dots \dots (2.11)$$

$$P_k = \rho_k \frac{R}{W_k} T \dots \dots \dots (2.12)$$

La constante universelle des gaz parfaits est $R=8.3143 \text{ J / (mol.K)}$.

La densité ρ , qui a été prise en considération dans les équations de conservations précédentes est une somme des ρ_k de chaque espèce chimique analysée, donc la densité pour un mélange multi espèces est donnée par :

$$\rho = \sum_{k=1}^N \rho_k \dots\dots\dots (2.13)$$

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

$$P = \rho \frac{R}{W} T \dots\dots\dots (2.14)$$

Cette équation ferme le système adéquation de Navier-Stokes.

Où T est la température,

R la constante des gaz parfaits,

$\rho_k = \rho Y_k$ et W_k sont respectivement la densité et la masse moléculaire de l'espèce k. Pour le mélange réactif étudié, la masse moléculaire moyenne du mélange W donné par :

$$\frac{1}{W} = \sum_{k=1}^N \frac{Y_k}{W_k} \dots\dots\dots (2.15)$$

La chaleur spécifique à pression constante C_p est donnée par :

$$C_p = \sum_{k=1}^N C_{pk} Y_k \dots\dots\dots (2.16)$$

Où C_{pk} est la chaleur spécifique de l'espèce k à pression constante, elle est donné par :

$$C_{pk} = 2.5 \frac{R}{W_k} \dots\dots\dots (2.17)$$

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

$$C_v = C_p - r \dots\dots\dots (2.18)$$

r Est la constante du gaz définit par :

$$r = \frac{R}{W} = R \sum_{k=1}^N \frac{Y_k}{W_k} \dots\dots\dots (2.19)$$

La relation entre la composition des réactifs et celle des produits formés à l'issue de la combustion stœchiométrique dans le cas générale est :



La richesse du mélange réactif est défini par le paramètre ϕ correspondant au rapport massique carburant-air réel relatif au rapport stœchiométrique, et cette équation est comme suit :

$$\phi = \left(\frac{y_f}{y_o}\right) / \left(\frac{y_f}{y_o}\right)_{st} \dots\dots\dots (2.20)$$

Où Y_f et Y_o désignent respectivement les fractions massiques du fuel (CH_4) et de l'oxydant (O_2+N_2). L'indice st réfère à l'état stœchiométrique ($\phi=1$).

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

$\Phi > 1$: Mélange riche.

$\Phi = 1$: Mélange stœchiométrique.

$\Phi < 1$: Mélange pauvre. [25]

II.2 Modélisation de la turbulence

Dans un écoulement turbulent, les particules par fluides bougent de façon aléatoire le long de trajectoires irrégulières. Le fort mouvement chaotique provoque le mélange intensif des couches de fluide. A cause de l'augmentation de l'échange de quantité de mouvement et d'énergie entre les molécules et les parois solides, les écoulements turbulents donnent dans les mêmes conditions, des échanges de chaleur et des frottements pariétaux plus importants comparés aux écoulements laminaires.

Bien que les fluctuations soient chaotiques, les variables de l'écoulement sont de nature déterminante. La simulation numérique des écoulements turbulents continue toujours à rencontrer des problèmes significatifs. Malgré les performances des supercalculateurs modernes, la résolution directe des équations instationnaires de Navier-Stokes (où DNS : Direct Numerical Simulation) n'est applicable que pour des cas relativement simples à bas nombres de Reynolds. Par conséquent, l'approximation de la turbulence reste la seule issue. Pour cela, une large gamme de modèles de turbulence est développée et l'effort continue jusqu'à ce jour. Il existe cinq classes principales des modèles de turbulence : modèle algébrique, à une équation, à plusieurs équations, fermeture du second ordre (RSM Reynolds Stress Models) et simulation des grandes échelles LES (Large Eddy Simulation). [26]

Un aperçu des classes de modèles de turbulence est montré par la figure

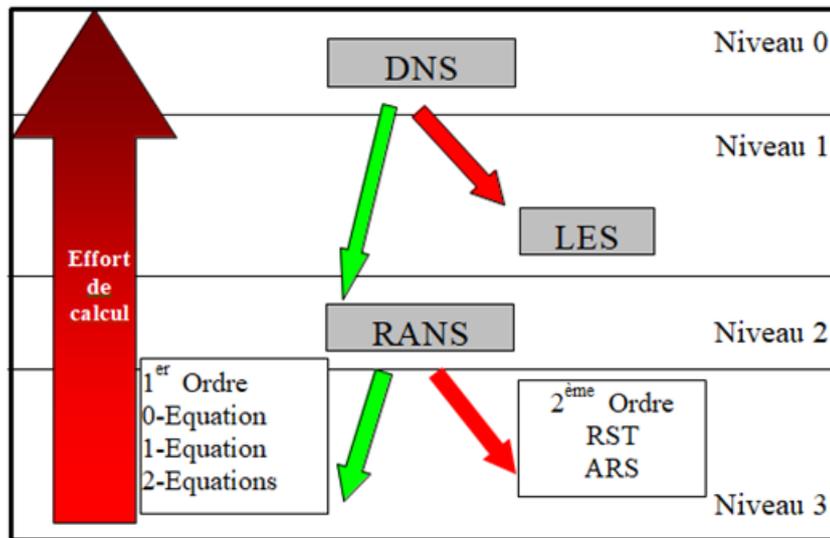


Fig. II.1 Aperçu sur les différents modèles de turbulence. [27]

II.2.1 La méthode moyennée de Reynolds (RANS)

Pour étudier les mouvements des fluides, l'approche aux équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) est la plus répandue parmi les méthodes de simulation dans le secteur industriel, car cette méthode présente un temps de calcul plus court que les méthodes LES et DNS, et n'a pas besoin de recourir à des maillages extrêmement fins. Cependant, de plus, la méthode RANS s'appuie principalement sur ce qu'on appelle la décomposition de Reynolds, qui consiste, pour une grandeur f , à la décomposer de la façon suivante : $f = \bar{f} + f'$, avec \bar{f} la valeur moyenne, dite moyenne de Reynolds et f' qui représente les fluctuations, c'est-à-dire l'écart par rapport à la moyenne.

La méthode RANS va utiliser cette décomposition pour toutes les variables de l'équation de Navier-Stokes (u, p, T). Ainsi, quand un écoulement devient turbulent, les équations de Navier-Stokes, même si elles sont toujours valables, ne sont plus utilisables car il devient trop compliqué de suivre tous les détails de cet écoulement. La décomposition de Reynolds permet alors de simplifier les équations de Navier-Stokes pour donner les équations de Navier-Stokes moyennées, qui prennent en compte la moyenne de Reynolds (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)).

Pour un fluide newtonien incompressible en écoulement stationnaire, les équations de Navier-Stokes moyennées en coordonnées cartésiennes sont :

$$\rho \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = \rho \overline{f_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [-\overline{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j}].$$

On peut remplacer la viscosité μ par le tenseur des contraintes σ_{ij} , ce qui donne l'équation de Reynolds :

$$\rho \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \sum_j \overline{u_j} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) \right) = \rho \overline{g_i} + \sum_j \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \right) (\sigma_{i,j} - \rho \overline{u'_i u'_j})$$

avec $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ le tenseur de Reynolds. La principale différence entre l'équation de Reynolds et les équations de Navier-Stokes moyennées est donc l'utilisation du tenseur des contraintes σ_{ij} au lieu de la viscosité μ pour les équations moyennées. Le tenseur des

$$\sigma_{ij} = -\overline{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right)$$

avec $\delta_{ij} = 1$ si $i = j$ et 0 sinon.

Les deux grandes catégories de modèles de turbulence utilisés par la méthode RANS sont :

- ❖ Les modèles du premier ordre basés sur l'hypothèse de Boussinesq, qui consiste à modéliser directement les tensions de Reynolds à l'aide d'une viscosité turbulente :

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) = -\rho \overline{u'_i u'_j},$$

- ❖ Les modèles du second ordre dans lesquels les tensions de Reynolds sont directement calculées.

Les modèles du premier ordre sont appelés modèles à viscosité turbulente. Ils traitent de la dissipation de l'énergie cinétique et se concentrent sur l'énergie dissipée à un niveau physiquement correct. Dans les modèles à viscosité turbulente, on néglige les petites cellules de la maille tout en considérant qu'elles sont toujours présentes lors de la modélisation, ce qui

permet de ne pas avoir à les simuler. A noter qu'il existe plus de 200 modèles de ce type, qui sont classés en fonction du nombre d'équations de transport résolues en plus des équations de RANS : modèles à une équation (modèle de Prandtl, modèle de Baldwin-Barth, modèle de Spalart-Allmaras...), modèles à deux équations (modèle k-, modèle k- ω , modèle SST...).

Les modèles du second ordre sont appelés modèles de transport de la contrainte de

Reynolds. Ils résolvent les équations de transport des tensions de Reynolds $\overline{u_i' u_j'}$ et des flux de chaleur turbulents $\overline{u_i' T'}$, qui sont longues et compliquées à résoudre. Ces modèles du second ordre sont en effet plus compliqués à mettre en œuvre que les modèles du premier ordre. Effectivement, ils sont recommandés pour les écoulements turbulents complexes en 3D et réclament beaucoup de ressources.

II.2.1.1 Le modèle de fermetures du premier ordre RANS k- ϵ Standard

C'est le plus utilisé des modèles de turbulence grâce à sa stabilité et sa robustesse numérique. Ce modèle permet des études cohérentes sur la plupart des écoulements industriels. Les lacunes de ce modèle pour la simulation des écoulements à proximité des parois sont palliées par l'utilisation de lois de paroi. Ce modèle est défini par l'expression :

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (\text{II.9})$$

k est l'énergie cinétique de turbulence définie par :

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (\text{II.10})$$

La viscosité turbulente μ_t s'exprime par la relation suivante, liant k au taux de dissipation de l'énergie turbulente, ϵ :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (\text{II.11})$$

Cependant, ce modèle n'est pas adapté aux écoulements avec séparation, présentant des zones avec recirculations.

II.2.1.2 Le modèle de fermetures du premier ordre RANS k-ε RNG

Le modèle k-ε RNG est dérivé du modèle k-ε Standard. Il utilise une technique mathématique appelée “Renormalization Group”. L’équation de transport pour le taux de dissipation est définie par

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (\text{II.12})$$

Le modèle RNG est plus adapté que le modèle k-epsilon standard aux écoulements avec recirculation.

II.2.1.3 Le modèle de fermetures du premier ordre RANS k-ε Réalisable

Le modèle réalisable diffère du modèle standard de deux manières importantes:

- ❖ Le modèle k-ε réalisable contient une formulation alternative pour la viscosité turbulente.
- ❖ Une équation de transport modifiée pour le taux de dissipation, ε, a été dérivée d'une équation exacte pour le transport de la fluctuation du tourbillon quadratique moyen.

Le terme «realizable» signifie que le modèle satisfait certaines contraintes mathématiques sur les contraintes de Reynolds, cohérentes avec la physique des écoulements turbulents. Ni le modèle standard ni le modèle RNG ne sont réalisables.

Les équations de transport modélisées pour k et ε dans le modèle k-ε réalisable sont :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{II.13})$$

Et

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\theta \varepsilon}} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (\text{II.14})$$

Où

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

G_k Représente la génération de l'énergie de turbulence due au gradient de vitesse ;

G_b Représente la génération de l'énergie de la turbulence due à la poussée ;

Y_M Représente la contribution de la dilatation fluctuante dans une turbulence compressible au taux de dissipation ;

C_1 et C_2 Sont des constantes ;

σ_k et σ_ε Sont les nombres de prandtl pour k et ε , respectivement ;

S_k et S_ε Sont des termes sources.

Notez que l'équation (II.13) est la même que celle du modèle k - ε standard (II.9) et du modèle k - ε RNG (II.12), à l'exception des constantes du modèle. Cependant, la forme de l'équation est assez différente de celles des modèles k - ε standard et basés sur RNG.

Ce modèle a été largement validé pour une large gamme d'écoulements, y compris des écoulements de cisaillement homogènes rotatifs, des écoulements libres comprenant des jets et des couches de mélange, des écoulements de canal et de couche limite et des écoulements séparés. Dans tous ces cas, les performances du modèle se sont avérées nettement meilleures que celles du modèle standard. Il convient de noter en particulier que le modèle k - ε réalisable résout l'anomalie du jet rond; c'est-à-dire qu'il prédit le taux d'étalement pour les jets axisymétriques ainsi que celui pour les jets plans. [28]

II.3 Modélisation de la combustion

Dans le cas d'un écoulement turbulent réactif, le phénomène se complique par l'interaction de la combustion avec la turbulence.

En turbulence classique, les équations pour les divers moments des variables dépendantes sont dérivées à partir des équations de bilan. On montre alors que ces équations ne peuvent être fermées à aucun niveau et que des hypothèses de fermeture, souvent empiriques, sont nécessaires. Ces hypothèses proposent de relier les moments d'ordre supérieur aux moments d'ordre inférieur par des relations universelles.

Il s'agit maintenant de trouver des modèles pour exprimer les taux de réaction moyens en fonction des variables connues, c'est-à-dire des valeurs moyennes elles-mêmes, et probablement aussi en fonction des caractéristiques de la turbulence, puisque celle-ci doit jouer un rôle. Pour la modélisation des écoulements réactifs, "Fluent" propose quatre modèles :

- ❖ Le modèle du taux de réaction généralisé (generalized finite-rate model).
- ❖ Le modèle PDF (conserved scalar PDF model).

- ❖ Le modèle des flammelettes (Laminar flamelet model).
- ❖ Le modèle de combustion prémélangée. (Zimont model).

Le modèle de combustion prémélangée a été développé spécifiquement pour les systèmes de combustion qui sont du type purement prémélangée. On citera le modèle dit « Eddy Break » Launder et Spalding . Ce modèle est dû aux travaux de Spalding . Ils supposent que les réactions chimiques sont infiniment rapides dès que très peu de gaz brûlé vient au contact des gaz frais et que le milieu est adiabatique. Dans ces conditions, on peut définir un "degré d'avancement de la réaction", qui ne peut prendre que les valeurs 0 (dans les gaz frais) et 1 (dans les gaz parfaitement brûlés, donc à l'équilibre chimique).

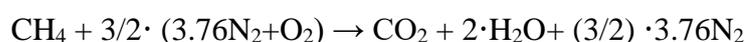
Pour la modélisation de la combustion, dans ce qui va suivre on prendra en considération le Modèle Eddy Dissipation sur lequel est basée la modélisation des taux de réaction de cette étude.

II.3.1 Modèle EDM (Eddy Dissipation Model)

La modélisation de la combustion est effectuée par le modèle EDM (Eddy dissipation Model). Ce modèle est basé sur l'hypothèse que la réaction chimique est rapide par rapport au procédé de transport dans l'écoulement. Quand les réactifs se mélangent à l'échelle moléculaire, ils forment instantanément les produits. Ce modèle suppose qu'on peut relier directement le taux de réaction au temps nécessaire pour mélanger les réactifs à l'échelle moléculaire. En écoulement turbulent, ce temps est donné par les propriétés des tourbillons, il est proportionnel au temps de mélange défini par l'énergie cinétique de turbulence k et le taux de dissipation

Bien que le modèle EDM offre de 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. [29]

Pour notre cas, le modèle EDM exploite l'équation de réaction chimique suivante ;



II.3.2 Modèle Partially Premixed

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

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

Dans ce système Partially Premixed utilisé dans notre étude, des modèles secondaires ont été exploités comme le modèle C-Equation pour le calcul de la variable de progression, le modèle Chemical equilibrium basé sur une PDF pour le couplage chimie turbulence et modèle de Zimont pour la détermination de la vitesse de flamme turbulente. [30]

II.3.2.1 Modèle C-Equation

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \bar{c}) \nabla (\rho \cdot \vec{v} \cdot \bar{c}) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{S_{c_t}} \nabla \bar{c} \right) + \rho S_c \dots \dots \dots (2.28).$$

Où :

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

S_{c_t} : Le nombre de Schmidt turbulent.

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

$$\rho S_c = \rho_u \cdot U_t \cdot |\nabla c| \dots \dots \dots (2.29).$$

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 :

$$c = \frac{\sum_k \alpha_k (Y_k - Y_k^u)}{\sum_k \alpha_k \cdot Y_k^{eq}} = \frac{Y_c}{Y_c^{eq}} \dots \dots \dots (2.30).$$

Où :

Le symbole u dénote les réactifs imbrulés.

Y_k : La k^{eme} fraction massique d'espèce.

Le : Symbole eq dénote l'état d'équilibre chimique.

α_k : Est une constante ($\alpha_k=0$ pour les réactifs, $\alpha_k=1$ pour les produits) (RANS). Ce modèle suppose que les réactions chimiques se produisent dans les structures fines.

II.3.2.1.1 Propagation du front de flamme

La propagation du front de flamme est modélisée en résolvant une équation de transport pour la variable moyenne de progression de la réaction pondérée en densité, notée par \bar{c} :

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

(II.15)

Où

Variable de progression moyenne de la réaction ;

Nombre de Schmidt turbulent ;

Terme source de progression de la réaction (S^{-1}).

La variable de progression est définie comme une somme normalisée des fractions massiques des espèces de produits ;

$$c = \frac{\sum_k \alpha_k (Y_k - Y_k^u)}{\sum_k \alpha_k Y_k^{eq}} = \frac{Y_c}{Y_c^{eq}} \dots \dots \dots (II.16)$$

Où l'exposant u indique le réactif non brûlé ;

désigne la fraction massique de l'espèce ;

l'exposant ν indique l'équilibre chimique ;

K_f sont des constantes qui sont généralement nulles pour les réactifs et l'unité pour quelques espèces de produits.

Sur la base de cette définition, c_u où le mélange est imbrûlé et c_b où le mélange est brûlé :

❖ $c_u = 0$ mélange non brûlé

❖ $c_b = 1$ mélange brûlé

La valeur de c_u est définie comme une condition aux limites à toutes les entrées de flux. Il est généralement spécifié comme 0 (non brûlé) ou 1 (brûlé).

La vitesse de réaction moyenne dans l'équation (II.15) est modélisée comme suit :

$$\rho S_c = \rho_u U_t |\nabla c| \quad (\text{II.17})$$

Où ρ_u = densité du mélange imbrûlé ;

U_t = vitesse de flamme turbulente.

II.3.2.1.2 Modèles de vitesse de flamme turbulente

La clé du modèle de combustion pré-mélangée est la prédiction de la vitesse de la flamme turbulente normale à la surface moyenne de la flamme. La vitesse de la flamme turbulente est influencée par les éléments suivants :

- ❖ Vitesse de flamme laminaire, qui est, à son tour, déterminée par la concentration du carburant, la température et les propriétés de diffusion moléculaire, ainsi que la cinétique chimique détaillée ;
- ❖ Plissement et étirement du front de flamme par de grands tourbillons et épaissement de la flamme par de petits tourbillons.

FLUENT propose deux modèles de vitesse de flamme turbulente, à savoir le modèle de fermeture de vitesse de flamme turbulente de Zimont et le modèle de vitesse de flamme de Peters.

II.3.3 Modèle d'équilibre et le modèle en fonction de densité de probabilité PDF

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

$$\bar{\Phi} = \int_0^1 \int_0^1 \phi(f, c) \cdot p(f, c) df \cdot dc \dots \dots \dots (2.31).$$

Le modèle de transport PDF proposé dans Fluent 16.0 et utilisé dans cette étude, est destiné au traitement des phénomènes à taux d'effets de cinétique chimique finie appliqué aux écoulements réactifs turbulents avec un mécanisme réactionnel approprié.

II.3.4 Modèle de Zimont

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

$$U_t = A \cdot (u')^{3/4} \cdot U_1^{1/2} \cdot \alpha^{-1/4} \cdot l_t^{1/4} \dots \dots \dots (2.32).$$

$$U_t = A \cdot u' \cdot \left(\frac{\tau_t}{\tau_c} \right)^{1/4} \dots \dots \dots (2.33).$$

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).

$\tau_c = \frac{\alpha}{U_1^2}$: Échelle de temps chimique (s).

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

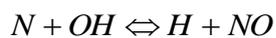
$$l_t = C_D \frac{(u')^3}{\varepsilon} \dots \dots \dots (2.34).$$

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

II.3.5 Modèle de formation des polluants NOx thermiques de Zeldovich

Pour prédire les émissions de NOx, FLUENT résout une équation de transport pour la concentration d'oxyde nitrique (NO). lorsque des sources de carburant NOx sont présents, il résout des équations de transports supplémentaires pour les espèces intermédiaires (HCN et / ou NH₃).

La formation de NOx thermiques est déterminée par un ensemble de réaction chimique fortement dépendante des températures connues sous le nom de mécanisme de **Zeldovich** étendu. Les principales réactions régissant la formation de l'azote thermique à partir de l'azote moléculaire sont les suivantes :



Une troisième réaction s'est avérée contribuer à la formation des NOx themiques, en particulier dans conditions quasi stoechiométrique et dans des mélanges riches en carburant :

Conclusion

Dans ce chapitre on a cité la formulation mathématique du probleme analysé, on a fait

Une description détaillée de la modélisation de la turbulence et de la combustion pré mélangé utilisé dans notre étude.

Chapitre III

Simulation Numérique

Introduction

Ces dernières années, la simulation numérique et essentiellement la CFD (Computational Fluid Dynamics) est devenue un outil primordial dans le procédé de conception des applications efficaces économiquement et écologiquement. Les ressources de calcul ont évolué d'une manière exponentielle dans le temps.

Actuellement, la simulation numérique de la combustion promet des résultats rapides et peu coûteux pour guider le procédé de la conception. Les applications techniques basées sur la combustion font intervenir la simulation numérique pour prédire les champs dynamiques de l'écoulement, les quantités de chaleur dégagées et les gaz produits. Ces informations sont très intéressantes pour l'optimisation de ces applications.

Dans ce chapitre on détaille les méthodes et les moyennes de simulation numérique et le domaine de modélisation ; cette partie permet d'introduire le travail de simulation des flammes prémélangées turbulentes de méthane-air stabilisé par swirl réalisé à l'aide du logiciel ANSYS Fluent.

III.1 l'outil CFD

La **CFD (Computational Fluid Dynamics)** est simplement le calcul numérique appliqué à la mécanique des fluides. Cela consiste à résoudre dans une géométrie donnée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, que l'on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique ou de réaction chimique. Historiquement, la CFD a commencé à se développer en génie mécanique, pour étudier les écoulements autour d'un objet afin de mieux le profiler (ailes d'avions, automobiles). Dans le domaine du génie chimique, les problèmes sont, en général, beaucoup plus complexes de par, en particulier, le caractère multiphasique des écoulements, les réactions chimiques et le comportement rhéologique des fluides.

III.2 Méthode des volumes finis et discrétisation

La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes de contrôles autour de points de maillage. Il s'agit donc de réduire le domaine de calcul à un ensemble de volumes de contrôles autour de points de maille.

En plus de son aspect conservatif. Elle présente l'avantage de la possibilité d'être utilisé avec des maillages relativement grossiers, ce qui permet la mise en œuvre de code pour un coût raisonnable.

- La résolution du système d'équations algébriques par l'utilisation d'une méthode itérative.

Le premier pas qui est l'intégration sur le volume de contrôle, fait la distinction entre la méthode des volumes finis et tous les autres techniques numériques. Le résultat de l'intégration exprime la conservation exacte de la grandeur physique, Φ , sur chaque volume de contrôle. Cette relation claire entre l'algorithme numérique et le principe de conservation physique détermine la principale attraction de la méthode des volumes finis. L'algorithme de résolution numérique implique la méthode d'intégration temporelle et de découplage, comme par exemple, les algorithmes SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC et PISO.

III.3 Code de calcul

GAMBIT et FLUENT sont des logiciels, sous licence commerciale, permettant de réaliser des simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides allant de la construction du maillage avec GAMBIT à la résolution des équations de Navier Stokes et au post-traitement avec FLUENT. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, espace...etc.) en raison de leur interface graphique puissante et de l'abondance de leurs options, ils permettent de réaliser des simulations sur tous types de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs et avec des modèles physiques variés (diphasique, turbulent...etc.).

III.3.1 Gambit

Le logiciel Gambit (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit) est un mailleur 2D/3D; pré-processeur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle. Les options de génération de Gambit offrent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structuré. Sinon, GAMBIT génère

automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite. Avec les outils de vérification du maillage, les défauts sont facilement détectés.

Il peut être utilisé pour construire une géométrie et lui générer un maillage éventuellement, une géométrie d'un autre logiciel de CAO peut être importée dans ce préprocesseur. Il génère des fichiers ***.mesh** pour Fluent.

III.3.2 Fonctionnalités de GAMBIT

GAMBIT regroupe trois fonctions principales : définition de la géométrie des problèmes (construction si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie CAO), Le maillage et sa vérification, la définition des frontières (Types de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs. Si la géométrie est conçue par des logiciels de la CAO (Solidworks, CATIA...), il est conseillé d'importer des fichiers sous format ACIS ***.sat** et il est souvent indispensable de nettoyer la géométrie.

Dans le coin en haut à droite, on retrouve les différentes opérations que l'on peut réaliser sur ce logiciel.

- ❖ La première opération est la **géométrie**. Ce menu permet de créer des volumes, des surfaces, des lignes et des points. On peut également modifier des géométries importées.
- ❖ La seconde opération est le **maillage** de la géométrie. Ce menu permet de mailler des volumes, des surfaces mais aussi discrétiser des lignes.
- ❖ La troisième opération permet de définir les **conditions aux limites** et **domaines fluides**.
- ❖ Le quatrième bouton est un menu d'outil.

III.3.3 Conditions aux limites et définition de domaines

Plusieurs types de conditions aux limites sont disponibles selon le problème traité. À noter que l'espace maillé est pris par défaut comme étant fluide. Le nom donné à la frontière est très important car il sera repris sous Fluent, et si les noms ne sont pas clairs on risque de mélanger les limites.

Le mailleur Gambit peut générer des maillages que beaucoup de solveurs peuvent utiliser, ainsi nous devons spécifier le logiciel solveur avec lequel on veut traiter le fichier

maillage. Le choix des types de frontière varie en fonction du solveur considéré pour résoudre le problème.

Les types de conditions aux limites usuels sont:

- ❖ **Velocity inlet** : Utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue.
- ❖ **Pressure Inlet** : Utilisée pour les écoulements compressibles et incompressibles.
- ❖ **Mass Flow Inlet** : On impose un débit massique connu à l'entrée, il n'est pas nécessaire d'utiliser Mass Flow Inlet en écoulement incompressible.
- ❖ **Pressure Outlet** : L'utilisation de ce type sert à définir la pression statique à la sortie. L'utilisation de la condition "Pressure Outlet" au lieu de "Outflow" a souvent comme conséquence une meilleure convergence.
- ❖ **Outflow** : Cette condition est utilisée pour modéliser les sorties de fluide dont on ne connaît à priori les détails de la vitesse et de la pression à la sortie. Il n'est pas approprié pour les calculs suivants :
 1. Si le problème possède une condition de "Pressure inlet"
 2. Si vous modélisez un écoulement compressible
 3. Si vous modélisez un écoulement instationnaire avec variation de la densité
- ❖ **Wall** : Ce type est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides. En général on utilise les propriétés d'une paroi lisse

III.3.4 FLUENT

FLUENT est un code de calcul dans la CFD 'Computational Fluid Dynamics' qui modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes.

Ce solveur offre toutes les capacités physiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides, des turbulences, des transferts de chaleur et des réactions chimiques. Le logiciel est utilisé pour des applications industrielles

Des modèles spécifiques sont proposés pour modéliser les phénomènes de combustion interne, d'aéroacoustique ainsi que les turbomachines et les systèmes multiphasiques, ce qui élargit encore son champ d'application.

III.3.5. Utilisation de FLUENT

L'utilisation de Fluent est simple, il suffit de suivre l'ordre des menus en générale en partant de la gauche pour aller vers la droite et du haut vers le bas. Les principales étapes de simulation sous FLUENT sont les suivantes :

- ❖ Importation de la géométrie (*.msh)
- ❖ Vérification du maillage importé
- ❖ Lissage du maillage (Smooth and swap the grid)
- ❖ Vérification de l'échelle
- ❖ Choix du solveur
- ❖ Affichage de la grille
- ❖ Choix du modèle de turbulence
- ❖ Définition des caractéristiques du fluide
- ❖ Operating conditions
- ❖ Conditions aux limites
- ❖ Choix des critères de convergence
- ❖ Initialisation des calculs
- ❖ Sauvegarde du fichier *.cas
- ❖ Lancement de la simulation
- ❖ Post-traitement de la solution

III.4. Procédure numérique

III.4.1 Description de problème

Un mélange réactif de méthane/air entre dans une section appelée le bec du brûleur qui est constitué de deux parties : une plaque perforée où l'écoulement réactif est purement axiale et d'un espace annulaire où l'écoulement a deux composantes de vitesses : la première axiale et la seconde tangentielle qui est représentative du taux de swirl. L'espace entourant le bec du brûleur est appelé l'entrée d'air où uniquement de l'air est injectée en co-courant à 20 mm en amont avec une faible intensité de turbulence.

La simulation numérique s'est effectuée pour un brûleur ouvert à la pression atmosphérique conformément à la structure du brûleur LSB élaboré par Cheng R.K. (1995) et développé.

Les résultats obtenus par Nogenmyr K.J. et al (2009) nous ont servis pour la comparaison et la validation de nos résultats.

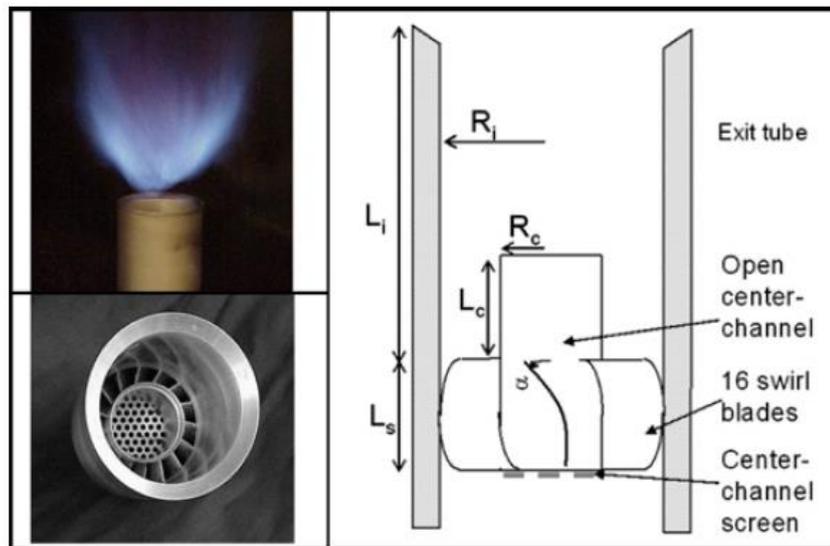


Fig III.1 Brûleur LSB adopté lors de cette étude.

III.4.2 Création de la géométrie

La géométrie est une moitié du domaine afin d'utiliser la symétrie avec swirl, les formes et dimensions sont montrées sur la Fig III.1, l'entrée d'air a été décalée vers l'arrière de 20 mm conformément à la structure proposée par Nogenmyr K.J. et al (2009). La géométrie ne comporte pas de parois solide, tout le domaine de calculs est ouvert à l'atmosphère (pression atmosphérique). Sa longueur (distance axiale) est de 300mm et sa hauteur (distance radiale) est de 150mm. Le bec du brûleur a un rayon de 25mm, 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 15mm et d'un espace annulaire swirlé de 10 mm où le mélange réactif est injecté avec deux composantes de vitesses ; axiale et tangentielle.

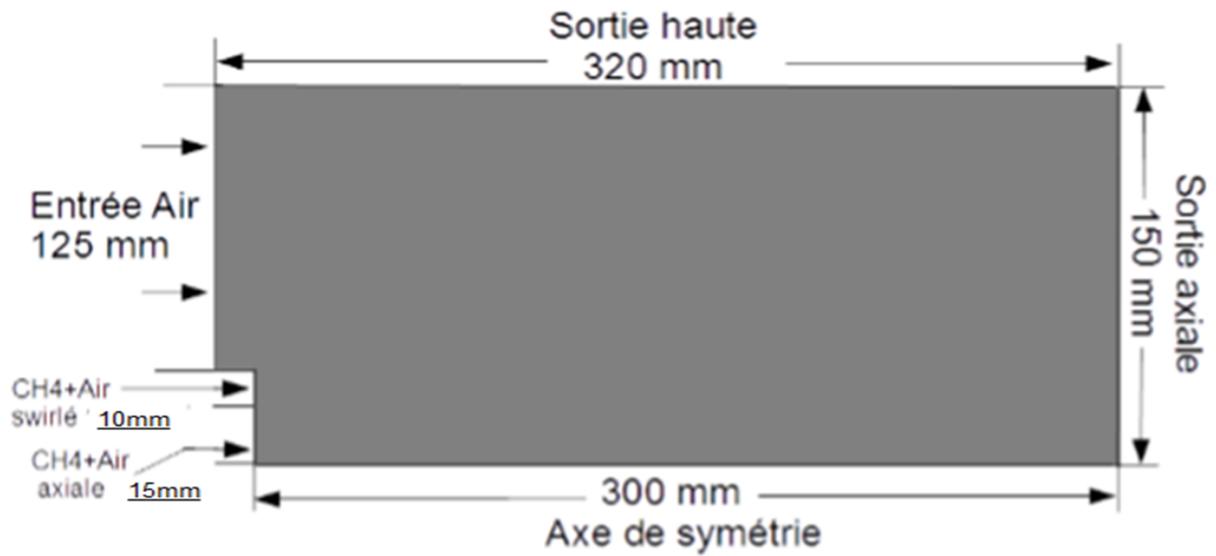


Fig III.2 structure du domaine de calcul

III.4.3. Les conditions aux limites

Le tableau suivant représente les conditions aux limites imposées et le paramètres définis lors de la simulation numérique :

Section	Condition aux limites
Paroi haute	Mur
Plaque perforée axiale	Vitesse d'entrée
Espace annulaire swirlé	Vitesse d'entrée
Paroi	Mur
Sortie axiale	Pression
Axe de symétrie	Axe

Tableau 3.1 conditions aux limites imposées sur la structure du domaine de calcul

Pour le cas du méthane

❖ **Entée d'air**

section	U_a (m/s)	I (%)	D_h (mm)	y_{O_2}	y_{N_2}
Entrée d'air	0.3	0.1	125	0.23	0.77

Tableau 3.2 conditions aux limites entrées d'air

❖ **Plaque perforée axiale**

section	U_0 (m/s)	U_{axc} (m/s)	I (%)	D_h (mm)	y_{CH_4}	y_{O_2}	y_{N_2}
Plaque perforée	5	1.7	12	30	0.0348	0.22	0.7452

Tableau 3.3 conditions aux limites à la plaque perforée.

❖ **Partie swirlé**

Section	U_0 (m/s)	U_{axs} (m/s)	U_{st}	I (%)	D_h (mm)	y_{CH_4}	y_{O_2}	y_{N_2}
Partie swirlée	5	3,639	2,736	12	20	0.0348	0.22	0.7452

Tableau 3.4 conditions aux limites de partie swirlé.

III.4.4 Conditions opératoires

Paramètre	Désignation
Modèle de combustion	Eddy Dissipation Partially Premixed Combustion Model
Modèle de turbulence	k-ε RNG
solveur	Axisymétrique Swirl
Pression de service (operating pressure)	1 atm
Température d'entrée	300 K
Vitesse d'entrée U_0	5 m/s
Nombre de swirl S	0.5
Nombre de schmidt turbulent	0.5
Nombre de shmidit de la PDF	0.85

Tableau 3.5 Conditions opératoires

III. 4.5 Structure et test de maillage

Le maillage à structure bidimensionnelle adopté dans cette étude et structuré uniforme

Plusieurs cas de maillages ont été testés afin d'atteindre des solutions indépendantes de la grille.

	Maillage N°1	Maillage N°2	Maillage N°3	Maillage N°4	Maillage N°5
Nombre de nœuds	7556	12116	24061	39901	71881

Tableau 3.6 Différents nombres de nœuds.

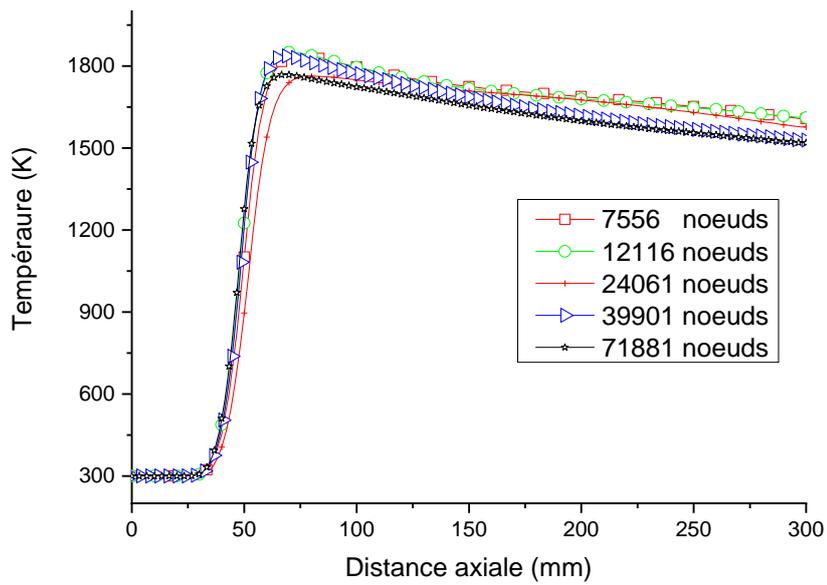
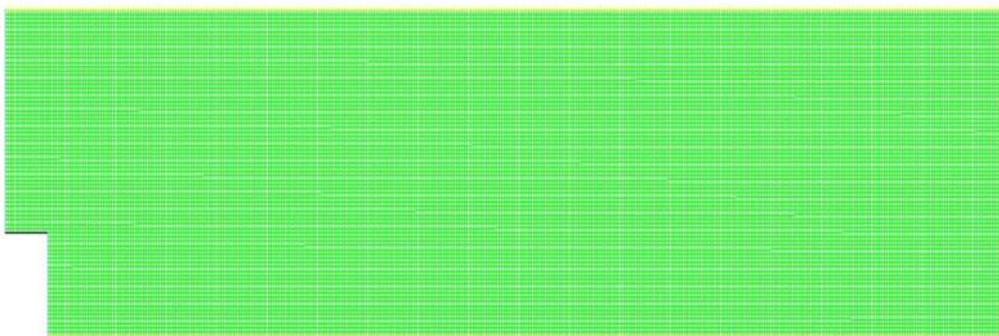


Fig III.3 Température sur l'axe du bruleur pour différents nombres de nœuds.

Après avoir choisi une structure bidimensionnelle structuré uniforme, plusieurs maillages ont été réalisés dans le cas réactifs en variant le nombre des nœuds, afin d'atteindre des solutions indépendantes du la grille (le temps de calcul, la précision et l'exactitude).

La vitesse axiale a été choisie comme variable de comparaison de maillages et nous avons adopté le maillage avec 39901 nœuds.



FigIII.4 structure de maillage.

Paramètres adoptés sous ANSYS FLUENT

Solveurs	Pressure-Based, steady (stationnaire) Et Axisymétrique swirl
Couplage pression-vitesse	Algorithme « Simple)
Schéma de discrétisation	Quick
Schéma d'interpolation de pression	PRESTO

Tableau 3.7 Paramètre adoptés sous FLUENT.

Les valeurs de tolérance des résidus ont été fixées à des niveaux très acceptables par rapport aux préconisations proposées par le guide du logiciel FLUENT 16.0. Les résidus imposés sont montrés sur le tableau

continuité	U_{ax}	U_{Swirl}	k	ε	énergie
10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-9}

Tableau 3.8 critère de convergence des résidus.

Conclusion

Dans ce chapitre on a lancé les diverses opération de simulation afin d'examiner la sensibilité de maillage pour le mélange réactif méthane-air, les modèles de la combustion et la turbulence ont été fixé au départ.

Chapitre IV

Résultats et discussions

Introduction

La présente étude est une simulation numérique des flammes pré-mélangées turbulentes pauvre de méthane /air stabilise par swirl, le but de ce chapitre est :

-Valider les résultats numériques avec les résultats de Nogenmyr K.J. et al (2009). [15] et voir l'influence de modèle de la combustion sur les résultats valider.

-Examiner l'effet de la variation de la richesse jusqu'une valeur proche de LBO, et l'effet de l'ajout d'hydrogène, afin d'améliorer l'efficacité de la combustion et de réduire les émissions polluantes telles que NOx et CO.

IV.1 Validation

La validation a été effectuée en comparant les résultats obtenus de la simulation numérique en utilisant le modèle Partially-Premixed et Eddy Dissipation pour la combustion et le modelé RANS k- ϵ RNG en turbulence avec les résultats d'une étude expérimentale de de Nogenmyr K.J. et al (2009). [15]

La comparaison des profils de températures a été effectuée : dans le cas réactif.

IV.1.1 Influence du modelé de combustion sur les profils de la température

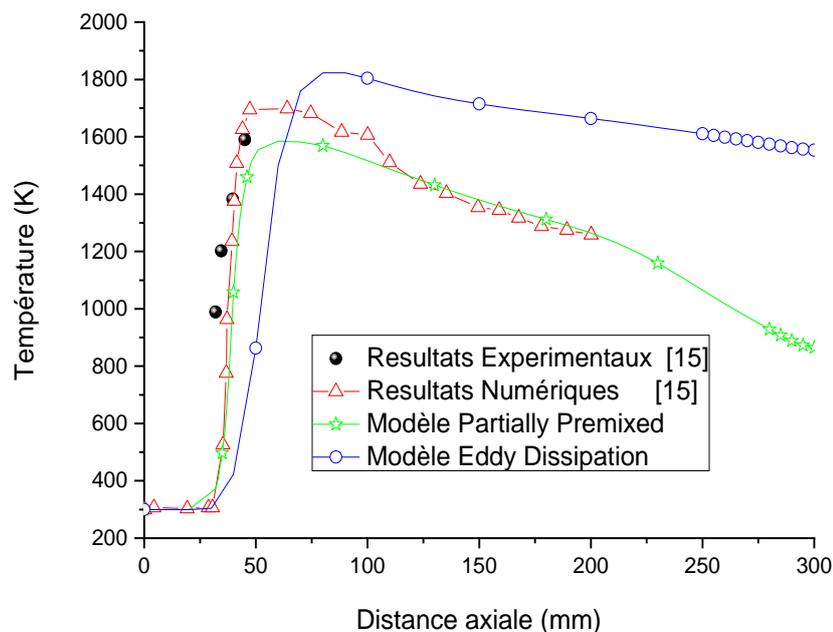


Fig. IV.1 Influence de choix du modèle de turbulence RNG et les deux modèles de combustion sur les profils de températures sur l'axe du brûleur.

La figure IV.1 montre les profils de température sur l'axe du brûleur pour une distance comprise entre 0 et 300 mm, une corrélation raisonnable peut être observée dans l'évolution de la température pour les deux modèles de la combustion, les profils de température obtenus montrent une augmentation brusque de la température qui est l'une des caractéristiques de combustion. Il est remarquable que modèle de la combustion Partially-Premixed et le modèle de la turbulence RNG k- ϵ reproduit les meilleurs résultats avec une coïncidence des valeurs températures par rapport au modèle de combustion Eddy Dissipation (EDM) Ainsi que.

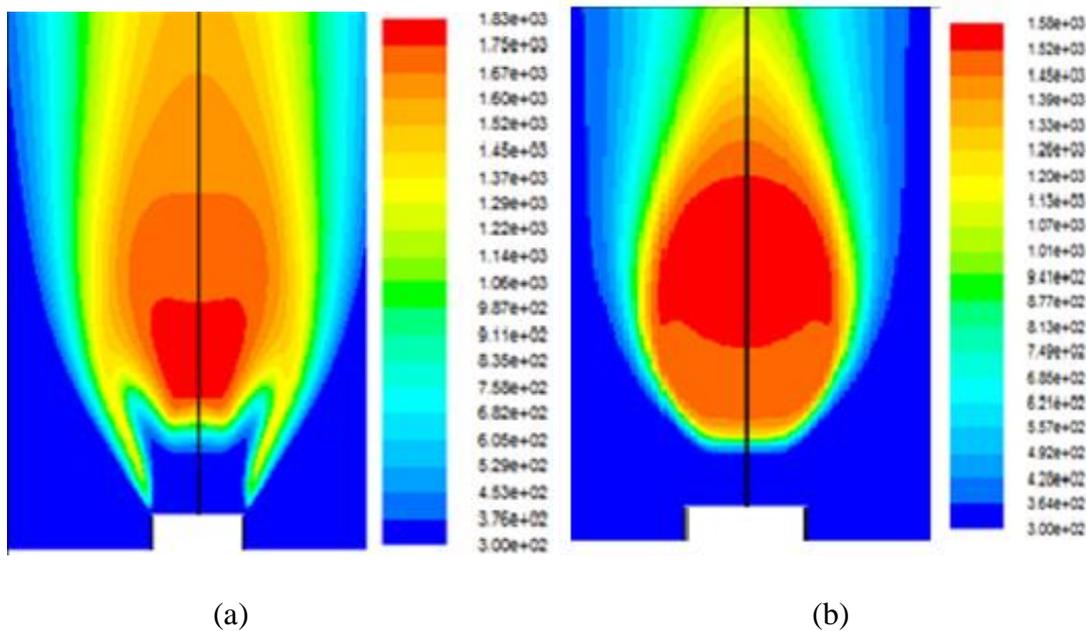


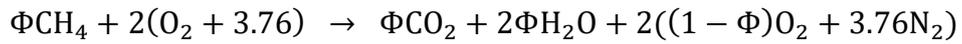
Fig IV.2 Effet de chaque modèle de combustion sur la structure de la flamme pré-mélangée de méthane/air : (a) modèle EDM ; (b) modèle Partially-Premixed.

Dans la figure IV.2 la position du front de flamme et les températures maximales atteintes sont pratiquement différentes tel que : le modèle EDM atteint une température maximale de 1830K tandis que le maximum de température obtenu avec de modèle Partially-Premixed est de 1580K.

IV.2 Effet de la richesse du CH₄

Dans cette partie l'influence de la richesse a été analysée en utilisant le modèle de combustion Partially-Premixed et le RNG k- ϵ pour la turbulence. La variation de la richesse a été effectuée dans le but d'observer le comportement de la flamme pré-mélangée turbulente dans un brûleur LSB en régime très pauvre (proche de la limite LBO), l'analyse de son effet a été investiguer sur plusieurs paramètres : la température, l'apparition des NO_x et CO.

La richesse a été varié dans le régime pauvre de 0.55 jusqu'à 1, les fractions massiques ont été calculé ont suit l'équation de combustion suivante :



Les résultats des fractions massiques de CH₄, O₂, N₂, sont présentés dans le tableau suivant :

Cas	Φ	yCH ₄	yO ₂	yN ₂
1	1	0.05506	0.22026	0.72466
2	0.8	0.044543	0.22271	0.73273
3	0.6	0.03487	0.22497	0.74015
4	0.55	0.031055	0.22586	0.74308

Tableau 4.1 Fractions massique de CH₄, O₂, N₂ on fonction de la richesse

IV.2.1 Effet de la richesse du CH₄ sur la température :

La figure suivante montre l'évolution de la température pour les différentes richesses proposées

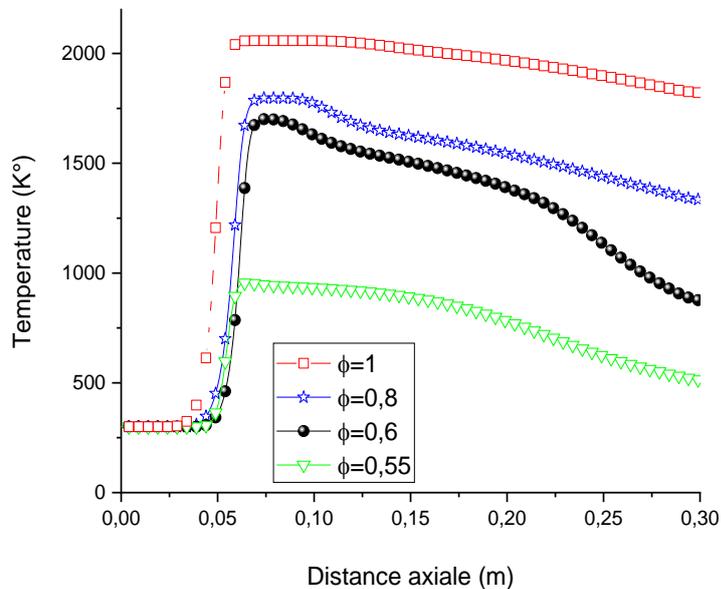


Fig IV.3 Effet de la richesse du CH₄ sur la température.

Les profils de température obtenus dans la figure IV.3 montrent une augmentation brusque de la température, suivis par une diminution, on remarque que l'augmentation de la richesse fait augmenter la température. Pour une $\Phi = 1$ la température maximale atteinte la valeur de 2200 K et pour une $\Phi = 0,55$ qui est une valeur proche de la limite de soufflage LBO, au-dessous de cette valeur la flamme devient instable et s'étend, la température minimale atteinte la valeur de 980 K, et la flamme devenu stable.

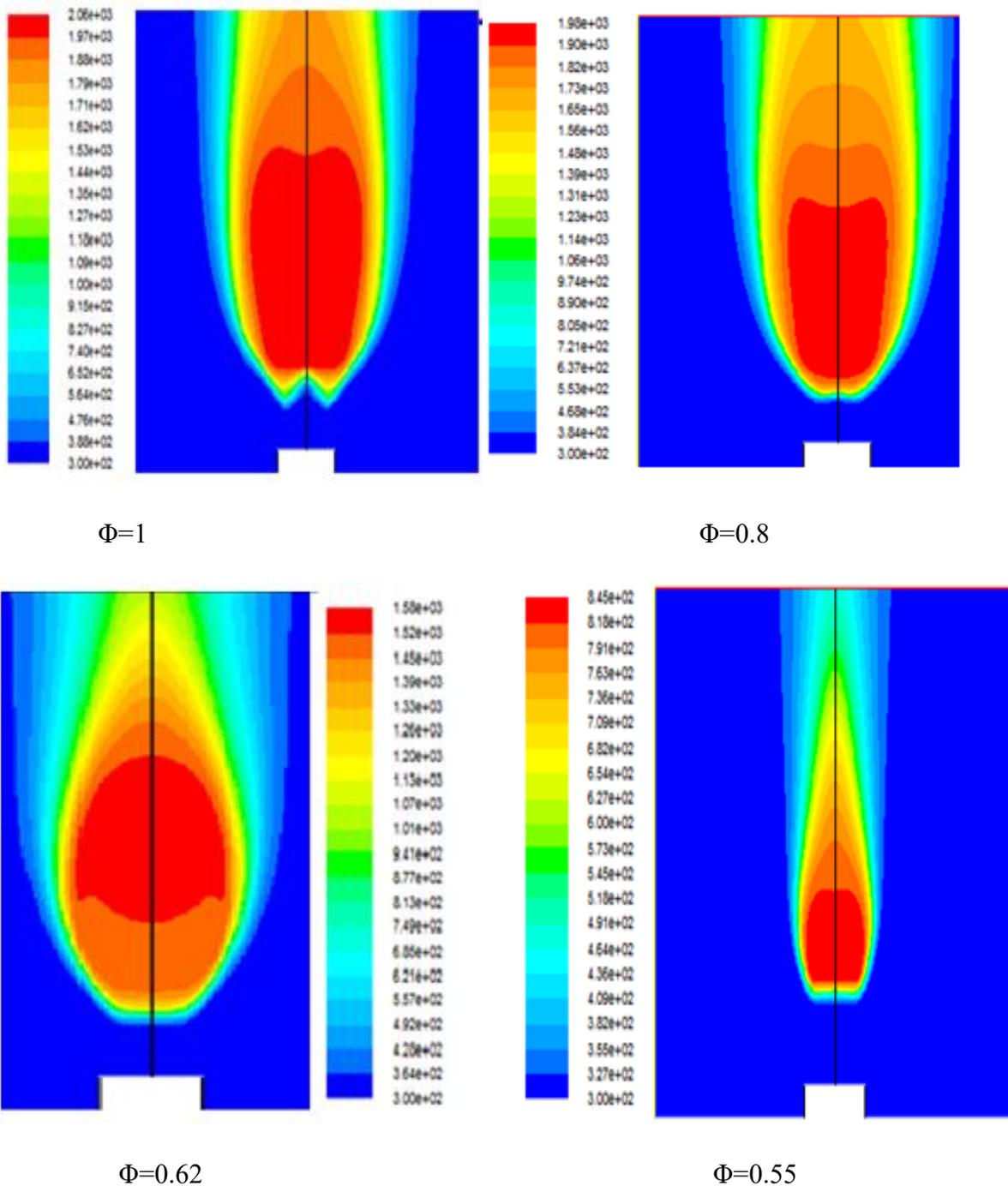


Fig IV.4 contours des flammes de l'effet de la richesse sur l'évolution et les champs de températures.

La figure IV.4 présente l'effet de la richesse sur l'évolution et les champs de températures. On voit bien que le maximum de température est noté par le cas stœchiométriques ($\Phi = 1$). Dans le domaine pauvre l'augmentation de la richesse fait augmenter les températures de manière considérable de 845 K à 2210 K.

Il est clair ainsi que l'augmentation de la richesse a affecté la forme globale de la flamme provoquant une augmentation de son volume et un rapprochement entre le front de flamme et le bec du brûleur. Ceci peut entraîner des perturbations et des instabilités de la flamme et augmente des probabilités d'extinction. Au-delà, on peut déduire que la combustion en régime pauvre offre une meilleure stabilisation du front de flamme.

IV.2.2 Effet de la richesse du CH₄ sur l'apparition des NO_x thermique

La figure suivante montre l'évolution de NO_x pour les différentes richesses proposées

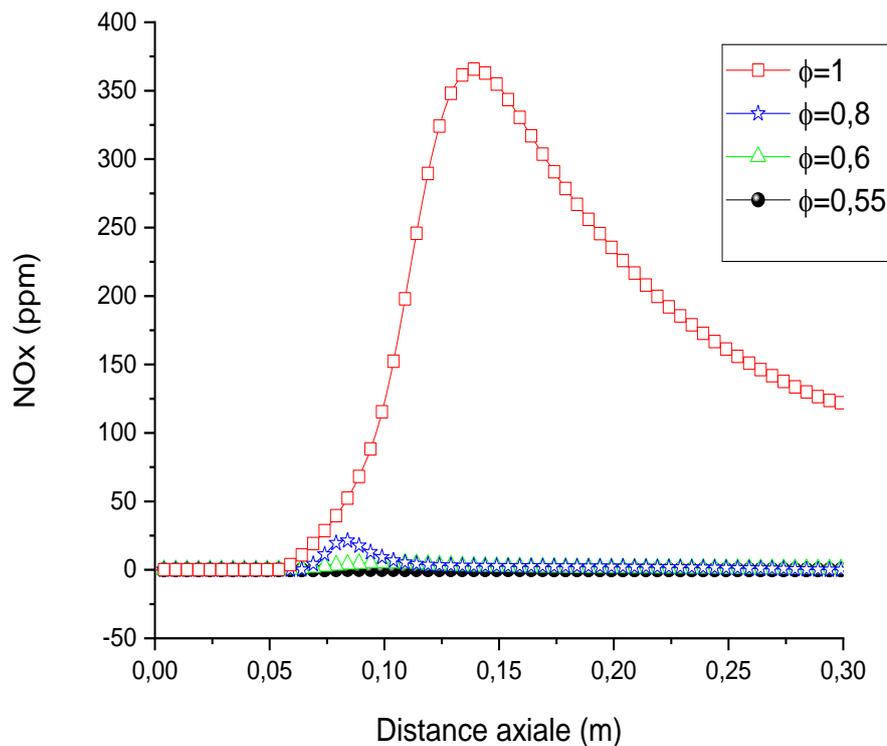


Fig IV.5 : effet de la richesse du CH₄ sur l'émission du NO_x thermique.

La figure (IV.5) montre l'effet de la richesse du CH₄ en mélange pauvre sur l'apparition des NO_x thermique. On remarque que pour une richesse de $\Phi = 1$ atteinte, un maximum de NO_x, la production des NO_x est pratiquement nul pour les cas de 0,55, cela exprime que la diminution de la richesse fait diminuer la température et par conséquent la production des NO_x. On peut déduire que l'apparition des NO_x dépend essentiellement de la présence des zones à haut température comme est indiqué pour $\Phi = 1$.

IV.2.3 Effet de la richesse du CH₄ sur les émissions du CO :

La figure suivante montre l'évolution de CO pour les différentes richesses proposées

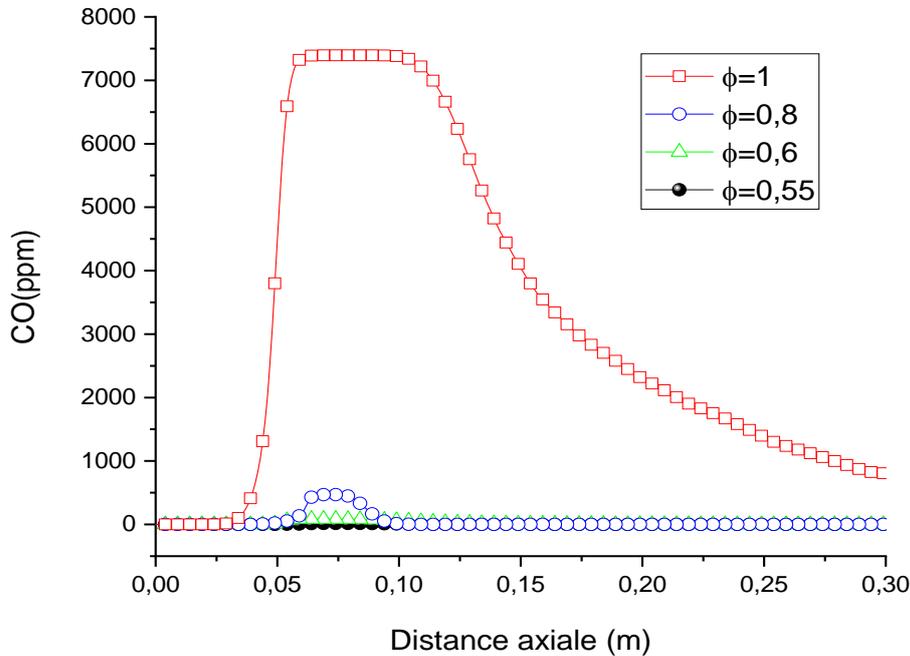


Fig IV.6 Effet de la richesse du CH₄ sur les émissions du CO.

La figure (IV.6) montre que l'augmentation de la richesse fait augmenter l'apparition du polluant CO. Pour une $\Phi = 0.55$ proche de la limite LBO, on remarque que la production du CO presque nul, contrairement à la richesse $\Phi = 1$ où le maximum de production de CO a lieu. Cela explique plus on a une richesse faible plus la production de CO diminue ou nul car la flamme est en manque de carburant. On déduit alors que l'apparition du CO dépend de la richesse.

Pour le cas du méthane hydrogène

Au-dessous de la valeur $\Phi = 0.55$ valeur proche de la limite de soufflage LBO la flamme devient instable et s'étend, d'où l'idée d'ajouter l'hydrogène au méthane, la figure suivante montre les LBO de CH₄ et CH₄/H₂.

Calcul de la puissance donnée par le brûleur LSB CH₄/air

$$P = \dot{m}_{\text{CH}_4} \text{PCI}_{\text{CH}_4} = \rho_{\text{CH}_4} V_0 S \text{PCI}_{\text{CH}_4}$$

T (K)	PCI (kJ/kg)	ρ (kg /m ³)	V0 CH4 (m /s)	D (m)	S (m ²)	\dot{m} (CH4) kg /s	P CH4 (KW)
300	50020	0.64963	5	0.05	0.0019625	0.00637449	318.852

Tableau 4.2 puissance donnée par le bruleur LSB CH₄/air

Calcul de la puissance donnée par le bruleur LSB CH₄/H₂/air

$$P = (X_{CH_4} \dot{m}_{CH_4} PCI_{CH_4}) + (X_{H_2} \dot{m}_{H_2} PCI_{H_2})$$

$$P = (X_{CH_4} \rho_{CH_4} V_0 S PCI_{CH_4}) + (X_{H_2} \rho_{H_2} V_0 S PCI_{H_2})$$

T (K)	PCI H ₂ (kJ/kg)	ρ H ₂ (kg /m ³)	\dot{m} (H ₂) kg /s	P 10% H ₂ (KW)	P 20% H ₂ (KW)
300	119930	0.08	0.00079678	296,52	274,19

Tableau 4.3 puissance donnée par le bruleur LSB CH₄/H₂/air

Pour le même bruleur la puissance produite dans le cas de 10% et 20% de H₂ a diminué malgré le pouvoir calorifique de H₂ est élevé.

On gardant la même puissance du bruleur, les valeurs des vitesses doit être recalculé à l'entrée du bruleur dans le cas du mélange CH₄/H₂/air.

Les fractions sont calculées selon l'équation ci-dessous

$$\Phi(1 - \beta)ch_4 + \Phi\beta H_2 + (2 - \frac{3\beta}{2})(o_2 + 3.76N_2) \rightarrow$$

$$\Phi(1 - \beta)co_2 + \Phi(2 - \beta)H_2O + (2 - \frac{3\beta}{2})[(1 - \Phi)o_2 + 3.76N_2]$$

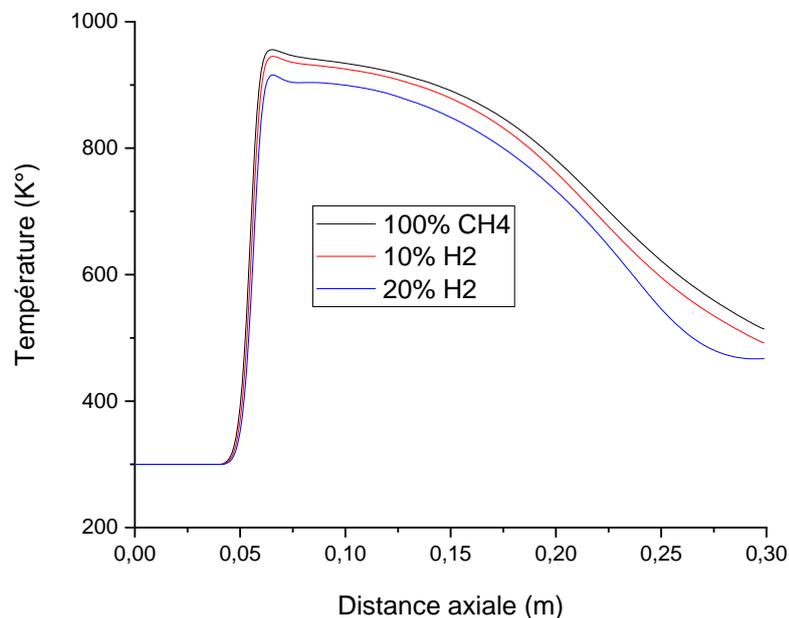
Le tableau suivant montre en les résultats obtenus cas de mélange CH₄/H₂/air.

%CH ₄	%H ₂	V0 (H ₂ /CH ₄)	U _{axc}	U _{axs}	U _{st}	y CH ₄	y O ₂	y N ₂	y H ₂	Φ
0.9	0.1	5.376	1.83	3.91	2.94	0.0302	0.2259	0.7433	0.00041	0.55
0.8	0.2	5.814	1.98	4.23	3.18	0.0292	0.2260	0.7437	0.0009	0.55

Tableau 4 .4 les résultats obtenus cas de mélange CH₄/H₂/air.

IV.3.1 L'effet de l'ajout d'hydrogène sur la température :

L'analyse de l'effet d'ajout d'hydrogène sur la température dans l'axe du brûleur est présentée sur la figure suivante :



FigIV.8 Effet de l'hydrogène sur la température dans l'axe du brûleur

La figure IV.8 Représentent l'influence de l'ajout d'hydrogène sur la température totale dans l'axe du brûleur en utilisant le modèle de combustion Partially Premixed et le modèle k-ε RNG pour la turbulence, pour une $\phi=0.55$ qui est une valeur proche de la limite de soufflage LBO, on note que lorsque en ajout de 10% et 20% d'hydrogène la température diminue la température minimale atteinte la valeur de 930K , et la flamme reste stable .

IV.3.2 L'effet de l'ajout d'hydrogène sur la Fraction massique de NOx

L'analyse de l'effet d'ajout d'hydrogène sur la fraction massique de NOx est présentée sur la figure suivante :

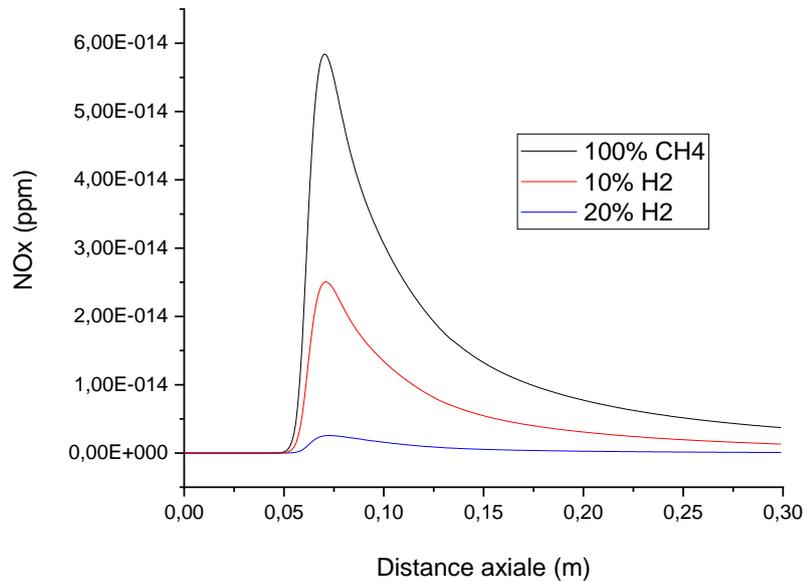


Figure IV.9 Effet de l'hydrogène sur la fraction massique NOx dans l'axe du brûleur

La Figure IV.9 représente l'influence de l'ajout d'hydrogène sur les fractions massiques de NOx en ppm sur de l'axe du brûleur, on note que lorsque on ajoute de 10% et 20% d'hydrogène au méthane les émissions de NOx diminuent. La production des NOx est pratiquement nul pour les cas de $\Phi = 0.55$, cela exprime par la diminution de la richesse qui fait diminuer la température et par conséquent la production des NOx. On peut déduire que l'apparition des NOx dépend essentiellement de la présence des zones à haut température.

IV.3.3 L'effet de l'ajout d'hydrogène sur la fraction massique de CO

L'analyse de l'effet d'ajout d'hydrogène sur la température dans l'axe du brûleur est présentée sur la figure suivante :

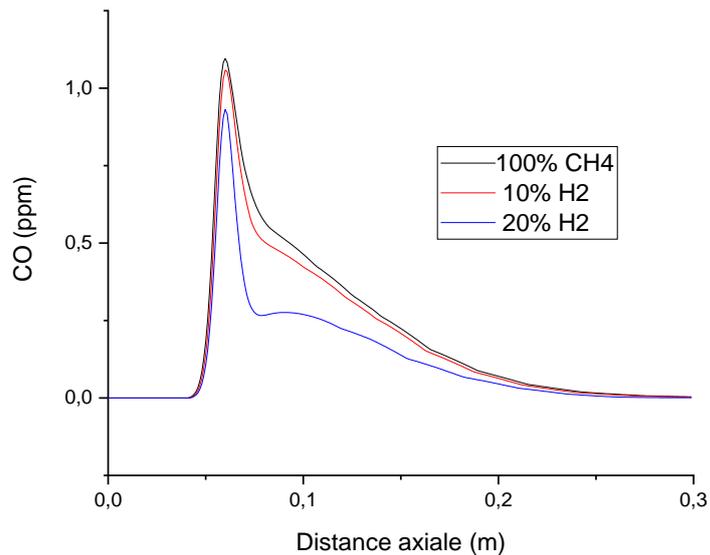


Figure IV.10 Effet de l'hydrogène sur la fraction massique de CO dans l'axe du brûleur

La Figure IV.8 représente l'influence de l'ajout d'hydrogène sur les fractions massique de CO en ppm dans l'axe du brûleur, on note qu'après l'ajout de 10% et 20% d'hydrogène au méthane l'émission de CO diminue. La production de CO est de 0.8 ppm expliquer par la richesse faible $\Phi = 0.55$, de plus la flamme est en manque de carburant. On déduit alors que l'apparition du CO dépend de la richesse.

IV.4 Conclusion

Les résultats obtenus dans ce dernier chapitre nous ont permis de :

- Valider le modèle de turbulence RANS qui est le k- ϵ RNG et deux modèle de combustion Partially Premixed et EDM.
- Mieux comprendre l'influence de la richesse sur la température, les émissions polluantes
- l'analyse de l'effet de la variation de la richesse nous a permis aussi de prédire le comportement de cette dernière et montre un rapport direct de l'augmentation de la température à l'augmentation de la richesse.
- Etudier l'effet de l'enrichissement du mélange réactif en hydrogène à des taux de 10% et 20% pour améliorer la combustion.

Conclusion générale

Récemment, des efforts importants ont été déployés pour développer une solution réalisable à réduire les émissions polluantes, tout en produisant de plus grandes quantités d'énergie.

À ce jour, la combustion pré-mélangée pauvre a été l'approche privilégiée pour atteindre les températures les plus basses requises en minimisant le niveau de production de NO_x et donc les émissions ; cependant, cette approche nécessite un travail délicat.

La technologie dite Dry-Low NO_x (DLN) a permis de réduire les émissions de NO_x et de CO en dessous de 25 et 50 ppm, pour atteindre ces niveaux faibles d'émission, ces brûleurs à faible teneur de NO_x doivent fonctionner dans des conditions très pauvres près de la limite de soufflage pauvre (LBO).

Ce travail vise à rechercher une nouvelle méthode plus efficace et moins polluantes, la technologie en milieu pré-mélange stabilisé par faible nombre swirl (LSB) depuis qu'il a été développé par **R.K Cheng** a attiré l'attention de plusieurs chercheurs qui ont continué l'amélioration.

La simulation numérique est devenue un outil primordial dans le procédé de conception des Applications efficaces économiquement et écologiquement.

Notre travail consiste à examiner la pertinence de deux modèles de combustion EDM et Partially-Premixed avec le modèle de turbulence RANS ($k-\epsilon$ RNG dans le but d'aboutir au modèle de combustion le plus convenable pour les brûleurs swirlés LSB.

D'une part 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 et il reste une alternative de taille par rapport aux moyens de calculs qu'il requière.
- ✓ Mieux comprendre l'influence de la richesse sur la température et les émissions polluantes.
- ✓ L'analyse de l'effet de la variation de la richesse nous a permis aussi de prédire le comportement de ces dernières, l'augmentation de la température est due à l'augmentation de la richesse.
- ✓ Les zones de recirculations présentes dans les flammes stabilisées par swirl font accroître l'apparition des NO_x, donc l'apparition des NO_x dépend essentiellement de la présence des zones à hautes températures.

- ✓ Dans le mélange CH_4/air l'apparition du CO dépend directement de la richesse du mélange et ne dépend pas de la température.

D'autre part, l'hydrogène a une vitesse de combustion beaucoup plus élevée que le méthane, passer à l'hydrogène comme combustible semble une solution intéressante pour résoudre le problème de stabilité et atteindre une combustion pré-mélangée très pauvre tout en brûlant un combustible «vert», l'ajout d'hydrogène au méthane à des taux de 10% et 20% a amélioré la combustion et minimisé les émissions de NO_x et CO.

L'ajout d'hydrogène fait diminuer la puissance du brûleur, Pour garder la même puissance que le brûleur LSB CH_4/air on doit augmenter la vitesse d'entrée du mélange $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$.

Bibliographies

- [1] article généralités for combustion et incidence.
- [2] thèse doctorat présente par Karima Boussouara 2010 « étude des émissions polluantes et des moyens de dépollution dans les moteurs à combustion interne ».
- [3] C.D.Pierce <<progress-variable approach for large-eddy simulation of turbulent combustion>>, PhD, Standard University, 2001.
- [4] Thèse doctorat présente par Flavien BIDAULT 2007 « animation et rendu temps-réel de flammes ».
- [5] dictionnaire de terme couramment utilisées en combustion.
- [6] Norbert Peters, *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press 2000.
- [7] A.SOUFI, N. BOUNAB. <<Etude, par modélisation cinétique, de l'oxydation Dimethylether dans un réacteur parfaitement agité PSR. >> Université Larbi Ben M hidi Oum El Bouagui, (2016/2017).
- [8] A.K. Gupta, D.G. Lilley, and N. Syred. *Swirl flows*. Abacus Press, 1984.
- [9] Beér, J. M. & Chigier, N. A., "Swirling Flows", in *Combustion Aerodynamics* edited by (Krieger, Malabar, Florida, 1972), 100-146.
- [10] Leuckel, W. et Friker, N., (1976). The characteristics of swirl-stabilized natural gas flames. *Journal of the institute of fuel*.
- [11] J.M. Béer & N.A Chigier, <<Swirling Flows>>, in *Combustion Aerodynamics* edited by (Krieger, Malabar, Florida, 1972), 100-146
- [12] Bidat B. et Cheng R.K. (1995) [8] B. BiDAT and R. K. CHENG, « Experimental Study of Premixed Flames in Intense Isotropic Turbulence », Combustion Group, Energy & Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA 94720, (1995).
- [13] R. K. CHENG, C. K. CHAN, K. S. LAU AND W. K. CHIN, « Freely Propagating Open Premixed Turbulent Flames Stabilized by Swirl », *The Combustion Institute*, pp. 511-518, (1992).
- [14] Zimont V.L. (2000). Gas premixed combustion at high turbulence. *Turbulent flame Closure combustion model. Experimental Thermal and Fluid Science* 21 (2000) 179-186
Doit : S0894-1777-(99)-00069-2
- [15] Nogenmyr K.J. et al (2009) [13] 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) .
- [16] I. Yilmaz et al (2010) [30] : Abdelbaki Mameri, « Etude numérique de la combustion turbulente du prémélange

Pauvre méthane/air enrichi à l'hydrogène », Université d'Orléans, (2009).

[17] M. Emadi et al. (2012) [31]: Baris Yilmaz, Sibel Özdoğan, « INFLUENCE OF HYDROGEN ADDITION ON LEAN PREMIXED METHANE-AIR FLAME STATISTICS », Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA (2010).

[18] M.Tidswell ET S.P.R. Muppala. « *A numerical study of turbulent flame speed models for H₂/CH₄/Air premixed combustion* ». International Journal of enhanced research in science technology ET engineering, Volume 3, Issue 6, 2014.

[19] S. Ouali et al (2016) [20] S. Ouali, A. H. Bentebbiche and T. Belmrabet, Numerical Simulation of Swirl and Methane Equivalence Ratio Effects on Premixed Turbulent Flames and NO_x Apparitions, Journal of AppliedFluidMechanics, Vol. 9, No. 2, pp. 987-998, (2016).

[20] Weijie Liu et al (2019) [26] Weijie Liu¹, Bing Ge, ShushengZang, Huiru Wang, Large-eddy simulation of low-swirl multi-nozzle combustion with co- and counter-swirlingarrays , Journal of Mechanical Science and Technology 33 (1) 423~431, (2019).

[21] Dmitry pashchenko (2020) 42] Maleek-ghozalli, l'influence du rapport de la hauteur d'entre/ hauteur du collecteur à différent position, Mémoire de master Département : Energétique, université de boumèrdes (2015).

[22] Shilong Guo, et al. (2020)

ANSYS Fluent Theory Guide, November (2013).

[23] X.Liu,M.Bertsch,A.A. Subash,S. Yu,R.Z. Szasz,Z.Li,P. Petersson,X.S. Bai,M. Aldénet

D. Lörstad. « *Investigation of turbulent premixed methane/air and hydrogen-enriched methane/air flames in a laboratory-scale gas turbine model combustor* ». International Journal of Hydrogen Energy, Volume 46, Issue 24, Pages 13377-13388, 2021.

[24] Hydrogen-Enriched Combustion Study at High Turbulence

And Swirl Levels Inside a Gas Turbine Combustor

By

Mohamed ELBAYOUMI

THESIS PRESENTED TO ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

IN PARTIAL FULFILLMENT FOR THE DEGREE OF

DOCTOR OF PHILOSOPHY

Ph. D.

MONTREAL, APRIL 13, 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

[25] ANSYS FLUENT 16.0

[26] N. Peters, Turbulent combustion, Cambridge University Press 2000

[27] Page Wikipédia sur la moyenne de Reynolds :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Moyenne_de_Reynolds

[28] BELHAMRA Zakaria & KAHIL Zakaria. EFFET DE LA CONFIGURATION DU SWIRL SUR UN ECOULEMENT TURBULENT. Université Larbi Ben M'hidi. 2014.

[29] **D. B. SPALDING.** « *Development of the Eddy-Break-Up Model of Turbulent Combustion* », Sixteenth International Symposium on Combustion, Ed. The Combustion Institute, p. 1657, (1977).

[30]DominikEbi, NoelT.Clemens, « Experimental investigation of upstream flamepropagation during boundary layer flashback of swirl flames », Combustion and Flame 16839–52 (2016).