



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :GHOUIREG Hanan

GUELLOULA Karima

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie des Procédés des Matériaux

Thème

**Réduction des émissions de CO₂ et NO_x par la combustion sans
flamme dans les machines à combustion :
(Turbine à gaz, Four tubulaire)**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
ABDELMOUIZ Ahmed	MCB	Président
MECHRAOUI Omar	MCA	Examineur
MERIGUI Khaled	MAA	Rapporteur

Promotion : 2025

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le Bon Dieu qui nous a aidé et Permis De réaliser ce travail.

Aussi, nous exprimons notre gratitude au Dr. Merigui khaled qui a accepté de nous encadrer, de nous soutenir et de Nous apporter conseil le long De ce travail.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude et reconnaissance aux professeurs qui nous ont enseigné pour l'obtention de la licence et du master.

Nous tenons ensuite à remercier les membres du jury pour avoir examiner et commenter avec un très grand intérêt notre mémoire.

Aussi nous remercions nos familles pour leur soutien dans les moments difficiles et pour leur encouragement..

Enfin, nous exprimons tout particulièrement notre reconnaissances et notre profondes sympathies à tous ceux qui nous ont soutenus et encouragés pour la réalisation du présent mémoire.

Dédicaces

*À mes **chers parents**, merci pour votre amour et votre soutien, qui ont toujours illuminé mon chemin.*

*À mes frères **Adel et Mohamed**, ainsi qu'à ma sœur **Wafaa**, mon pilier à chaque étape.*

*À la personne la plus chère à mon cœur **Tayeb**, merci pour ta présence, ton grand cœur et ton soutien constant.*

*À ma chère amie et partenaire **Karima**, dans la préparation de ce travail, tous mes remerciements et ma reconnaissance.*

Hanan

Dédicaces

Après "Au nom de Dieu, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux", et la prière et le salut sur le porteur de l'intercession, notre maître Mohammed, le noble Prophète, ainsi que sur sa famille et ses compagnons bénis, et sur ceux qui les ont suivis avec bienveillance jusqu'au Jour du Jugement.

Je dédie le fruit de mes humbles efforts :

*À la source de tendresse, celle qui a toujours été à mes côtés en tout temps **ma tendre mère.***

*Et à celui dont les mains se sont crevassées pour prendre soin de moi **mon patient père.***

À mes chers frères et sœurs, que Dieu les préserve.

*À mon amie et collègue de recherche, **Hanane Ghouireg**, que Dieu te préserve.*

Et à tous ceux qui m'ont conseillé et guidé, et à tous ceux qui ont eu un impact sur ma vie.

Karima

Liste des figures

FigureII.1: Comparaison d'une combustion avec et sans flamme (Milani et Saponaro, 2001).....	7
Figure II.2 : Combustion classique en mode flamme à gauche, et combustion sans flamme à droite (Milani & Wüning , 2002).....	8
Figure II.3 : Comparaison des deux modes de combustion : classique et sans flamme (Milani, 2001).....	8
FigureII.4 : Définition de la combustion sans flamme fonction de la température de préchauffage de l'air et du taux d'oxygène (Milani, 2001).....	9
FigureII.5 : Variation de la température avec et sans recirculation de la chaleur, dans un système adiabatique 1D (Katsuki, 1998).....	11
FigureII.6: Domaine d'inflammabilité fonction du pouvoir calorifique du combustible (Q_f), de la température initiale des réactifs (T_i), et de la richesse (ϕ) (Katsuki, 1998).....	12
FigureII.7: Four de réchauffage équipée d'une zone de récupération et d'un récupérateur (document Stein-Heurtey).....	14
FigureII.8 : Augmentation du rendement de combustion par préchauffage de l'air de combustion.....	15
FigureII.9 : Paire de brûleurs NFK HRS. DL.....	16
FigureII.10 : Deux cycles d'un couple de brûleurs régénératifs.....	17
FigureII.11 : Principe de fonctionnement des brûleurs régénératif.....	18
Figure II.12 : Schéma d'un brûleur auto régénératif (document WS Gmbh).....	19
FigureIII.1: Schéma un brûleur JHK(Jet in a Hot Cow flow).....	21
FigureIII.2 : Conditions aux limite.....	22
Figure III.3 : Vue d'ensemble de la géométrie schématiser et en 3D.....	23
FigureIII.4 : Géométrie du brûleur 2D.....	27
Figure III.5 : Maillage de la géométrie.....	27

Figure III.6: Structure de maillage.....	28
FigureIII.7 : Maillage structuré.....	29
FigureIV.1: Validation des Profil de températures en fonction de la position radiale(r)	30
Figure IV.2 : Validation La fraction massique de CO ₂ dégagé au cours de combustion sans flamme en fonction de la position radiale (r).....	31
Figure IV.3: Validation la fraction massique d'O ₂ en fonction de la position radiale (r).....	32
Figure IV.4 : Influence d'ajout H ₂ sur les émissions du CO.....	33
Figures IV.5-IV.6: Fraction massique de CO pour (CH ₄ =1 et H ₂ =0) et (CH ₄ =0.95 et H ₂ =0.05).....	34
Figures IV.7-IV.8: Fraction massique de CO pour (CH ₄ =0.85, H ₂ =0.25)et (CH ₄ =0.80, H ₂ =0.20).....	34
FigureIV.9-IV.10 : Fraction massique de CO pour (CH ₄ =0.75 et H ₂ =0.25) et (CH ₄ =0.70 et H ₂ =0.30).....	35
Figure IV.11 : influence d'ajout H ₂ sur les émissions du CO.....	36
Figure IV.12-IV.13 : Fraction massique NO _x pour (CH ₄ =1 et H ₂ =0) et (CH ₄ =0.95 et H ₂ =0.05).....	37
Figure IV.14-IV.15 : Fraction massique de NO _x pour (CH ₄ =0.85 et H ₂ =0.15) et (CH ₄ =0.80 et H ₂ =0.20.....	38
Figures IV.16-IV.17 : Fraction massique de NO _x pour (CH ₄ =0.75 et H ₂ =0.25) et (CH ₄ =0.70 et H ₂ =0.30).....	39
Figure IV.18 : influence des températures sur la fraction massique de NO _x	40
Figure IV.19 : influence des températures sur la fraction massique de CO.....	41
Figure IV.19 : influence des températures sur la fraction massique de CO.....	41
Figure IV.20 : influence des températures d'admission sur la température de la combustion.....	42
Figure IV.21: Pour T _{air} =300k.....	42

Figure IV.22: Pour $T_{\text{air}} = 400\text{k}$	43
Figure IV.23: Pour $T_{\text{air}} = 500\text{k}$	43
Figure IV.24: Pour $T_{\text{air}} = 600\text{k}$	43
Figure IV.27 : Pour $T_{\text{air}} = 900\text{ k}$	44
Figure IV.6 : Scène de vecteur de vitesse.....	45
Figure IV.7 : Profile de température (Non premixed / Partially premixed).....	46
Figure IV.8 : Profile de mass fraction ch_4 (Non premixed / Partially premixed).....	47
Figure IV.9 : Profile de CO_2 mass fraction (Non premixed / Partially premixed).....	47
Figure IV.10: Profile de H_2O mass fraction (Non premixed / Partially premixed).....	48
Figure IV.11 : Profile de N_2 mass fraction (Non premixed / Partially premixed).....	48
Figure IV.12 : Profile de O_2 mass fraction (Non premixed / Partially premixed).....	49
Figure IV.13 : Profile de CO mass fraction (Non premixed / Partially premixed).....	49
Figure IV.14 : Profile de NO mass fraction (Non premixed / Partially premixed).....	50

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Conditions aux limites.....	24
Tableau III.2 : Conditions de limites.....	24
Tableau III.3 : Tableau des paramètres de conditions initiales.....	25
Tableau III.4 : Tables des paramètres du Primary air inlet.....	26
Tableau III.4 : Tables des paramètres du Scondary air inlet.....	26
Tableau III.6 : Tables des paramètres du Fuel inlet.....	29

Abbreviations

- CFD** : Computational fluid dynamics
- EDM** : Eddy dissipation model
- RANS** : Reynolds average Navier –Stockes
- EDC** : Eddy dissipation Concept
- JHK** : Jet in a Hot Cow flow

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Polluants

I.1. Polluants	3
I.2.1. monoxyde de carbone.....	3
I.2.2. Monoxyde et dioxyde d'azote.....	3
I.3.Effets des oxydes d'azote sur la santé et sur l'Environnement.....	4
I.4.Réduction des émissions des NOx.....	5

Chapitre II : Combustion Sans Flamme

II.1. Introduction	6
II.2. Définition de la combustion sans flamme	7
II.3. Caractéristiques de la combustion sans flamme :	7
II. 4.Qu'est-ce qu'une combustion (MILD) ?.....	10
II.5.Type de la combustion sans flamme.....	10
II.5.1Combustion vive et combustion lente.....	10
II.5.2Combustion spontanée	11
II.5.Technique de La combustion sans flamme.....	11
II.6.Applications.....	19

Chapitre III :Simulation

III.1. Introduction	21
III.2 .ANSYS Fluent	21
III.3.Description du problème.....	21
III.4.Maillage et conditions aux limites	23

III.4.1 Condition aux limites(four).....	24
III.4.2.Condition Initial et limite (turbine).....	24
III.5. Géométrie et Maillage	27
III.6. ANSYS Design Modeler.....	28
III.7.Etude de Maillage optimale	29

Chapitre IV: Résultats et Discussions

IV.1.Introduction.....	30
IV.2.Validation des modèles utilisés.....	30
IV.2.1. Validation des profils de Température.....	30
IV.2.1. Validation des profils de la fraction massique de CO ₂	31
IV.2.1. Validation des profils des fractions massiques d'O ₂	32
IV.3.Étude de l'influence de la composition du mélange réactif de CH ₄ et H ₂	33
IV.3.1.Effet de l'ajout de H ₂ sur l'apparition du CO.....	33
IV.3.2. Effet de l'ajout de H ₂ sur l'apparition du NO _x	35
IV.4.Etude de l'influence de la température d'admission	38
IV.4.1.Influence sur l'apparition de NO _x	38
IV.4.2.Influence sur l'apparition de CO	39
IV.4.3. Influence sur la température du mélange.....	40
IV.5. Discussion des Résultats de la turbine	45
Conclusion Générale.....	51

Introduction générale

Introduction générale :

Les installations de combustion sont parmi les principales sources d'émissions d'oxyde d'azote (NO_x) et de monoxyde de carbone (CO).

Les oxydes d'azote ont un impact direct sur la santé humaine et détruisent la couche d'ozone, alors que le monoxyde de carbone se forme en CO_2 et le dioxyde de carbone est un des principaux gaz à effet de serre. Puisque qu'aucune technologie n'est disponible pour détruire le dioxyde de carbone présent dans les fumées, une solution temporaire est sa capture et sa séquestration.

Cependant, la capture et la séquestration restent des solutions curatives à court terme. Il y a des alternatives préventives existent : réduire la consommation de combustibles fossiles, et/ou utiliser des combustibles dits (alternatifs) contenant moins d'atomes de carbone.

En récupérant l'énergie des fumées pour préchauffer l'air de combustion, la consommation de combustible peut être réduite de manière significative. Cependant, le préchauffage de l'air de combustion conduit à une augmentation de la température adiabatique de flamme et donc à une augmentation importante des émissions d'oxyde d'azote. L'étagement de l'air de combustion ou du combustible permet de réduire les émissions de NO_x et CO grâce à des zones de combustion globalement à températures plus faibles. Cet étagement, poussé à l'extrême en séparant les injections de combustible et de comburant, permet aux réactifs d'être dilués avant d'interagir. C'est pourquoi ce régime est appelé combustion sans flamme (ou combustion diluée). Dans cette configuration, les émissions de NO_x et CO sont très faibles.

La combustion sans flamme est donc un régime de combustion innovant et prometteur puisqu'il permet à la fois de réduire les émissions de NO_x et la consommation de combustible. Les...industriels fonctionnent avec des brûleurs dits à combustion sans flamme, principalement dans la sidérurgie. La combustion sans flamme est donc un régime stable parfaitement maîtrisé, en revanche, ses caractéristiques physico-chimiques sont loin d'être entièrement connues. C'est pourquoi, depuis quelques années, les recherches sont très actives dans ce domaine[1].

Le travail que nous représentons dans ce mémoire est subdivisé en quatre (4) chapitres et une conclusion générale :

- Le premier est consacré à Les polluants de l'air d'origine industrielle et les effets de la pollution sur la santé.
- Le deuxième Généralité sur la combustion sans flamme.
- Le troisième chapitre Simulation.
- Le quatrième chapitre les résultats expérimentaux et discussions.
- La conclusion générale sur l'ensemble de travail, viendra clore notre étude.

Chapitre I : polluants

I.1 Introduction :

Les procédés de combustion, omniprésents dans les secteurs industriels et les transports, génèrent plusieurs polluants atmosphériques majeurs. Parmi eux, le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂) et les oxydes d'azote (NO_x) se distinguent par leurs effets particulièrement néfastes sur la santé humaine, les écosystèmes et le climat. Face à la gravité de leurs impacts, notamment en milieu urbain, la réduction de leurs émissions est devenue une priorité dans les politiques environnementales.

I.2 Les Polluants :

Le monoxyde de carbone est un gaz toxique il se forme en CO₂ et le dioxyde de carbone est le principal gaz à effet de serre (**GES**), quant aux oxydes d'azote, ils ont des effets négatifs sur l'écosystème (pluies acides, pollution photochimique, eutrophisation), sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique ainsi que sur la santé humaine. Ces deux espèces sont les principaux polluants émis par les installations de combustion. C'est pourquoi, les travaux de recherche visant à diminuer les émissions de NO_x et de CO₂ lors de la combustion sont particulièrement importants, d'autant plus que le contexte réglementaire est de plus en plus exigeant. Différents accords internationaux (protocole de **Göteborg**, accords de **Kyoto**, directives européennes) amènent les états à réduire de manière significative leurs émissions de polluants atmosphériques [2].

1.2.1. Le monoxyde de carbone :

Le monoxyde de carbone est le plus simple des oxydes du carbone. La molécule est composée d'un atome de carbone et d'un atome d'oxygène. Ce corps composé est à l'état gazeux dans les conditions normales de température et de pression.[3]

Le CO est produit lors de la combustion incomplète de composés contenant du carbone, il est incolore, non détectable par l'odeur, très toxique. La diffusion du CO est très rapide. Il disparaît rapidement dès que l'on s'éloigne d'une source d'émission [4]. Cela tient au fait que le CO a une densité voisine à celle de l'air [5].

1.2.2. Monoxyde et dioxyde d'azote :

L'azote (N) et l'oxygène (O) entrent en réaction dans les conditions de hautes températures et de pression des moteurs pour former du monoxyde d'azote (NO)

Une fois rejeté dans l'atmosphère, NO s'oxyde pour former du dioxyde d'azote (NO₂).

Ils proviennent surtout des combustions émanant des centrales énergétiques et des véhicules. Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂) font l'objet d'une surveillance attentive dans les centres urbains où leur concentration dans l'air présente une tendance à la hausse compte tenu de l'augmentation forte du parc automobile [6]

1.3.Effets des oxydes d'azote sur la santé et sur l'Environnement :

➤ Effets sur la santé :

Le NO₂ est un gaz irritant qui pénètre dans les fines ramifications des voies respiratoires.

- Les études sur les populations humaines indiquent que l'exposition à long terme au NO₂, aux niveaux actuellement observés dans les plus grandes agglomérations, peut réduire la fonction pulmonaire et accroître le risque de symptômes respiratoires tels que la bronchite aiguë, la toux et les glaires
- Les personnes asthmatiques et les enfants en général sont considérés comme étant plus vulnérables à l'exposition au NO₂
- Plusieurs études ont démontré que l'exposition au NO₂ augmente les réactions allergiques aux pollens inhalés [7].

➤ Effet sur l'environnement :

Le dioxyde d'azote se transforme dans l'atmosphère en acide nitrique, qui retombe au sol et sur la végétation. Cet acide contribue, en association avec d'autres polluants, à l'acidification des milieux naturels. Le NO₂ participe ainsi aux phénomènes de pluies acides.

- Effets sur les végétaux : les effets négatifs des oxydes d'azote sur les végétaux sont la réduction de la croissance, de la production et de la résistance aux pesticides.
- Effets sur les matériaux : les oxydes d'azote accroissent les phénomènes de corrosion.

Le NO₂ est également un précurseur de l'ozone (O₃) qui est, en basse altitude, un composé néfaste pour la santé humaine et l'environnement [7].

1.4. Réduction des émissions des NO_x :

Cet état de l'art des techniques de réduction de polluants regroupe les techniques existantes, émergentes ou en développement pour les fours de réchauffage sidérurgiques. On peut classer les différentes techniques en deux catégories :

- **Les techniques curatives (mesures dites secondaires) :** les polluants sont éliminés à la sortie
- **Les techniques préventives (mesures dites primaires) :** le processus est modifié pour éviter la formation de polluants. Seuls les appareils de combustion seront abordés ici. On peut cependant citer d'autres méthodes de réduction comme l'optimisation de la conduite des fours ou l'amélioration de l'étanchéité pour éviter les infiltrations d'air, génératrices de NO_x.

Les techniques préventives sont les plus utilisées car elles ont toujours devancé les réglementations sur les émissions de polluants [8].

Chapitre II :
Combustion Sans
Flamme.

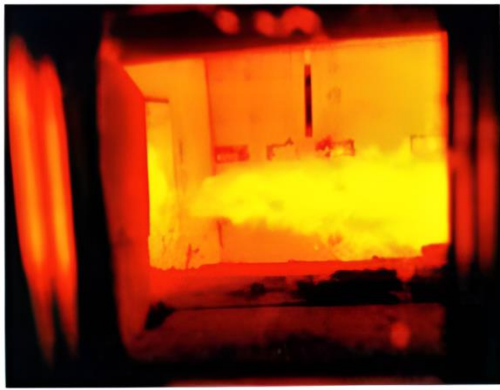
II.1.Introduction :

La combustion a eu au XIXe siècle, et plus encore au XXe siècle, de nombreuses applications industrielles (transports, chauffage, production industrielle, production d'électricité...). Cependant, elle conduit à une émission significative de différents polluants nocifs pour les hommes et la nature, tels que le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et le dioxyde de carbone, qui est un gaz à effet de serre. L'augmentation de la population mondiale a amplifié ces effets, et a induit une augmentation de la consommation de combustibles fossiles ainsi qu'une diminution du stock mondial. De multiples réglementations limitant les émissions de polluants ont été élaborées. Maints travaux scientifiques en ont découlé, afin d'améliorer le rendement et la qualité des processus de combustion.

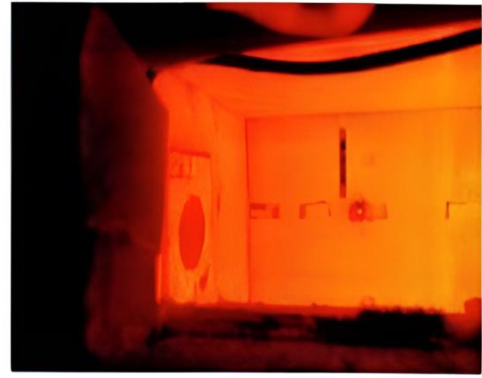
II.2.Définition de la combustion sans flamme :

Une combustion plus propre avec un minimum de l'oxyde d'azote et de soufre est importante afin d'éviter les pluies acides et des effets néfastes sur la santé. Également la réduction de dioxyde de carbone est devenue un sujet d'intérêt dans la discussion sur la réduction des effets du réchauffement climatique [9].

La combustion sans flamme est l'une des technologies de combustion qui se développe le plus rapidement .Ceci est dû aux très faibles taux de polluants émis et aux économies en combustible que permet cette technologie, atouts indéniables dans le contexte énergétique actuel : la hausse du prix de l'énergie fossile et les normes antipollution de plus en plus sévères expliquent l'engouement pour ce mode de combustion très prometteur. Les applications actuelles de la combustion sans flamme sont les fours industriels (verre, acier, céramiques). affirment que si ce procédé était appliqué à l'ensemble des fours industriels du Japon, la consommation nationale totale en énergie diminuerait de 5% [10].



Conventional Flame - 1.5 MW
(a)



Diluted Flame - 1.5 MW
(b)

Figure II.1: Comparaison d'une combustion avec et sans flamme [11] .

II.3. Les caractéristiques de la combustion sans flamme :

La combustion sans flamme se caractérise à la différence d'une combustion classique par :

- Gradients de température faibles.
- Très peu polluants.
- Economie de combustible.
- Peu bruyant.
- Absence de flamme visible.

Ce régime est obtenu par la dilution et le préchauffage de l'un des deux réactifs généralement l'air au-delà de la température d'auto-inflammation. On utilise le méthane et le gaz Naturel comme un combustible. Si les étapes de ce régime n'est pas respecté, on va avoir l'un des cas suivants :

- 1) Combustion avec l'air à haute température (HITAC), si le préchauffage est réalisé sans dilution qui est caractérisée par une très haute température.
- 2) Si la dilution se réalise sans préchauffage, on risque de dépasser la limite de l'inflammabilité et le combustible ne brûle pas.
- 3) Cas ou la combustion classique, si aucun des deux procédés n'est utilisé. [9]

Avec une combustion sans flamme, il n'y a pas de front de flamme, pas de flamme visible, pas de détection d'UV ou d'ionisation, et pas de bruit ou de rugissement. [10]

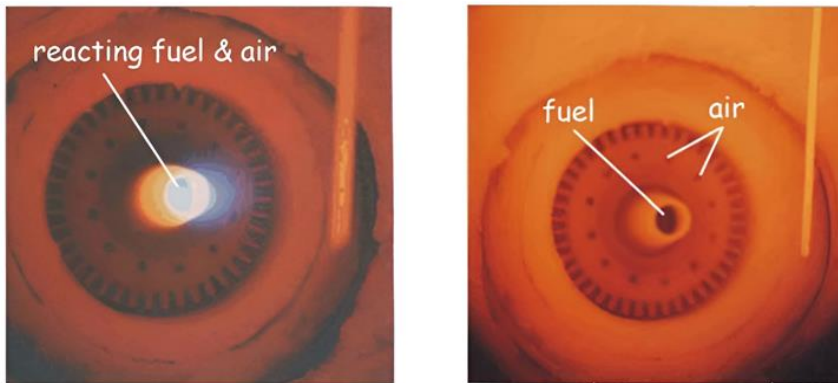


Figure II.2 : Combustion classique en mode flamme à gauche, et combustion sans flamme à droite [12].

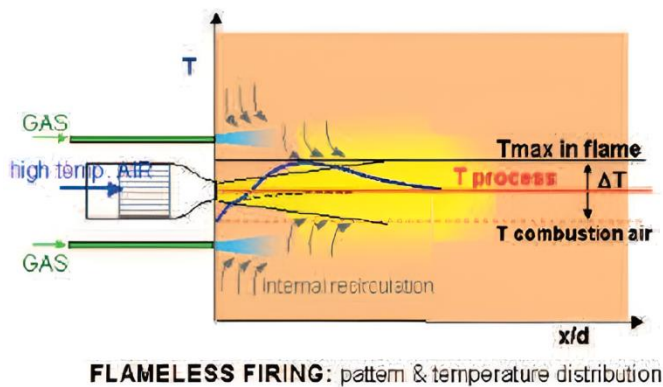
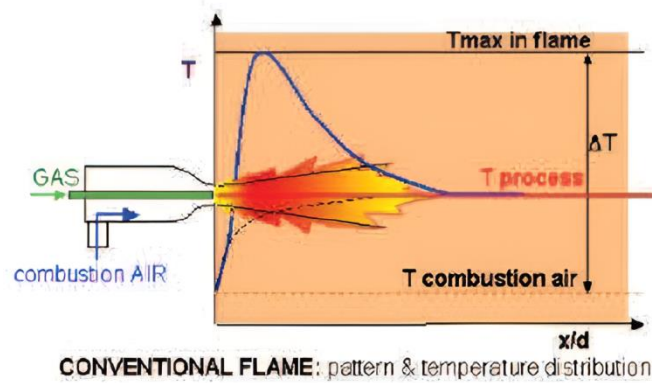


Figure II.3 : Comparaison des deux modes de combustion : classique et sans flamme [11]

Les schémas de la **Figure (II.3)** comparent le mode de combustion sans flamme au mode de combustion classique d'un brûleur. Dans une combustion classique, l'air et le combustible sont introduits dans la chambre de combustion de telle façon à favoriser rapidement leur mélange et produire ainsi une flamme stable attachée au brûleur. Dans le mode de combustion sans flamme, les jets d'air et de combustible sont séparés et de fortes impulsions. Ils vont alors entraîner et se mélanger avec une grande quantité de gaz brûlés présents dans le four avant de se rencontrer et de réagir. La combustion a lieu donc dans un environnement dilué à faible concentration d'oxygène et à une température proche de la température des gaz brûlés et supérieure à la température d'auto-inflammation **Figure II.4**. Elle occupe un plus large volume, les températures sont plus faibles et plus homogènes, sans pics remarquables, ni flamme visible [14]. D'un point de vue global, les faibles gradients de températures rapprochent ce système d'un

Réacteur parfaitement mélangé (WSR pour Well Stirred Reactor) avec une combustion volumique distribuée . [12]

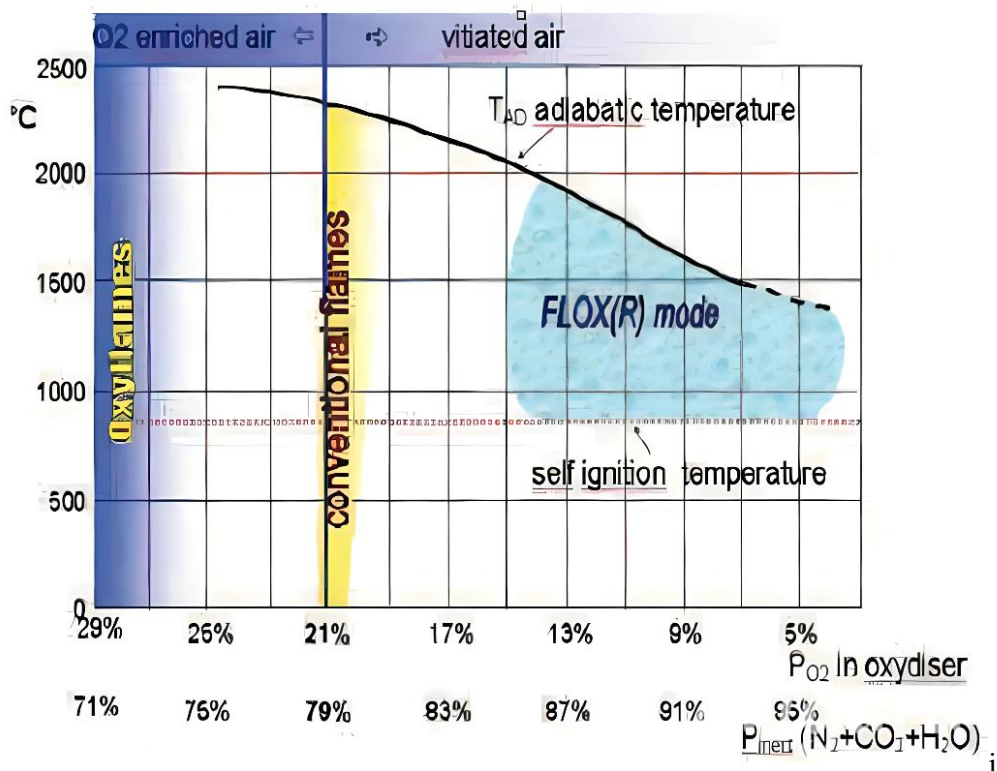


Figure II.4 : Définition de la combustion sans flamme fonction de la température de préchauffage de l'air et du taux d'oxygène [11]

II.4. Qu'est-ce qu'une combustion (MILD) ?

Pour améliorer l'efficacité de la combustion, le préchauffage des réactifs par les produits chauds est généralement effectué. la dénomination Technologie de combustion à haute température (HICOT) désigne toutes les technologies qui préchauffent fortement les réactifs, y compris le carburant; alors que l'acronyme HITAC (Combustion à haute température de l'air) ne se limite qu'aux technologies de préchauffage de l'air. C'est un processus dans lequel la température de l'air est supérieure à la température d'auto-inflammation du mélange. Dans le procédé HITAC avec chambre de combustion à haute température, le front stable de la flamme peut être délibérément supprimé, ce qui donne une combustion sans flamme, incolore et sans flamme (FLOX). Dans ce mode, aucune émission visible n'est détectée dans la zone d'oxydation.

Les conditions caractéristiques qu'il faut assurer pour avoir le régime MILD (faible teneur en oxygène) sont [15]:

-La température des réactifs injectés est plus élevée que celle de l'auto-inflammation du mélange :

$$T_{\text{inj réactif (air)}} > T_{\text{auto-inflammation}}$$

-L'écart maximal de l'augmentation de température pendant la combustion est inférieur à la température d'auto-allumage du mélange dilué :

$$\Delta T_{\text{combustible}} < T_{\text{auto-inflammation}}$$

-Une dilution très forte de l'oxydant qui permet de réduire les émissions [15].

II.5. Type de la combustion sans flamme :

II.5.1 Combustion vive et combustion lente :

La combustion vive est une réaction qui entraîne un dégagement important de calories avec comme conséquences une forte élévation de température et une émission d'un phénomène lumineux (flammes). La combustion lente est une réaction qui entraîne un faible dégagement de calories avec peu d'élévation de température, des phénomènes lumineux presque nuls et une absence totale de flamme. La combustion vive, à l'inverse de la lente consomme rapidement la quantité d'oxygène qui lui est nécessaire.

II.5.2 Combustion spontanée :

La combustion spontanée a lieu sans cause apparente d'échauffement. Certains corps riches en carbone et facilement oxydable produisent de la chaleur sous l'effet de certaines dispositions (amas de chiffons gras, stock de charbon, etc.). L'oxydation peut aussi être engendrée par des micro-organismes (fermentation dans les tas de foin par exemple).

L'oxydation débute lentement, dégageant de la chaleur qui accélère la réaction (réaction exothermique). Cette réaction peut parfois être très vive. [16]

II.6. Technique de La combustion sans flamme :

II.6.1. Préchauffage :

➤ Préchauffage d'air :

Avec les crises énergétiques que le monde a pu connaître depuis quelques décennies, beaucoup d'études ont été lancées afin de trouver de meilleures solutions plus efficaces qui consomment moins d'énergie, tout en produisant moins de polluants, surtout en termes de NO_x , CO_2 , CO et suies.

Cette technique permet de faire des économies en combustible considérable et donc aussi des rejets de dioxyde de carbone moins importants. Cependant dans le cas d'une flamme classique, elle crée beaucoup de NO_x . Dans la combustion sans flamme, le chauffage de l'air assure l'inflammabilité du mélange de combustible, d'air et de gaz brûlés. Il faut toutefois préciser que ce régime peut être obtenu sans préchauffage si le mélange avec les gaz chauds est suffisamment efficace [13][17].

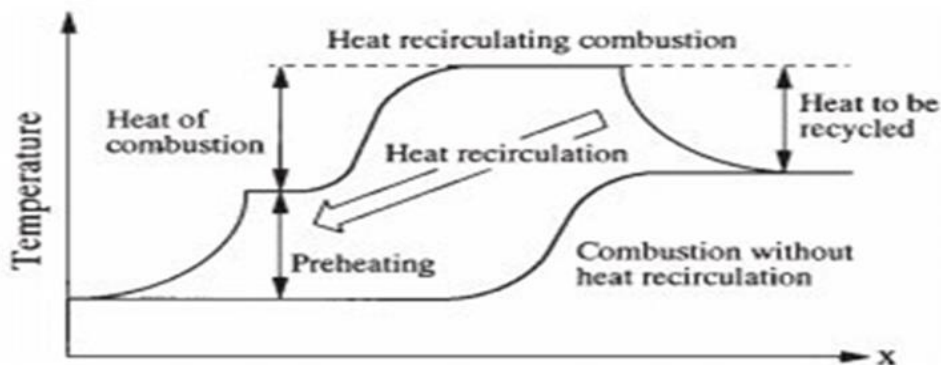
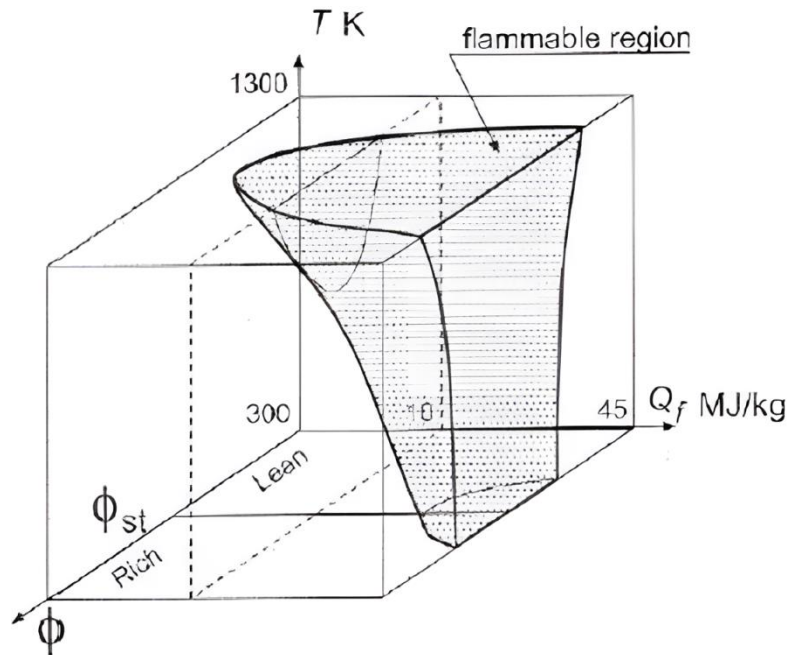


Figure II.5 : Variation de la température avec et sans recirculation de la chaleur, dans un système adiabatique 1D [13]

➤ **Domaine d'inflammabilité :**

La température d'injection fait varier le domaine d'inflammabilité. Ceci est valable pour une combustion de type pré-mélangée et de type diffusive. La figure montre clairement cette tendance. De plus, il est possible de brûler des carburants à faible dégagement calorifique qui étaient inflammables à température ambiante



FigureII.6: Domaine d'inflammabilité fonction du pouvoir calorifique du combustible (Q_f), de la température initiale des réactifs (T_i), et de la richesse (ϕ)[13].

Pour ce faire, plusieurs méthodes sont possibles, mais sans qu'elles ne soient toutes capables d'offrir la même efficacité. Flamme et al ont défini le rendement de la combustion avec préchauffage de l'air comburant par régénérateur comme étant:

$$\eta = \frac{h_{1,c} + h_{air} - h_{Fflue\ gas.inlet}}{h_{1,c}}$$

Et le taux relatif de préchauffage de l'air comme étant :

$$\varepsilon = \frac{T_{air.outlet} - T_{air.inlet}}{T_{flue\ gas.inlet} - T_{air.inlet}}$$

Avec

$h_{1,c}$: Pouvoir calorifique inférieur du combustible gazeux (MJ/m³).

h_{air} : Enthalpie de l'air préchauffé de combustion (MJ/m³).

$h_{flue\ gas.inlet}$: Enthalpie des fumées à l'entrée du récupérateur de chaleur (MJ/m³).

$T_{air.outlet}$: Température de l'air à la sortie du récupérateur de chaleur (°C).

$T_{air.inlet}$: Température de l'air à l'entrée du récupérateur de chaleur (°C).

$T_{flue\ gas.inlet}$: Température des fumées à l'entrée du récupérateur de chaleur (°C).

Cette technique permet aussi de faire des économies en combustible considérable et donc aussi des rejets de dioxyde de carbone moins importants. Cependant dans le cas d'une flamme classique, elle crée beaucoup de NO_x. Dans la combustion sans flamme, le chauffage de l'air assure l'inflammabilité du mélange de combustible, d'air et de gaz brûlés.

Permis les systèmes permettant le préchauffage d'air, le bruleur régénératif le plus aboutie et le plus efficace en terme de transfert d'énergie. [10]

II.6.2.Bruleurs :

➤ Récupérateurs :

Ces échangeurs de chaleur tubulaires à contre-courant permettent de préchauffer l'air jusqu'à environ 600 C. Cette limitation est fixée par la tenue thermique des matériaux. En effet, pour des raisons économiques, les échangeurs métalliques sont préférés aux échangeurs en céramique résistant à haute température. **La figure II.7** montre un four équipé d'un récupérateur dans les carreaux de cheminée (conduits acheminant les fumées vers la cheminée). Ces installations sont très compactes car elles s'insèrent directement dans les conduits. Il existe d'autres configurations, ou le récupérateur est installé sur la voute du four, ce qui permet de gagner de la surface au sol. L'air de combustion est entraîné par des

ventilateurs, il passe à travers le récupérateur avant d'être distribuée dans tous les brûleurs par des conduites calorifugées.

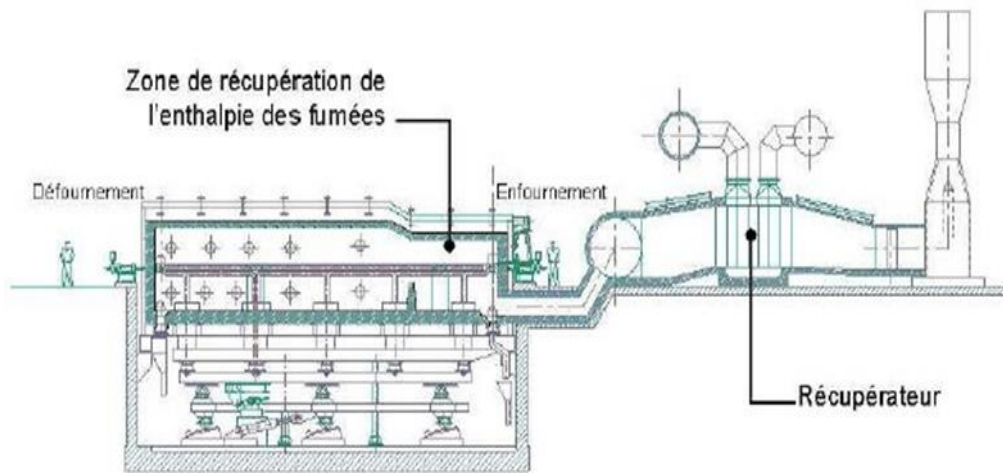


Figure II.7: Four de réchauffage équipée d'une zone de récupération et d'un récupérateur [14]

➤ **Systèmes régénératifs :**

Il s'agit du système de récupération de l'enthalpie des fumées le plus efficace. Il permet de préchauffer l'air à des températures de l'ordre de 1200 C. Cette technologie est employée depuis plus d'un siècle. Elle a été inventée par le britannique Frederich Siemens et était destinée aux fours de verrerie. Les brûleurs dotés d'un système régénératif fonctionnent généralement par paire, et sont équipés chacun de capacités thermiques en matériau réfractaire (« bac régénératif » ou « matrice »). Le fonctionnement est cyclique, et divisé en deux parties. Pendant la première partie du cycle, les produits de combustion sont acheminés dans un des bacs régénératifs pour chauffer la matrice, tandis que l'air de combustion alimente le deuxième brûleur et refroidit son bac régénératifs. Après un certain temps, le cycle se renverse et le réfractaire devenu froid du deuxième bac se réchauffe au contact des produits de combustion **Figure II.11**. Les brûleurs sont donc la moitié du temps en mode combustion et l'autre moitié en mode extraction des fumées [8].

➤ **Utilisation de brûleurs régénératifs :**

Le préchauffage de l'air permet d'augmenter la température adiabatique de flamme, ou température théorique de combustion. C'est la température à laquelle seraient portés les produits de combustion si toute la chaleur dégagée par la réaction était utilisée à les échauffer.

La diminution des émissions de CO₂ engendrée par l'augmentation du rendement est importante, mais au prix d'une augmentation des émissions de NO_x [8].

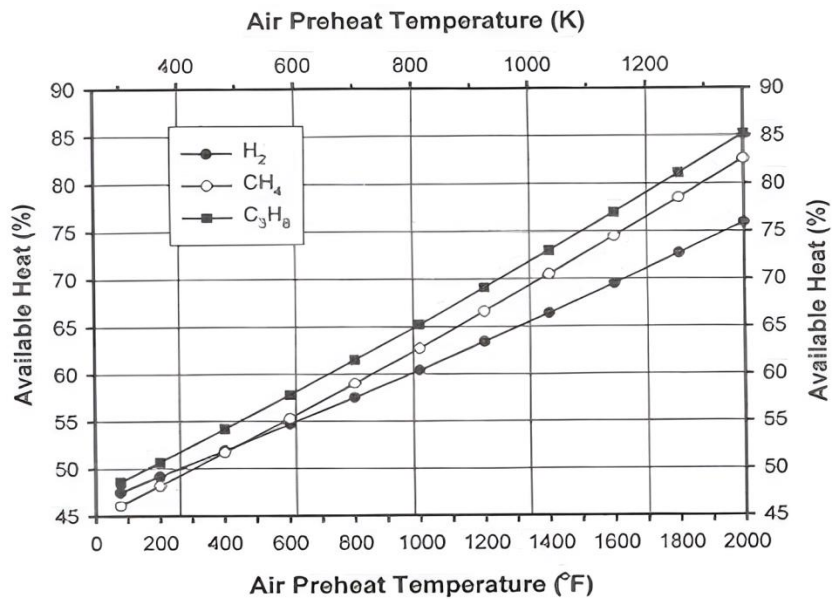


Figure II.8 : Augmentation du rendement de combustion par préchauffage de l'air de combustion[8]

Associé au préchauffage de l'air des brûleurs régénératifs, la combustion sans flamme se trouve être une technologie innovante dans les fours permettant d'associer une très bonne efficacité énergétique et de très faibles émissions de polluants grâce à la séparation des injections de combustible et d'air..

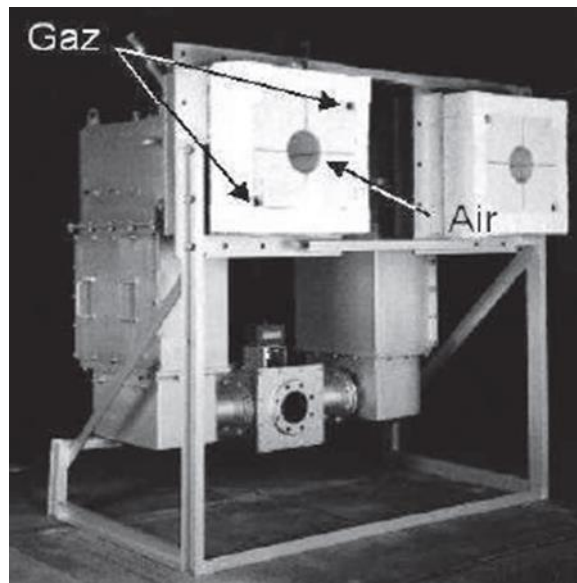
L'utilisation de brûleurs régénératifs dans un four industriels permet de réduire la consommation de combustible. En effet, le préchauffage de l'air de combustion permet une économie d'énergie non négligeable.

On peut distinguer deux types de régénérateur

- Régénérateur à billes céramiques (British Gas, Hotwork International, WS)
- Régénérateur à nids d'abeilles (Nippon Furnace Kogyo).

Par rapport aux régénératifs à billes, les régénératifs à nid d'abeille génèrent des pertes de charge plus faibles. Par ailleurs, la structure en nid d'abeille a un rapport surface /volume important qui favorise la compacité du bloc régénératif et la diminution de la masse du brûleur [18].

Au Japon, des brûleurs de combustion sans flamme existent dans de nombreuses applications industrielles (industries de céramique et d'acier), et sont produits par les compagnies NFK et NKK. Le brûleur NFK HRS. DL (**FigII.9**) est un brûleur régénératif compact, avec des nids d'abeilles en céramique, assurant une récupération très efficace de l'énergie perdue par les fumées. Grâce à sa géométrie consistant en deux jets séparés de gaz de part et d'autre d'un jet central d'air, il peut fonctionner en régime de combustion sans flamme. Ceci permet de réduire considérablement les émissions de NO_x , et d'obtenir une distribution homogène des températures[8].



FigureII.9 : Une paire de brûleurs NFK HRS. DL[8]

Comme illustré à travers ces deux exemples, les brûleurs régénératifs à combustion sans flamme sont basés sur les mêmes caractéristiques quelles que soient leurs géométries : un fort préchauffage de l'air assuré par le système régénératif fonctionnant en mode alternatif et des injections séparées et très éloignées du combustible et du comburant[8].

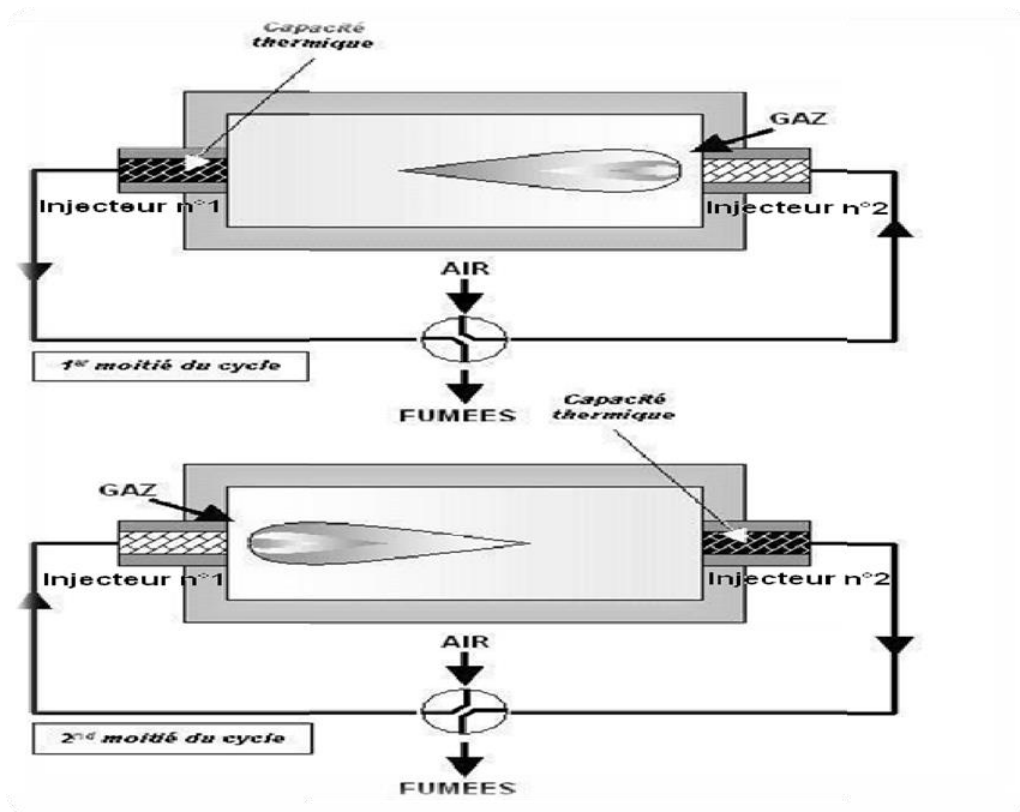
➤ **Fonctionnement :**

Une unité de brûleurs est composée de deux injecteurs comportant chacun une capacité thermique et fonctionnant alternativement comme brûleur ou comme évacuateur. Le fonctionnement est cyclique.

Dans la première moitié du cycle l'injecteur n°1 fonctionne comme injecteur et l'injecteur n°2 comme évacuateur. Au passage de l'injecteur évacuateur, les produits de combustion cèdent leur chaleur à la capacité thermique.

Lors de la seconde moitié du cycle, l'injecteur n°2 fonctionne comme brûleur et l'injecteur n°1 comme évacuateur.

L'air est préchauffé dans le brûleur grâce à la capacité thermique précédemment chauffée et peut atteindre des températures allant jusqu'à 1200°C.



FigureII.10 :Deux cycles d'un couple de brûleurs régénératifs[8]

On peut caractériser le mode de combustion sans flamme d'un brûleur régénératif par :

- Un fort préchauffage de l'air.
- Une forte recirculation interne à l'enceinte du four des produits de combustion entraînant une dilution des réactifs par ceux-ci.
- Un champ de température homogène au sein du four.
- Un bruit de combustion faible.

- Des émissions en monoxyde d'azote réduites.
- Un transfert thermique par voie radiative homogène.
- Une flamme non visible.

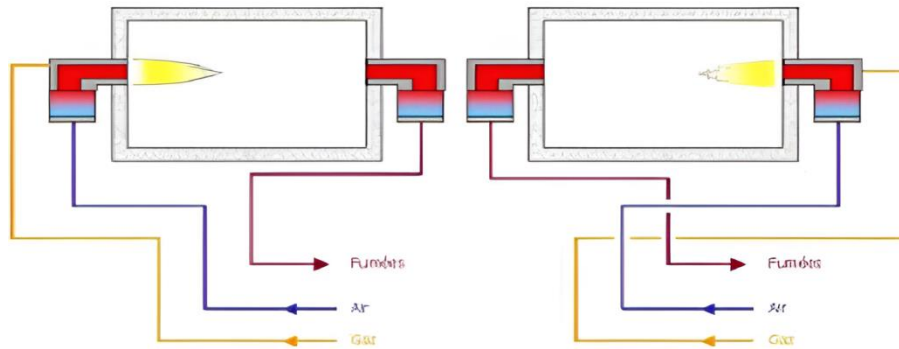


Figure II.11 : Principe de fonctionnement des brûleurs régénératif [13]

De nouveaux équipements fonctionnant suivant ce principe ont été développés. Ce sont les brûleurs autorégénératifs. Ils sont illustrés. Dans ce cas, il n'y a plus qu'un seul brûleur dont la capacité thermique a été divisée en deux capacités distinctes et le système d'inversion est intégré au brûleur.

Le fonctionnement de ce type de brûleur est identique au fonctionnement d'un brûleur régénératif classique. Lors de la moitié du cycle, la moitié des injecteurs d'air évacuent les fumées. Au cours de la seconde moitié du cycle, les injections ayant servi d'évacuation sont utilisées pour injecter l'air qui se réchauffe au passage de la capacité thermique

Les brûleurs régénératifs (REGEMAT 350 FLOXÆ) du constructeur allemand WS possèdent un jet central de combustible, entouré par plusieurs jets d'air.

C'est un brûleur régénératif de puissance nominale de 200 kW qui peut fonctionner en deux modes de combustion. [19]

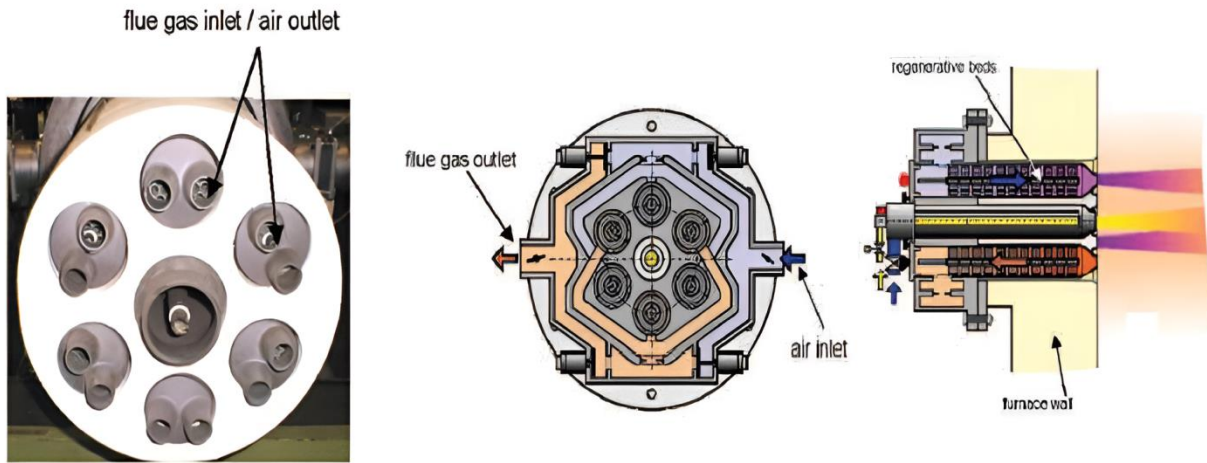


Figure II.12 : Schéma d'un brûleur auto régénératif [8]

II.7.Applications :

II.7.1.Les fours industriels :

Les fours industriels sont la seule application industrielle actuelle de la combustion sans flamme, en particulier au Japon. Le carburant utilisé est du gaz naturel ou du méthane. Les pertes thermiques dues aux charges à chauffer baissent la température des gaz brûlés et la température uniforme obtenue est un bon atout pour ces applications

➤ Industrie céramique :

Il existe un grand potentiel pour de nouvelles technologies de combustion dans l'industrie de la céramique. Cependant, Souvent les processus sont fortement intégrés et les changements exigent beaucoup de recherche et convainquent les Clients à quitter chemins connus.

➤ Industrie du verre :

L'industrie du verre est un émetteur important pour les NO_x . Traditionnellement, l'industrie du verre Régénérateurs, fournissant un préchauffage de l'air de combustion et parfois un préchauffage du carburant. Radical Changements dans les fours de fusion du verre ne sont pas faciles car il n'y a pas d'arrêt de ces fours modifications. Un autre facteur est que de nombreux aspects sont basés sur l'empirisme plutôt que sur Connus et compris. Il est donc difficile de prévoir quel serait l'effet des changements Combustion sur le produit. Mais compte tenu des coûts élevés pour le traitement post-gaz d'échappement, Tous les efforts devraient être faits pour trouver des mesures primaires pour la réduction des NO_x .

➤ **Industrie chimique :**

Il existe des procédés chimiques à forte intensité énergétique. L'oxydation sans flamme a un grand potentiel, Principalement pour les processus pétrochimiques et de réforme. [20]

II.7.2.les turbines à gaz :

La combustion sans flamme (ou combustion MILD - Moderate or Intense Low-oxygen Dilution) dans les turbines à gaz est une technologie prometteuse pour améliorer la performance et réduire les émissions polluantes dans plusieurs secteurs clés :

➤ **Production d'électricité :**

Les centrales électriques utilisant des turbines à gaz bénéficient grandement de la combustion sans flamme. Cette technique permet de réduire drastiquement les émissions de NO_x et de CO₂ tout en maintenant une combustion stable et efficace. Elle favorise une température de combustion uniforme et plus basse, limitant ainsi la formation de polluants thermiques.

➤ **Propulsion aéronautique :**

Dans le secteur aéronautique, l'intégration de la combustion sans flamme dans les moteurs à turbine permet de diminuer les émissions polluantes tout en conservant la poussée nécessaire. Cette technologie aide également à réduire le risque de formation de points chauds, ce qui améliore la durée de vie des composants du moteur.

➤ **Cogénération (production combinée de chaleur et d'électricité) :**

Les systèmes de cogénération équipés de turbines à gaz avec combustion sans flamme optimisent la conversion énergétique en réduisant les pertes et en limitant les émissions de NO_x. Cela permet une exploitation plus durable et économique des installations industrielles et urbaines.[21]

Chapitre III :

Simulation.

III.1.Introductions :

Dans ce chapitre on présente les résultats des simulations numériques, effet dosage du Méthane et hydrogène (Fraction massique du CH_4 et H_2), ainsi l'influence de la température D'admissions sur les émissions polluantes CO , NO_x

Les modèles utilisés sont EDM pour la combustion et $k-\varepsilon$ pour la turbulence .Les paramètres tels que la température, la vitesse, distribution de CH_4 , l'apparition de NO_x thermique et la Création du CO seront analysés en détail

III.2.ANSYS Fluent :

ANSYS Fluent est l'outil logiciel de dynamique des fluides informatiques (CFD) le plus puissant disponible, vous permettant d'aller plus loin en optimisant les performances de votre produit. Fluent comprend des capacités de modélisation physique bien validées pour fournir des résultats rapides et précis sur la plus large gamme d'applications CFD et multiphasique.

III.3.Description du problème :

Le code ANSYS Fluent a été utilisé pour simuler le transport d'écoulements réactifs dans un brûleur de type JHC. La configuration géométrique considérée est illustrée sur la figure (III.1).

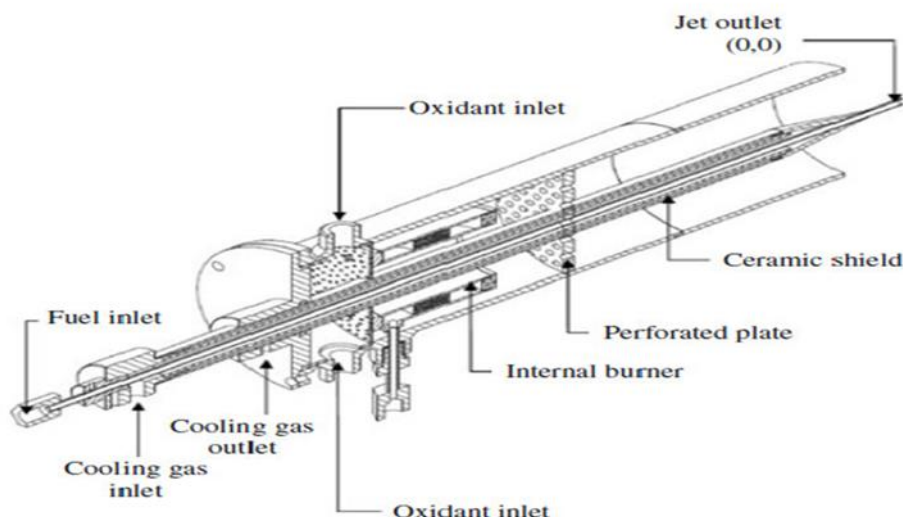


Figure III.1: schéma un brûleur JHC (Jet in a Hot Cow flow)

Le brûleur Jet-in-Hot Coflow, modélisé et étudié expérimentalement par Dally et al., comprend une buse de 4,25 mm de diamètre intérieur injectant un mélange de méthane (CH_4) et d'hydrogène (H_2) à une vitesse de 33,54 m/s, avec une paroi de 0,2 mm d'épaisseur. Cette buse est située au centre d'un disque, dans un espace annulaire de 82 mm de diamètre intérieur et de 2,8 mm d'épaisseur, assurant un flux d'oxydant quasi uniforme dans un coflow chaud. L'ensemble du système est installé dans un tunnel d'air permettant de maintenir des conditions de température et de vitesse similaires à celles du coflow, avec une richesse équivalente de 0,85 et un nombre de Reynolds déterminé.

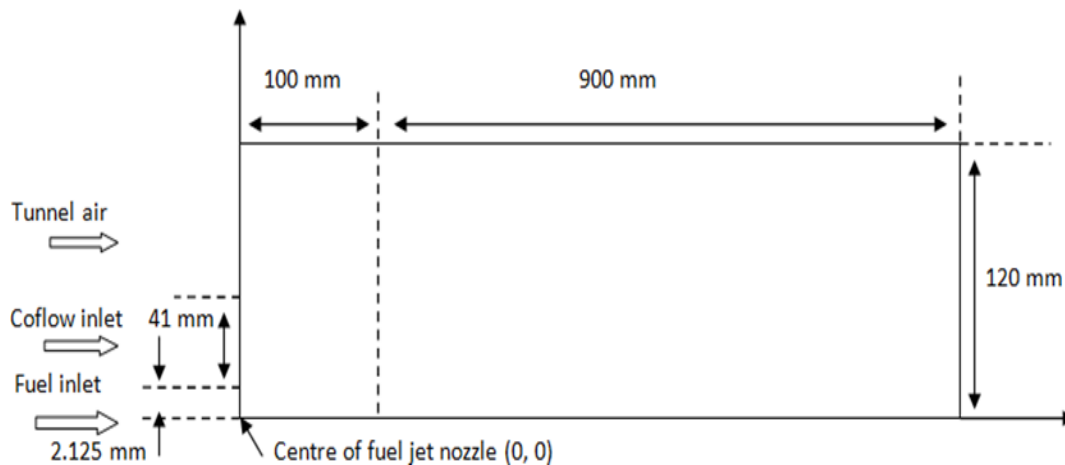


Figure III.2 : Les conditions aux limites

Par ailleurs, la chambre de combustion étudiée (figure III.2) fait partie d'une turbine à gaz de type heavy duty utilisée pour la production d'électricité dans une centrale à cycle combiné fonctionnant au gaz naturel. Dans ce système, les gaz chauds générés par la combustion dans la turbine à gaz sont utilisés pour entraîner une turbine à vapeur. Le système de combustion est constitué de 18 chambres de combustion disposées de manière circulaire. Chaque chambre possède une chemise de combustion, une pièce de transition dirigeant les gaz chauds vers la turbine, ainsi que des injecteurs qui acheminent le gaz combustible à travers des orifices calibrés favorisant une forte turbulence afin d'optimiser le mélange entre l'air comprimé issu du compresseur et le carburant.

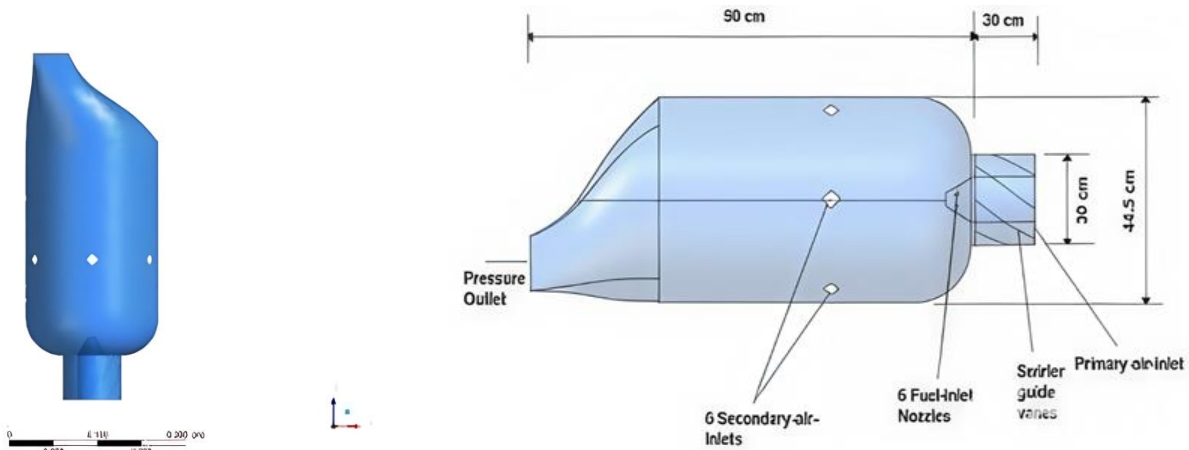


Figure III.3 : Vue d'ensemble de la géométrie schématiser et en 3D

La géométrie a été simulée et exécutée à l'aide du logiciel CFD Ansys Fluent qui offre nombre de modèles de combustion permettant une définition précise et détaillée des paramètres qui définissent le problème.

Le programme fournit des modèles spécifiques pour prédire les émissions de NO_x dans la combustion partiellement pré mélangée et non mélangée.

Les deux modèles choisis sont NO_x Prompt Model où se caractérise par la formation de NO_x sur une courte période de temps, se produisant principalement dans les régions riches en carburant, et NO_x Thermal Model par la méthode Zeldovich.

III.4. Maillage et conditions aux limites :

III.4.1 Condition aux limites (four) :

Dans cette partie on va définir les paramètres utilisés lors de la simulation numérique ainsi que les conditions aux limites imposées. Les conditions aux limites sont tirées à partir des données expérimentales des Dally et al. Le Velocity inlet été apportées au coflow, fuel jet, tunnel air et pressure outlet pour la sortie (outlet). Une frontière axisymétrique est choisie sur l'axe de brûleur. Les différentes conditions sans schématisées sur le tableau suivante :

Tableau III.1 : Les conditions aux limites.

Entrée du carburant(Fuel inlet)	Entrée de vitesse (Velocity Inlet)
Air de tunnel (Tunnel air)	Entrée de vitesse (Velocity Inlet)
Entrée du COflux (Coflow inlet)	Entrée de vitesse
Sortie (Outlet)	Sortie de pression (Pressure Outlet)
Axe de symétrie (Axis)	Axe de symétrie (Axis)
Parois (Wall)	Parois (Wall)

Tableau III.2: Les conditions de limites.

Jet de carburant (Fuel jet)					CO flux oxydant(Oxidant coflow)					Air du tunnel (Tunnel air)		
Q(kg/s)	U(m/s)	T(K)	CH ₄ (%)	H ₂ (%)	U(m/s)	T(K)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ O(%)	U(m/s)	T(K)	O ₂ (%)
3,12×10 ⁻⁴	33,44	305	88	11	3,2	13000	30	5,5	6,5	3,2	294	23,2

III.4.2 Condition Initial et limite (turbine) :

➤ **Condition initial :**

En pris considération au début de la simulation, la chambre de combustion était remplie uniquement d'air dans les conditions par défaut Tableau

Tableau III.3 : Tableau des paramètres de conditions initiales

Paramètre	Valeur
Gravite	0.0, 0.0, 0.0 m/s (Négliger)
Densité de référence	1.225 Kg/m ³
Pression de référence	101325 Pa

➤ **Condition aux limites:**

Pour appliquer les conditions limites la géométrie de chambre de combustion ont été divisées dans les régions correspondantes (fuel inlet – primary air inlet – secondary air inlets – outlet), Les inlets ont été modélisés comme Mass-flow-inlets et outlet comme pressure outlet, et les autres régions ont été définis comme wall.

Les paramètres des conditions aux limites tels que débit massique, la fraction molaire des espèces, la pression et la température, étaient connus à partir des conditions de fonctionnement de la turbine à gaz ou utilisaient les paramètres par défaut du logiciel et variaient selon le type de condition choisi pour chaque région.

Tableau III.4: Tables des paramètres de l'entrée air primaire.

Condition aux limites – Entrée air primaire		
Débit massique	625 Kg/s	
Pression	18 bar	
Fraction molaire des espèces	O ₂	0.21008
	N ₂	0.78992
Température	739K	
Intensité turbulente	5%	
Diamètre hydraulique	0.05m	

Tableau III.4: Tables des paramètres de l'entrée d'air secondaire.

Condition aux limites – Entrée d'air secondaire		
Débit massique	50Kg /s	
Pression	18 bar	
Fraction molaire des espèces	O ₂	0.21008
	N ₂	0.78992
Température	739K	
Intensité turbulente	5%	
Diamètre hydraulique	0.02 m	

Tableau III.6 : Tables des paramètres de l'entrée de carburant

Condition aux limites – Entrée de carburant		
Débit massique	16.5 Kg/s	
Pression	34 bar	
Fraction molaire des espèces	CO ₂	0.003
	CH ₄	0.965
	H ₂ O	0
	C ₂ H ₆	0.017
	C ₃ H ₈	0.001
	C ₄ H ₁₀	0.001
	O ₂	0
	N ₂	0.013
Température	433K	
Intensité turbulente	10%	
Diamètre hydraulique	0.01 m	

III.4.Géométrie et Maillage :

La géométrie du brûleur a été créée à l'aide de Design Modeler, un outil permettant de convertir la conception physique en une représentation informatique précise en 2D ou 3D, facilitant ainsi la modélisation pour la simulation numérique. Dans le cas de la simulation bidimensionnelle, une structure 2D a été utilisée, comme illustré sur la figure suivante, pour simplifier le modèle tout en conservant les caractéristiques essentielles du flux et de la géométrie du brûleur :

A)Four :



Figure III.4 : La géométrie du brûleur 2D

B)Turbine :

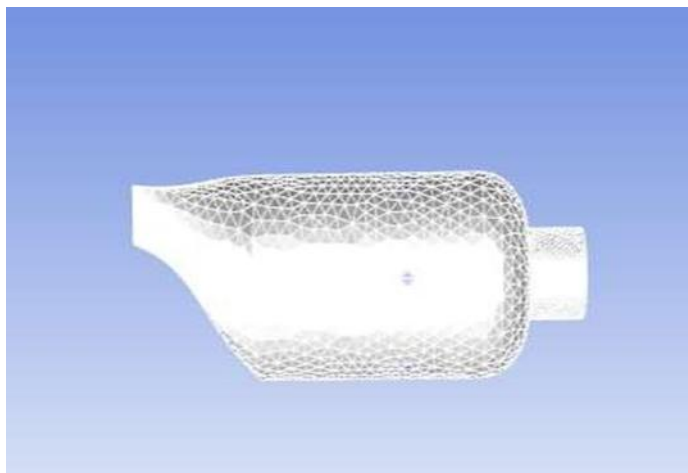


Figure III.5 : Maillage de la géométrie

III.6.ANSYS Design Modeler :

Un outil de préparation de la géométrie d'usage général qui est intégré dans ANSYS Workbench. Ce programme est principalement utilisé pour préparer des modèles de géométrie CAO pour analyse par d'autres outils basés Workbench.

La génération du maillage a été accomplie à l'aide du Maillage (Mesh) , un maillage est une partition de l'espace ou d'un domaine en cellules appelées éléments.

Plusieurs cas de la simulation numérique ont été testés, afin d'atteindre une solution indépendant du grille .Au cours de l'adaptation, chaque cellules carrée va se diviser en quatre sous cellules carrées avec des dimensions identique .l'adaptation a été effectuée sur la zones du domaine comportant des gradients important de vitesse, température ou autres variables régissant sur les flammes. On a commencé avec 14580 nœuds, 20682,29884, 36176, 45144, 59224,68400 et enfin 79050 nœuds. Le maillage adapté comporte 68400 nœuds figure(III.6).

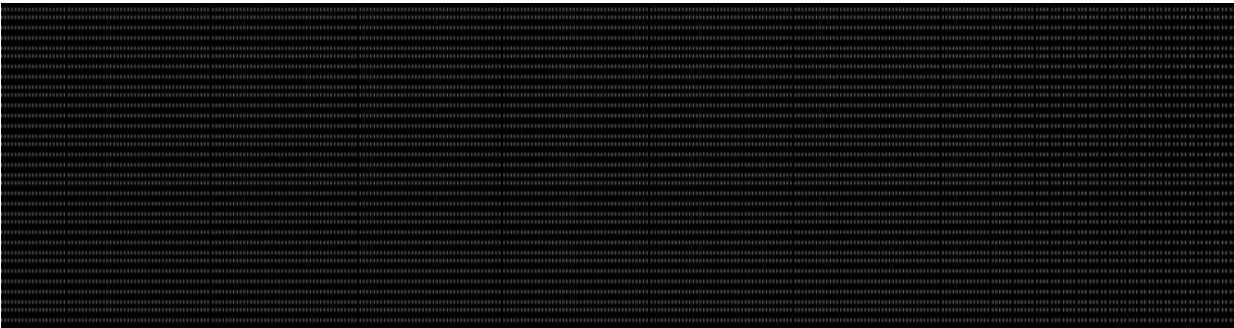
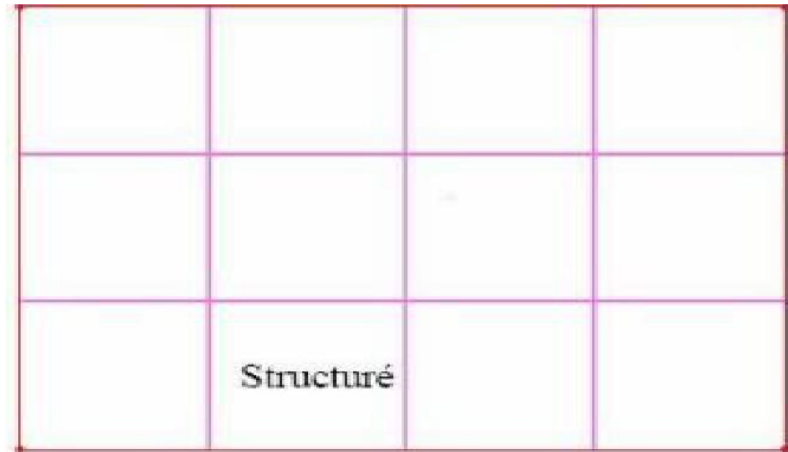


Figure III.6: structure de maillage(Four)

C'est le type de maillage utilisé dans notre configuration, avec un nombre de nœuds égale à 4805 :



FigureIII.7 : maillage structuré(Turbine)

III.7.Etude de Maillage optimale :

Tableau III.7: Les nombres des nœuds.

	Maillage N°1	Maillage N°2	Maillage N°3	Maillage N°4	Maillage N°5	Maillage N°6	Maillage N°7	Maillage N°8
Nœuds	14580	20682	29884	36176	45144	59224	68400	79050

Chapitre IV :
Résultats et
Discussions.

IV.1.Introduction :

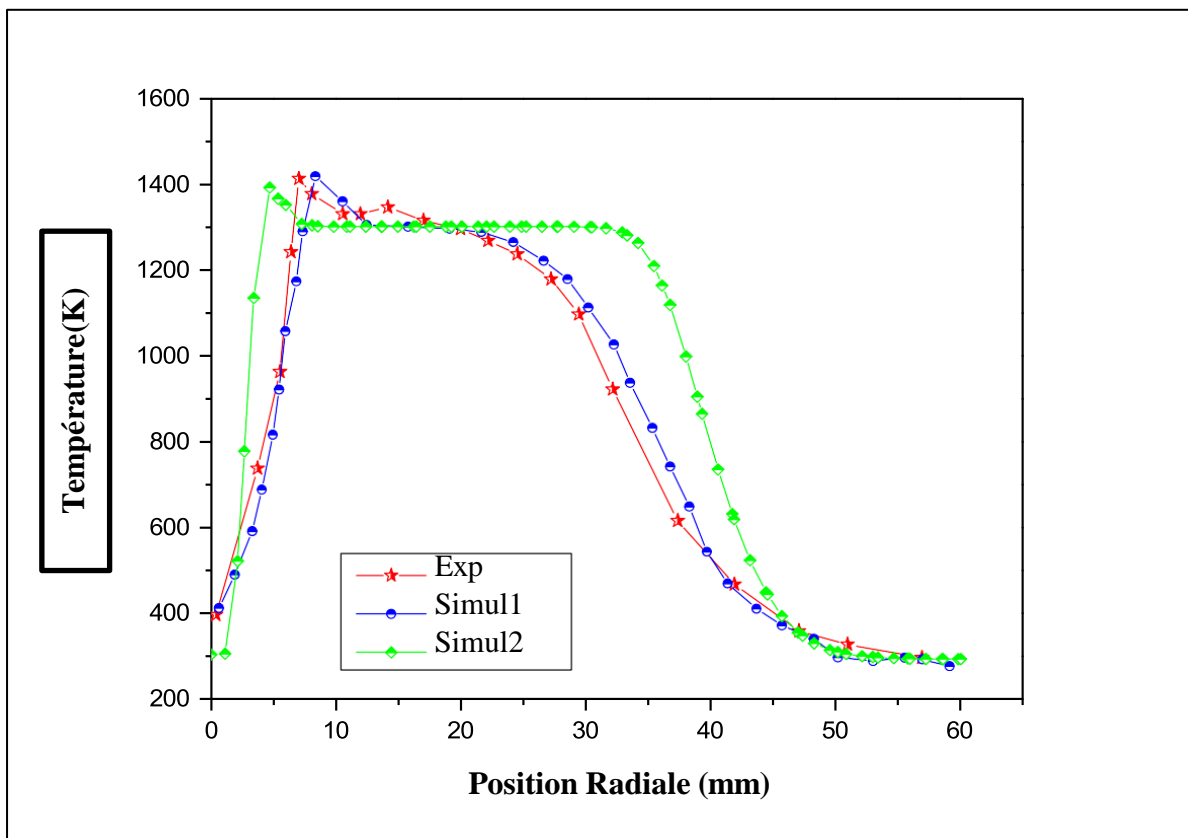
Dans ce chapitre on présente les résultats des simulations numériques, effet dosage du Méthane et hydrogène (Fraction massique du CH_4 et H_2), ainsi l'influence de la température D'admissions sur les émissions polluantes CO , NO_x

Les modèles utilisés sont EDM pour la combustion et $k-\varepsilon$ pour la turbulence .Les paramètres tels que la température, la vitesse, distribution de CH_4 , l'apparition de NO_x thermique et la création du CO seront analysés en détail.

➤ A)Four :

IV.2. Validation des modèles utilisés :

IV.2.1.Validation des profils de Température :



FigureIV.1 : Validation des Profil de températures en fonction de la position radiale(r)

La figure (IV.1) illustre les résultats de la température expérimentale ainsi que les deux scénarios de simulations. Les courbes des températures observées révèlent une montée soudaine de la température, suivie d'une phase de stabilité, puis d'une baisse. La température constitue l'une des caractéristiques spécifiques de la combustion, avec des valeurs comprises entre 300 K et 1400 K. Une claire similitude est observée entre notre cas de simulation n°2 et les résultats obtenus par Dally et al. Expérimentation et simulation N°1. La température maximale atteinte est presque identique entre notre simulation et l'expérience de Dally et al.

IV .2.2. Validation des profils de la fraction massique de CO₂ :

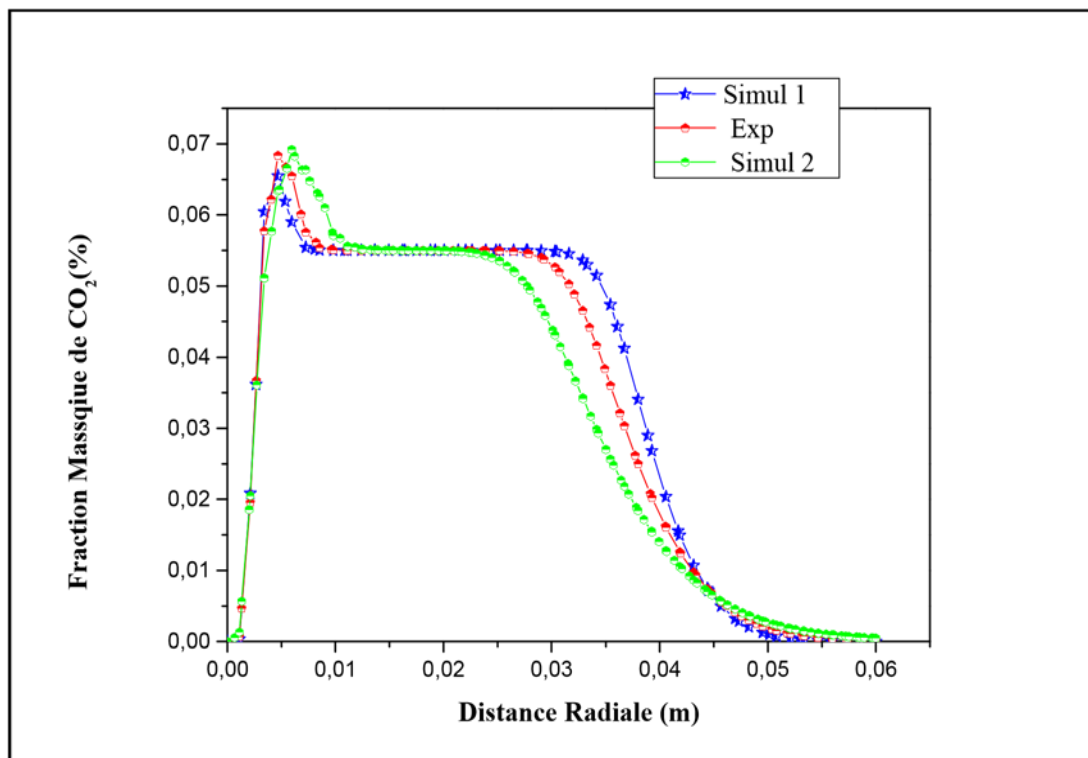


Figure IV.2 : Validation La fraction massique de CO₂ dégagé au cours de combustion sans flamme en fonction de la position radiale (r).

La figure(IV.2) présente les résultats des fractions massique de CO₂ d'expérimentale et les deux cas de simulations, qu'ils sont pratiquement identiques. On constate que la concentration de CO₂ est très élevée au départ de la combustion sans flamme.

On note que pour la position $r=5\text{mm}$ la fraction massique de CO₂ prend sa valeur maximale puis une diminution jusqu'à ce qu'elle devienne nulle, c'est la fin de la combustion.

IV.2.3. Validation des profils des fractions massiques de O₂ :

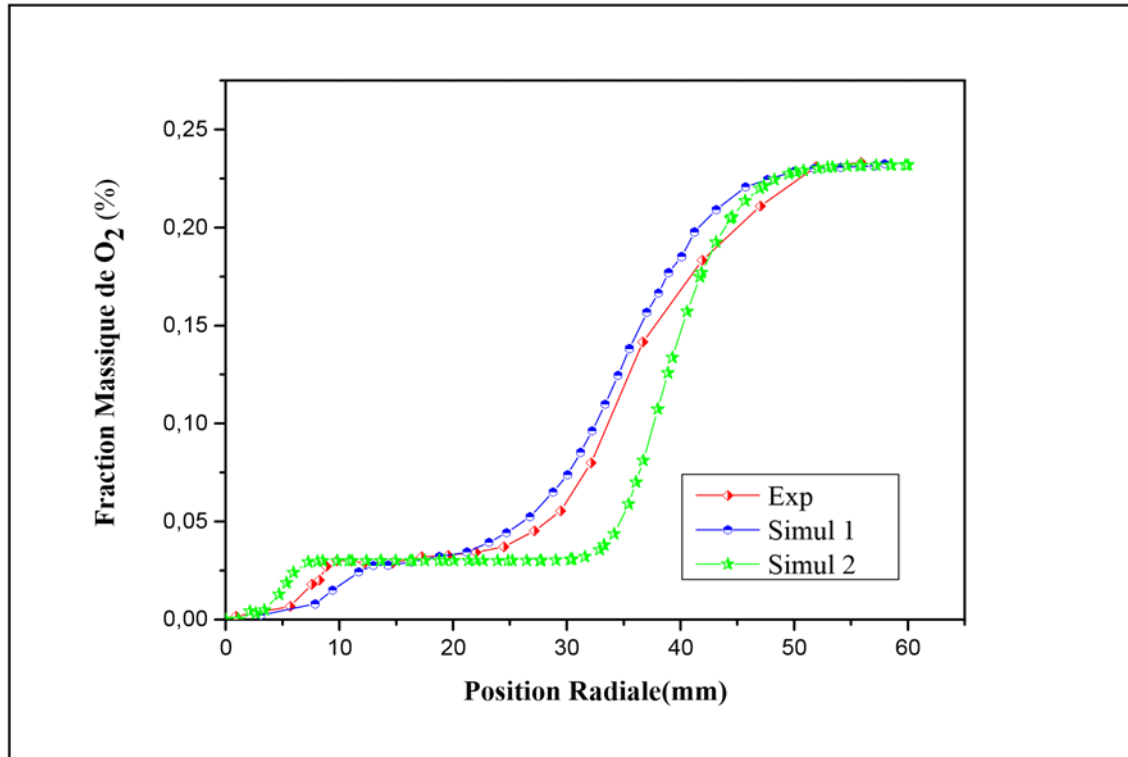


Figure IV.3: Validation la fraction massique d'O₂ en fonction de la position radiale (r).

La figure (IV.3) présente les concentrations d'O₂ injecté pour le cas expérimentale et simulation. On constate une similitude claire entre notre cas de simulation N°2 et les résultats de Dally et al. et Aminia (Expérimentale et simulation N°2). Les profils des fractions massiques d'O₂ obtenu montrent une augmentation jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale qui est presque 0,225 puis elle stabilise le long du brûleur.

IV.3. Étude de l'influence de la composition du mélange réactif de CH_4 et H_2 :

IV.3.1. Effet de l'ajout de H_2 sur l'apparition du CO :

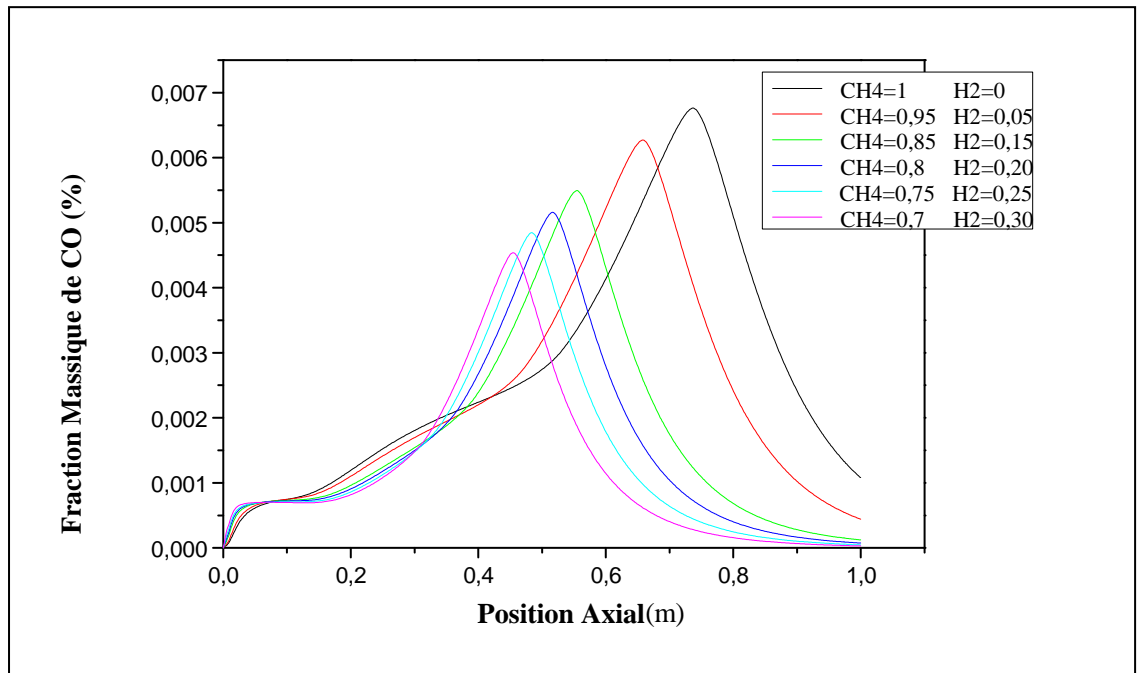
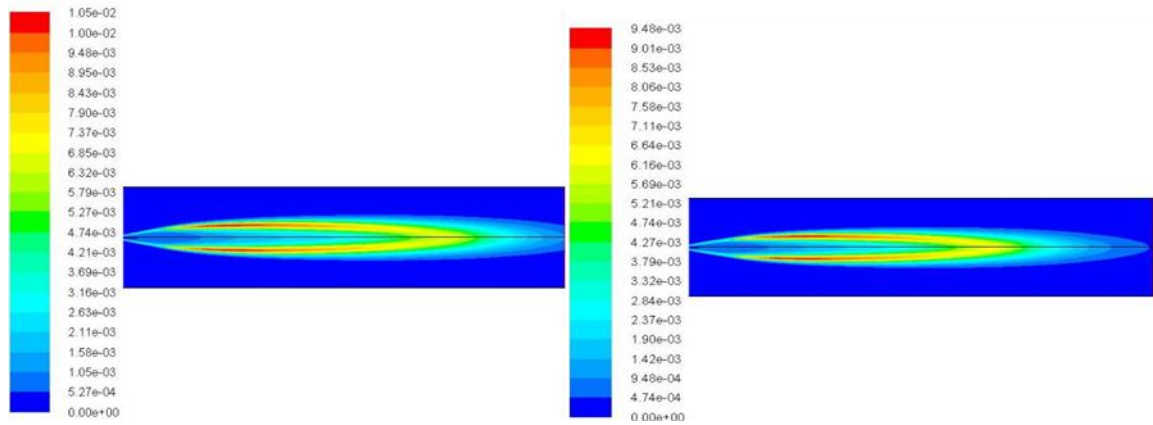


Figure IV.4 : influence d'ajout H_2 sur les émissions de CO

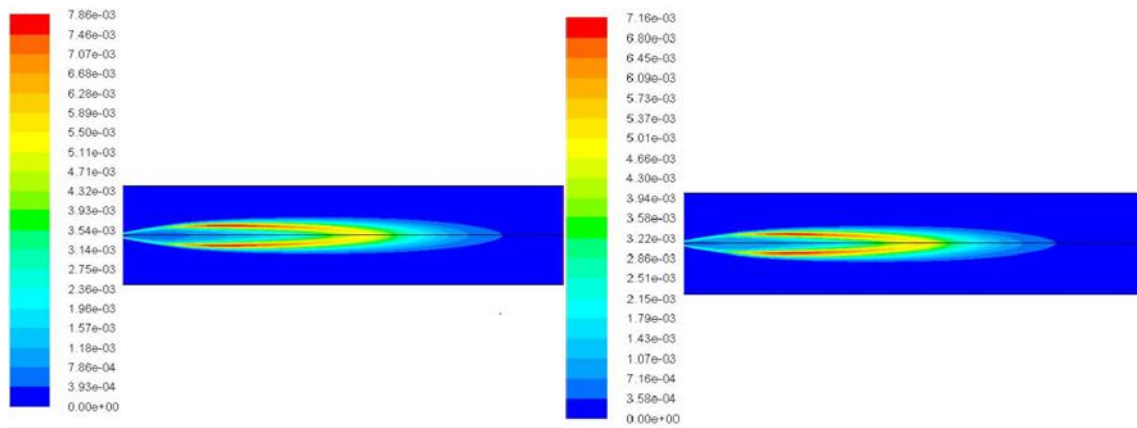
La figure (IV.4) présente les courbes des fractions massique CO en fonction de l'enrichissement de H_2 sur l'axe. D'après cette figure, on constate qu'il y a une différence entre ces courbes. On remarque que plus on augmente la concentration de l'hydrogène H_2 et on diminue le dosage du méthane CH_4 les émissions polluantes CO diminuent.

➤ L'effet d'ajout d'hydrogène sur les contours de l'apparition du CO :

Les figures (IV.5 jusqu' à IV.10) montrent l'apparition des CO sous forme des contours pour une fraction massique de $\text{CH}_4=100\%$ et $\text{H}_2=0\%$ jusqu'à $\text{CH}_4=70\%$ et $\text{H}_2=30\%$. On remarque que l'augmentation de concentration d'hydrogène implique une diminution d'apparition du CO .



Figures IV.5-IV.6 : Fraction massique de CO pour ($\text{CH}_4=1$ et $\text{H}_2=0$) et ($\text{CH}_4=0.95$ et $\text{H}_2=0.05$)



Figures IV.7-IV.8 : Fraction massique de CO pour ($\text{CH}_4=0.85$, $\text{H}_2 =0.25$)et ($\text{CH}_4=0.80$, $\text{H}_2=0.20$)

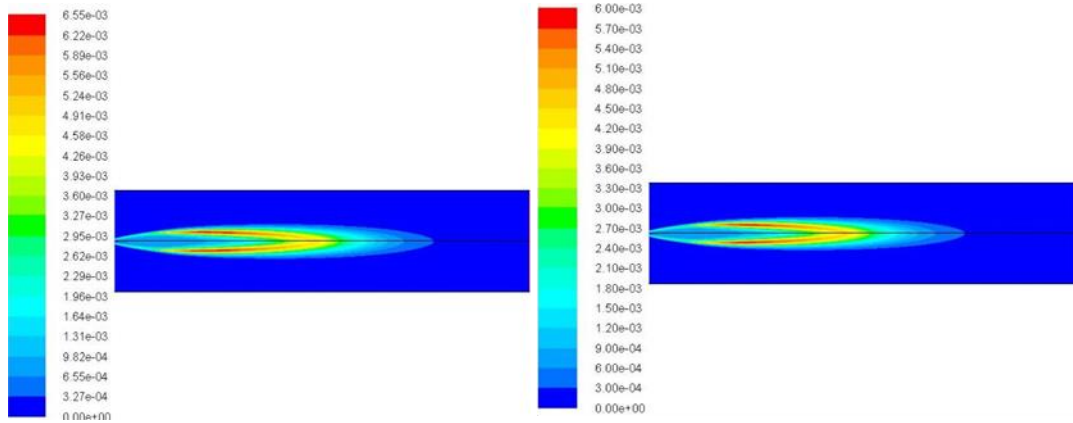


Figure IV.9-IV.10 : Fraction massique de CO pour ($\text{CH}_4=0.75$ et $\text{H}_2=0.25$) et ($\text{CH}_4=0.70$ et $\text{H}_2=0.30$)

IV.3.2. Effet de l'ajout de H_2 sur l'apparition du NO_x :

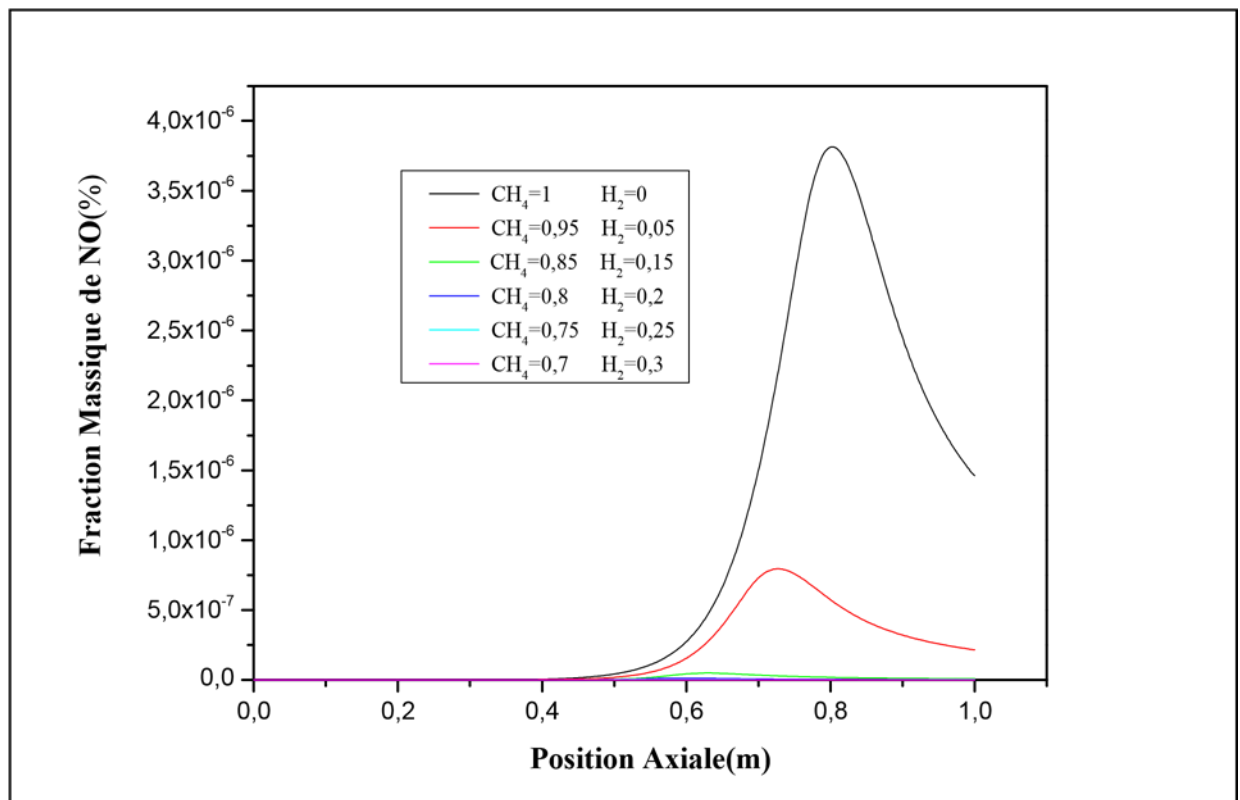


Figure IV.11 : influence d'ajout H_2 sur les émissions du CO

La figure IV.11 présente les courbes de la fraction massique de NO_x en fonction de l'enrichissement de H_2 sur l'axe. D'après les courbes, on remarque que à chaque fois on augmente le dosage d'hydrogène (H_2) et on diminue le dosage du méthane (CH_4) les émissions de NO_x diminuent.

Il est évident que pour un mélange hydrogéné donné, lorsque la quantité d'hydrogène du combustible augmente, les émissions de NO_x croissent. Mais pour notre cas, il est important de noter que les émissions de NO_x diminuent lorsqu'on augmente la quantité d'hydrogène à cause de la dilution. La dilution réduit les températures maximales et donc la production de NO émis par voie thermique.

Donc plus le mélange contient de H_2 , plus le taux de recirculations doit être élevé pour atteindre des émissions polluantes de NO_x peu importante.

➤ L'effet d'ajout d'hydrogène sur les contours de l'apparition du CO

Les figures (IV.12 jusqu'à IV.17) montrent l'apparition des NO_x thermique pour la fraction massique d'hydrogène (le dosage d'hydrogène de 0% jusqu'à 30%) et (le dosage du méthane CH_4 de 100% jusqu'à 70%).

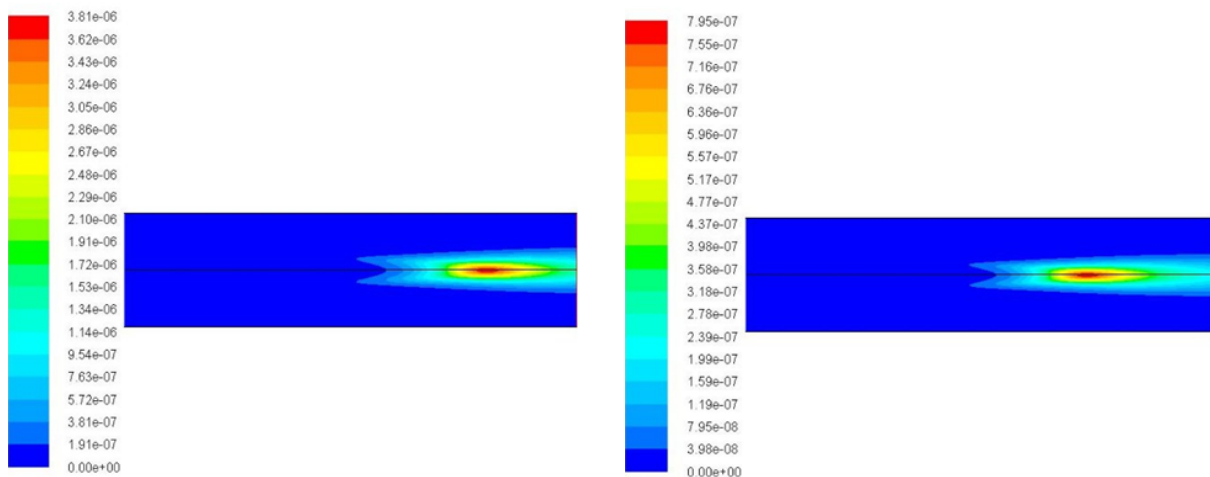


Figure IV.12-IV.13 : Fraction massique NO_x pour ($\text{CH}_4=1$ et $\text{H}_2=0$) et ($\text{CH}_4=0.95$ et $\text{H}_2=0.05$)

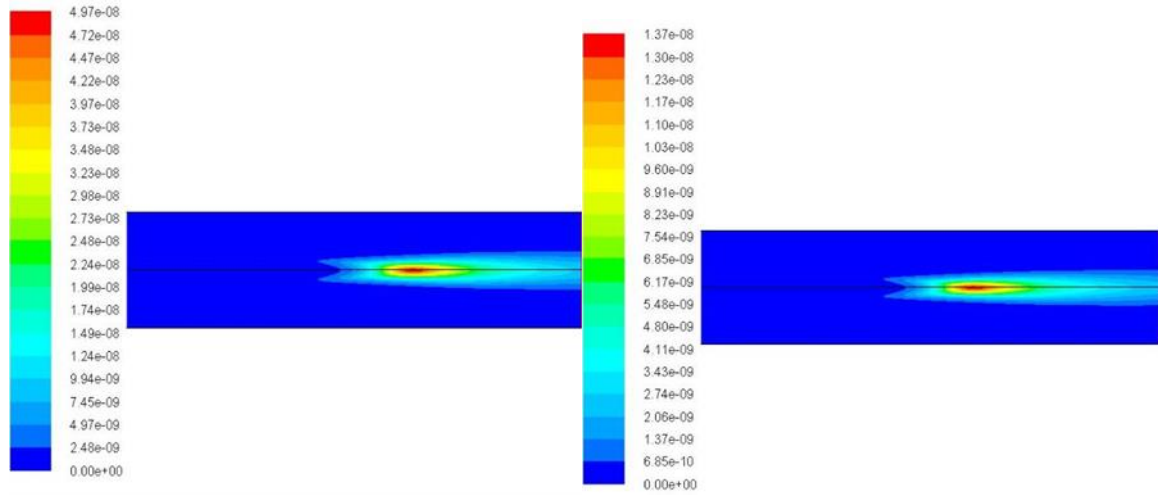
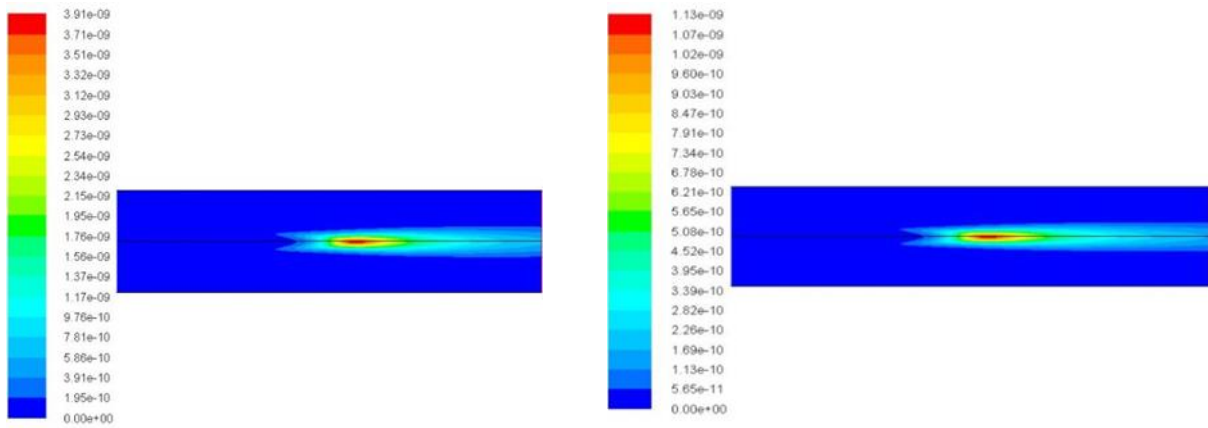


Figure IV.14-IV.15 : Fraction massique de NO_x pour ($\text{CH}_4=0.85$ et $\text{H}_2=0.15$) et ($\text{CH}_4=0.80$ et $\text{H}_2=0.20$)



Figures IV.16-IV.17 : Fraction massique de NO_x pour ($\text{CH}_4=0.75$ et $\text{H}_2=0.25$) et ($\text{CH}_4=0.70$ et $\text{H}_2=0.30$).

IV.4. Etude de l'influence de la température d'admission :

IV.4.1. L'influence sur l'apparition de NO_x :

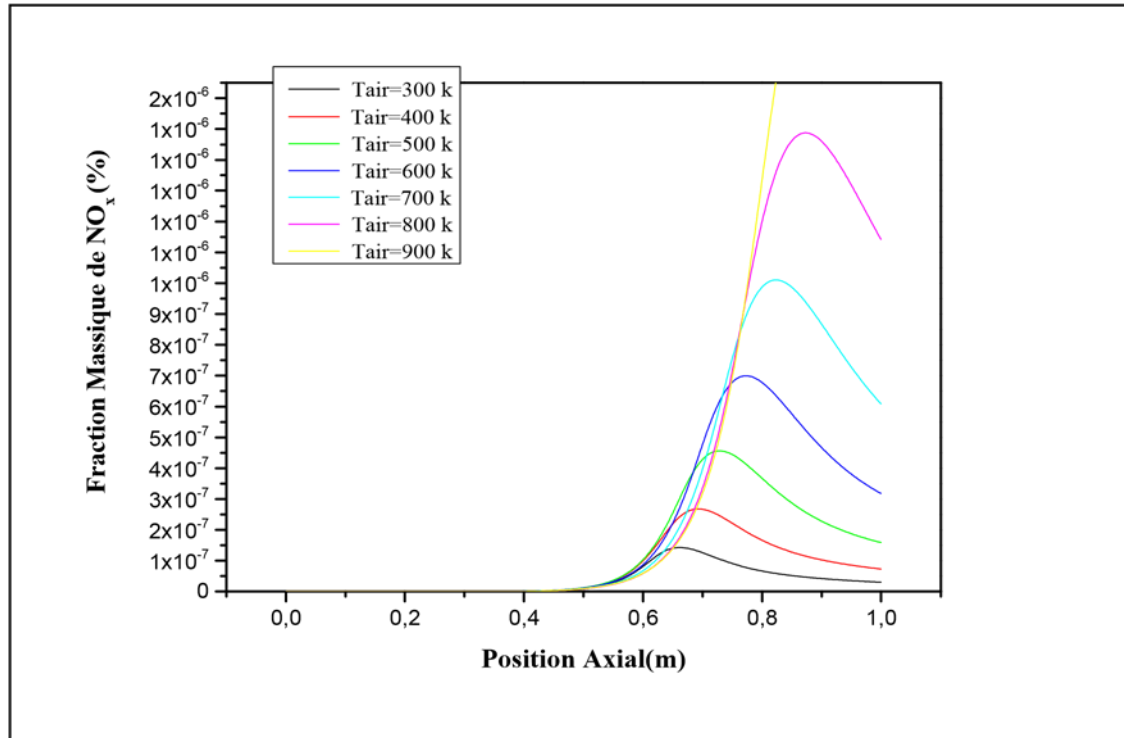


Figure IV.18 : influence des températures sur la fraction massique de NO_x

Figure IV.18 présente l'effet des températures d'air inlet sur les émissions polluantes NO_x thermique au long du brûleur. On constate que les courbes ne sont pas identiques. La figure nous indique que l'apparition des NO_x dépend essentiellement des températures. L'augmentation des températures fait monter les émissions polluantes NO_x .

IV.4.2. L'influence sur l'apparition de CO :

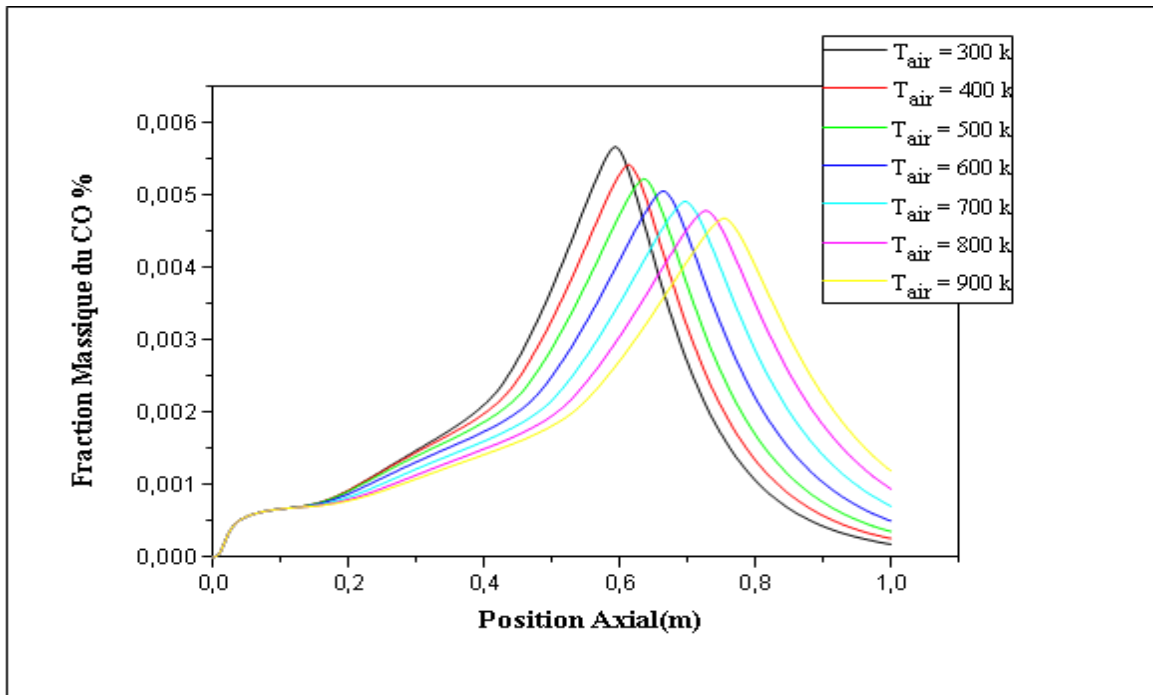


Figure IV.19 : influence des températures sur la fraction massique de CO

La figure (IV.19) présente les courbes de la fraction massique CO en fonction de la température d'admission. D'après cette figure, on constate qu'il y a une différence entre ces courbes. On remarque que plus on augmente la température, les émissions polluantes CO diminuent.

IV.4.3. L'influence sur la température du mélange :

La figure suivante présente les courbes de températures (air inlet) en fonction de la température sur l'axe de position x, nous notons que toutes les courbes sont presque identiques. On voit aussi qu'il n'y a pas de différence significative entre les courbes. D'après ces derniers, la température optimale correspond à $T_{\text{air}} = 800 \text{ K}$.

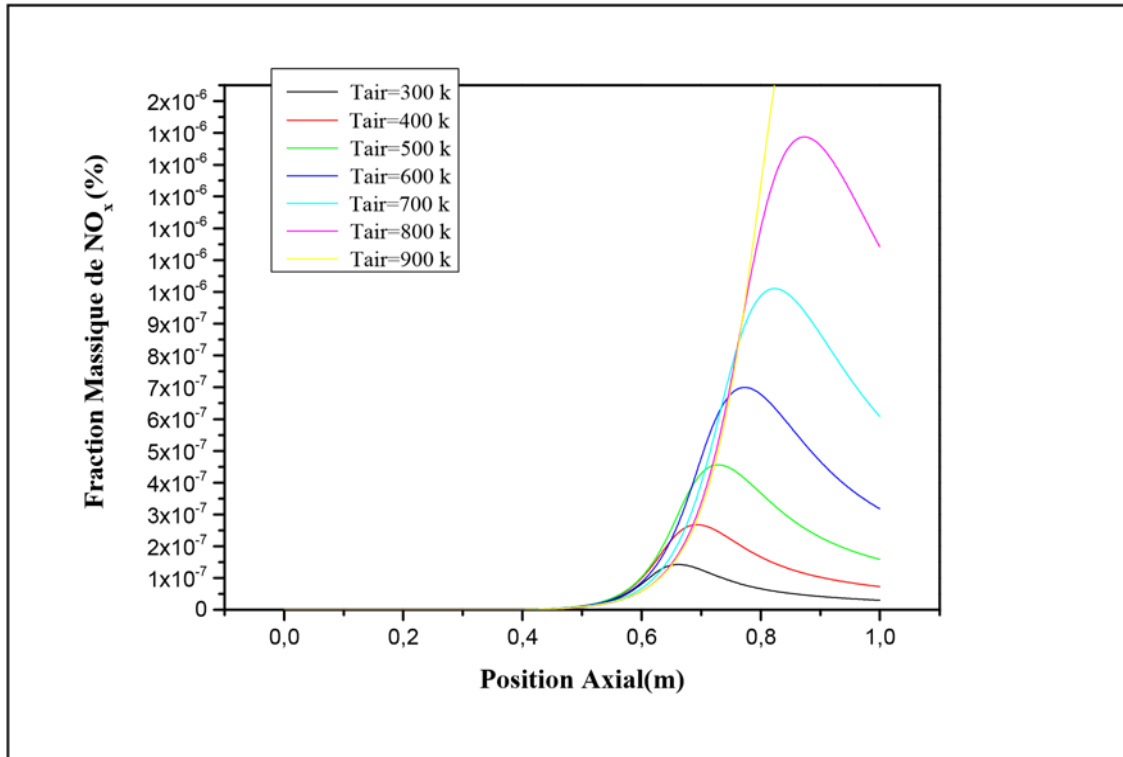


Figure IV.19 : influence des températures sur la fraction massique de CO

La figure (IV.19) présente les courbes de la fraction massique CO en fonction de la température d'admission. D'après cette figure, on constate qu'il y a une différence entre ces courbes. On remarque que plus on augmente la température, les émissions polluantes CO diminuent.

IV.4.3. L'influence sur la température du mélange :

La figure suivante présente les courbes de températures (air.inlet) en fonction de la température sur l'axe de position x, nous notons que toutes les courbes sont presque identiques. On voit aussi qu'il n'y a pas une différence significative entre les courbes. D'après ces derniers, la température optimale correspond à $T_{air} = 800 \text{ k}$.

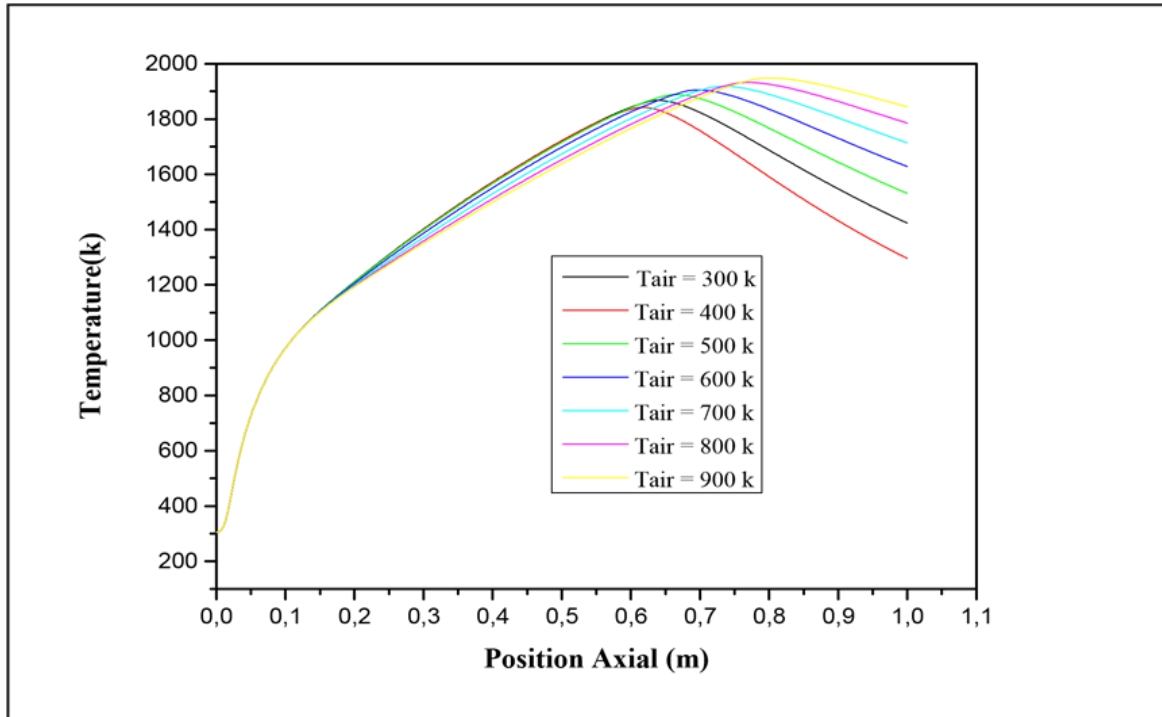


Figure IV.20 : influence des températures d'admission sur la température de la combustion

➤ Les contours de température :

Les figures (IV.21 jusqu'à IV.27) montrent changement des températures du mélange en fonction des températures d'admission.

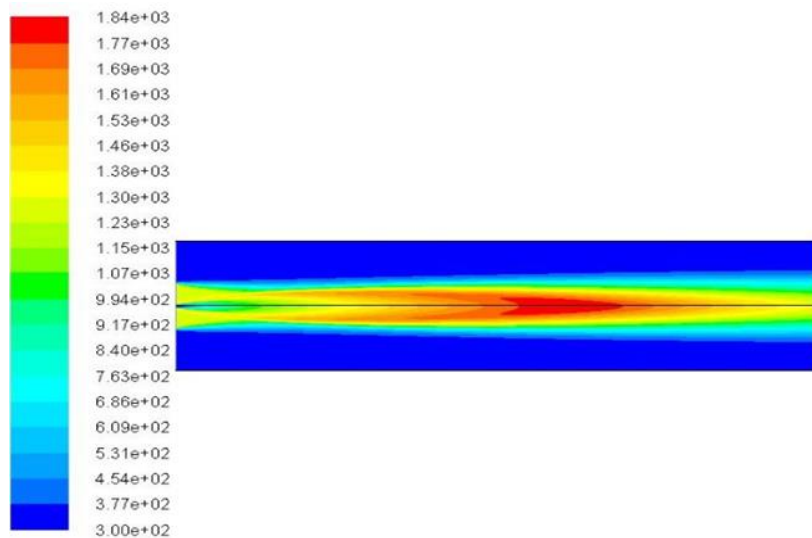


Figure IV.21: Pour T_{air}=300k

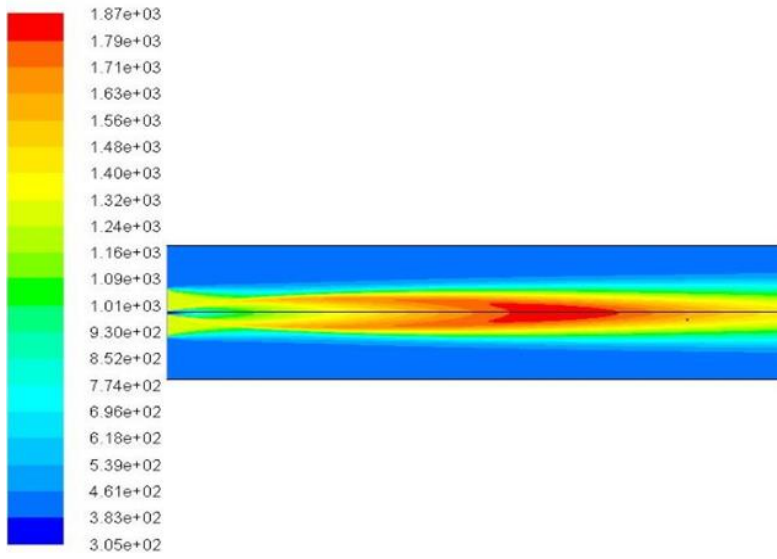


Figure IV.22: Pour $T_{air} = 400k$

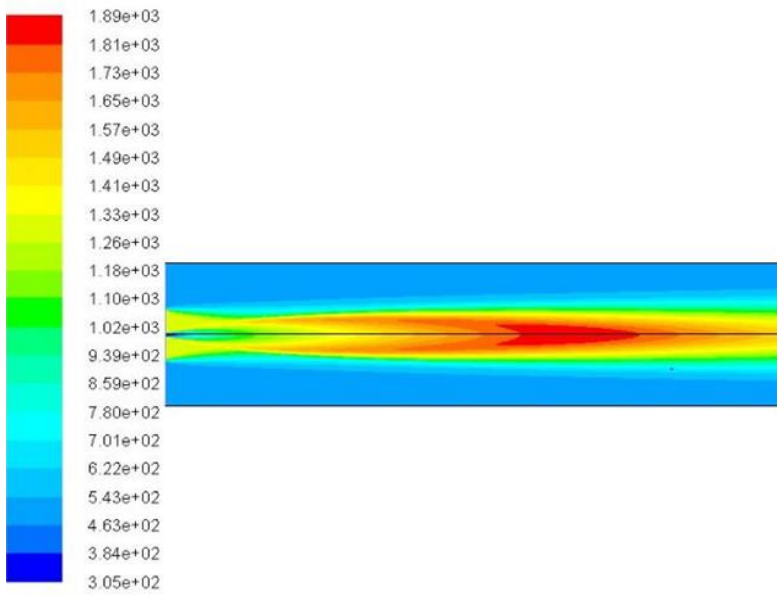


Figure IV.23: Pour $T_{air} = 500k$

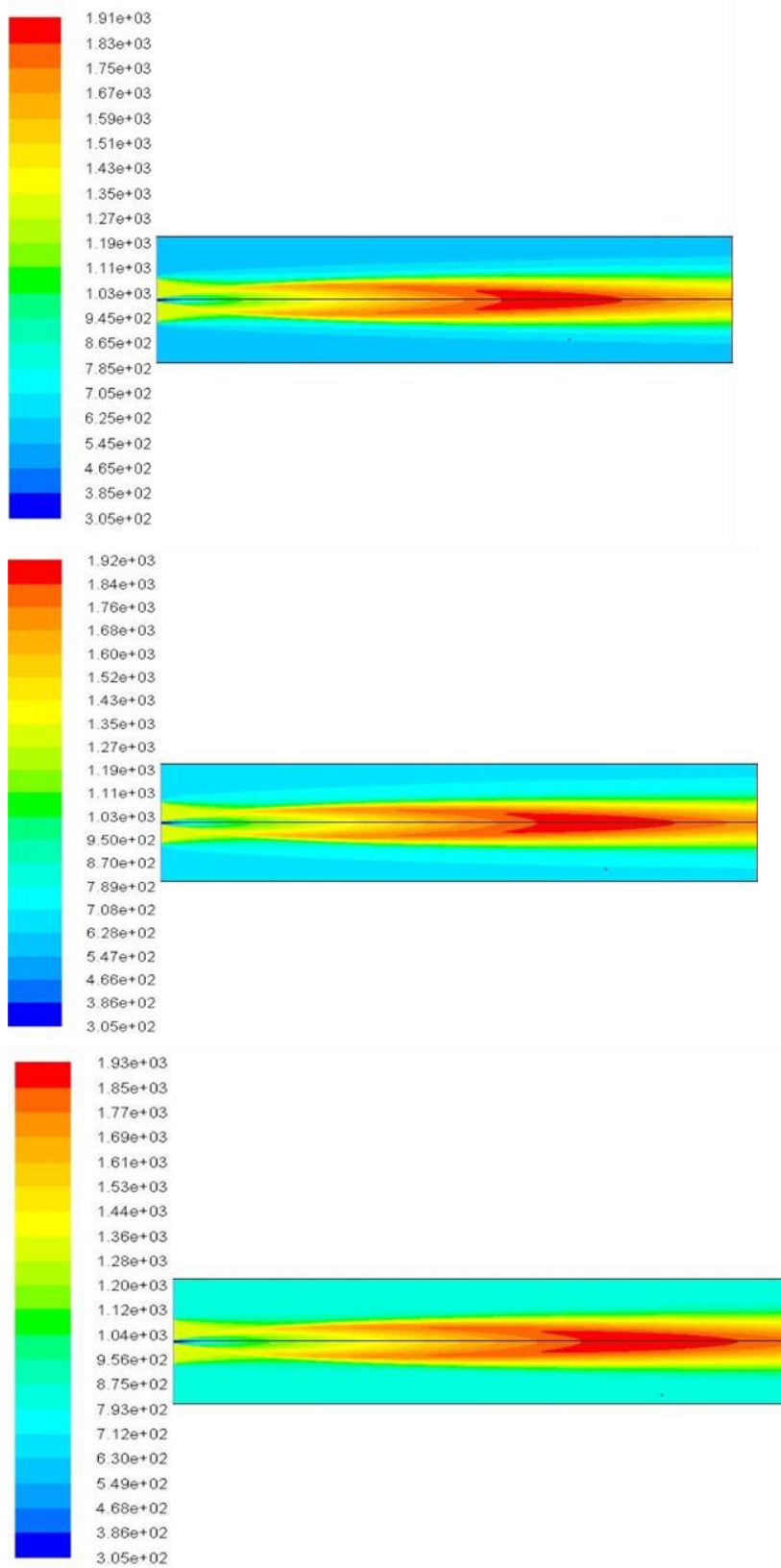


Figure IV.24: Pour $T_{air}=600k$

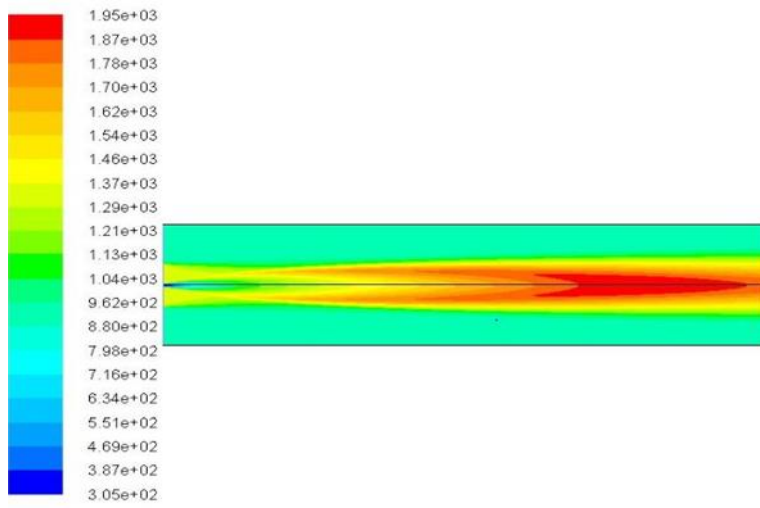


Figure IV.27 : Pour $T_{\text{air}} = 900 \text{ k}$

➤ B) Turbine :

Discussion des Résultats :

Après avoir terminé la solution pour les deux modèles non-premixed et partially-premixed on visualiser graphiquement des scènes scalaires et vectorielles ont été créées.

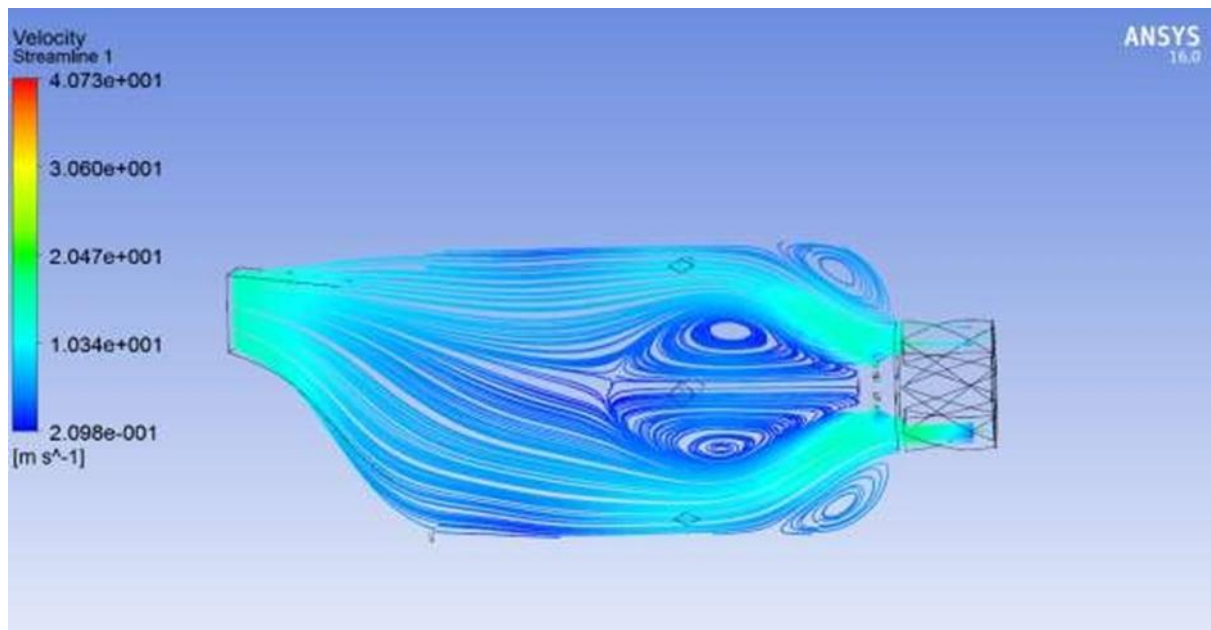


Figure IV.6 : Scène de vecteur de vitesse

Comme la **Figure IV.6** montre nous visualisons la forte turbulence générée par le processus de combustion.

On voit que la plus grande surface de flamme est proche des injecteurs et non au centre du panier comme prévu. La zone de flamme doit être située dans une région plus éloignée des injecteurs, car les réactions réelles ne se produisent pas instantanément après l'injection du carburant. Ce comportement est justifié par le fonctionnement du modèle d'Eddy, en supposant que toutes les réactions se produisent rapidement après le mélange du combustible avec l'oxydant.

La température de la flamme **Figure IV.7** atteint jusqu'à $\approx 2300\text{K}$ dans le modèle non-premixed et environs $\approx 2100\text{K}$ dans le modèle Partially premixed, la température moyenne

trouvée, qui était d'environ ≈ 1800 K, peut être considérée comme une indication de convergence de la solution proposée.

Température plus élevée près du brûleur et le long du jet d'air d'entrée qui devient plus étiré et plus frais le long de la chambre de combustion, La région de sortie où le champ de température est le plus uniforme.

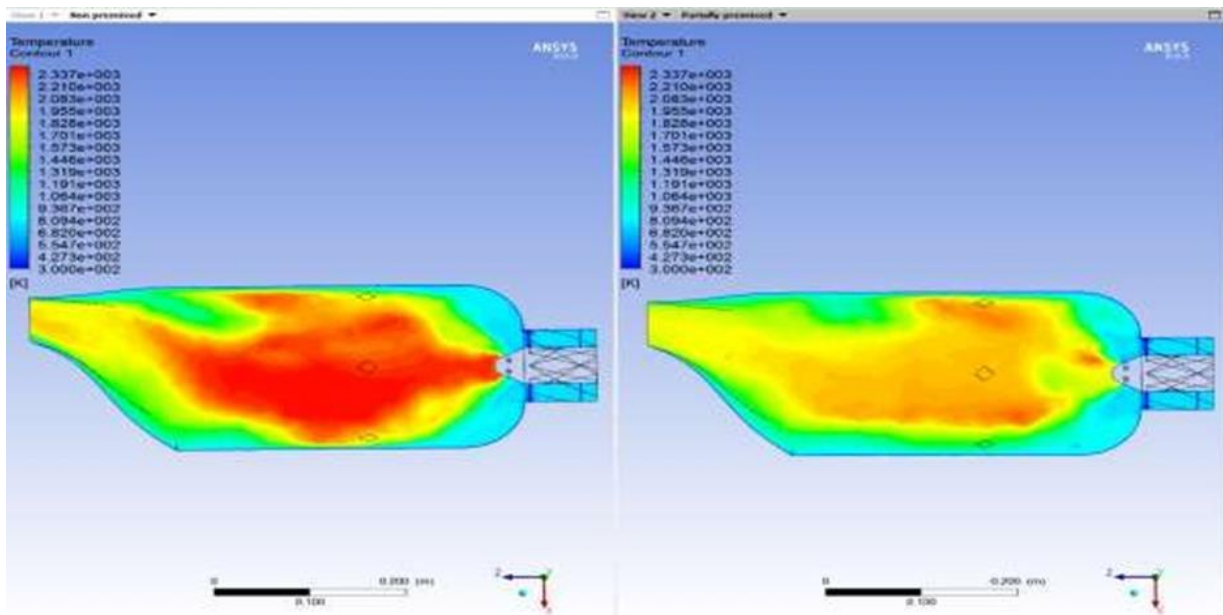


Figure IV.7 : Profile de température (Non premixed / Partially premixed)

Comme la **Figure IV.8** montre on a presque ≈ 0 mass fraction de CH_4 qui indique que la combustion est complète dans les deux cas.

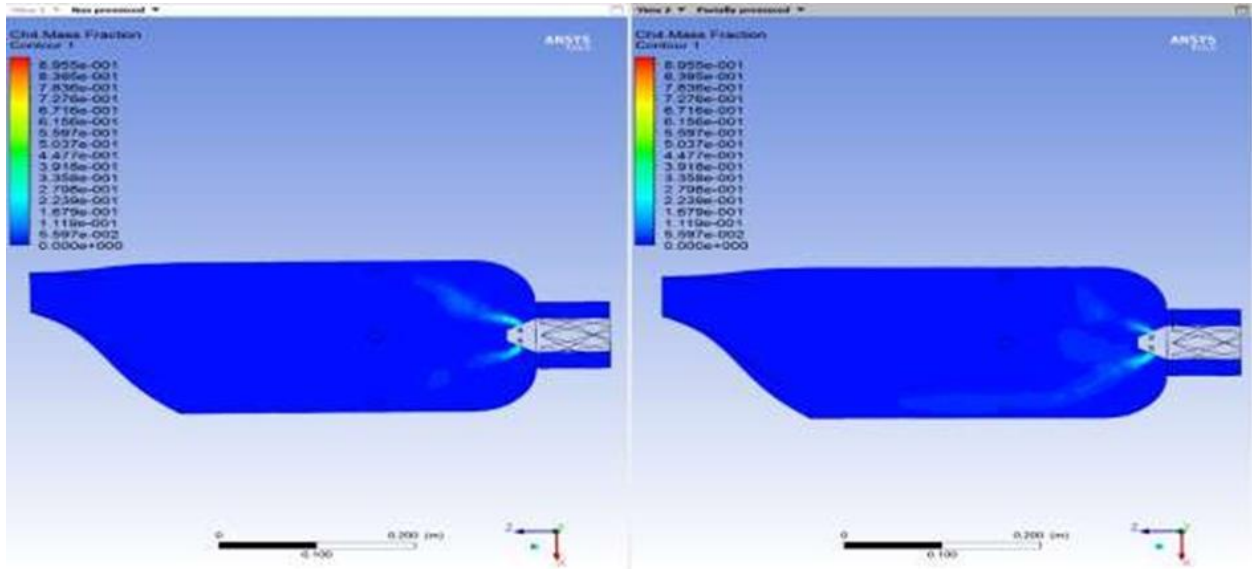


Figure IV.8 : Profile de mass fraction CH₄ (Non premixed / Partially premixed)

La combustion de composants se produit presque complètement dès que le carburant est injecté dans la chambre de combustion justifié par le modèle de combustion Eddy, Le même résultat se produit avec le profil de fraction massique du propane, éthane et du butane.

On observe également les différentes fractions massiques des éléments à travers la procédure de combustion.

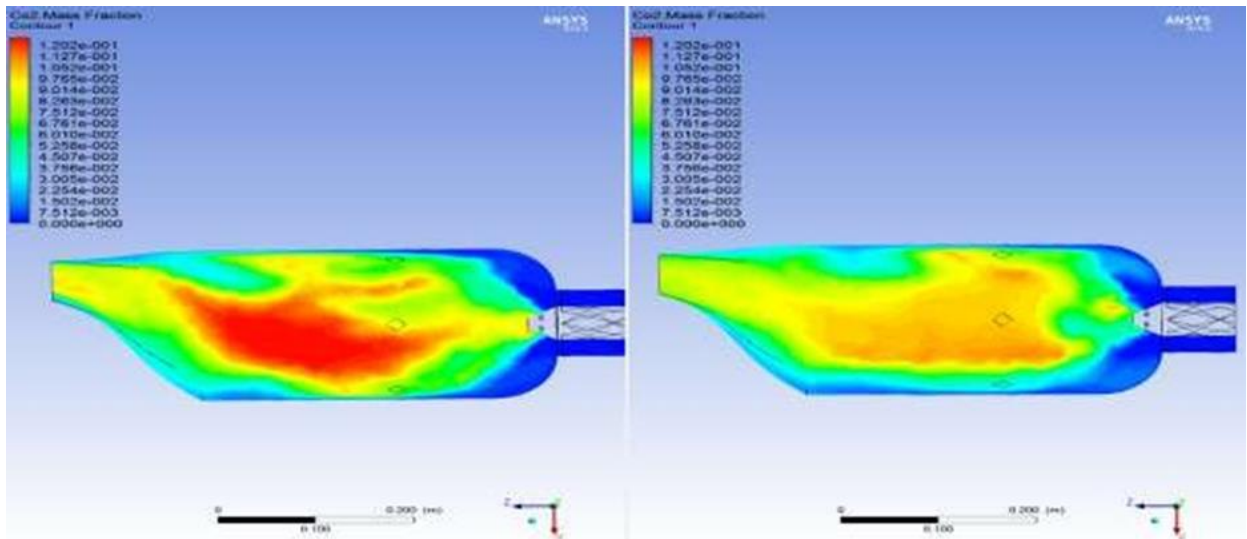


Figure IV.9 : Profile de CO₂ mass fraction (Non premixed / Partially premixed)

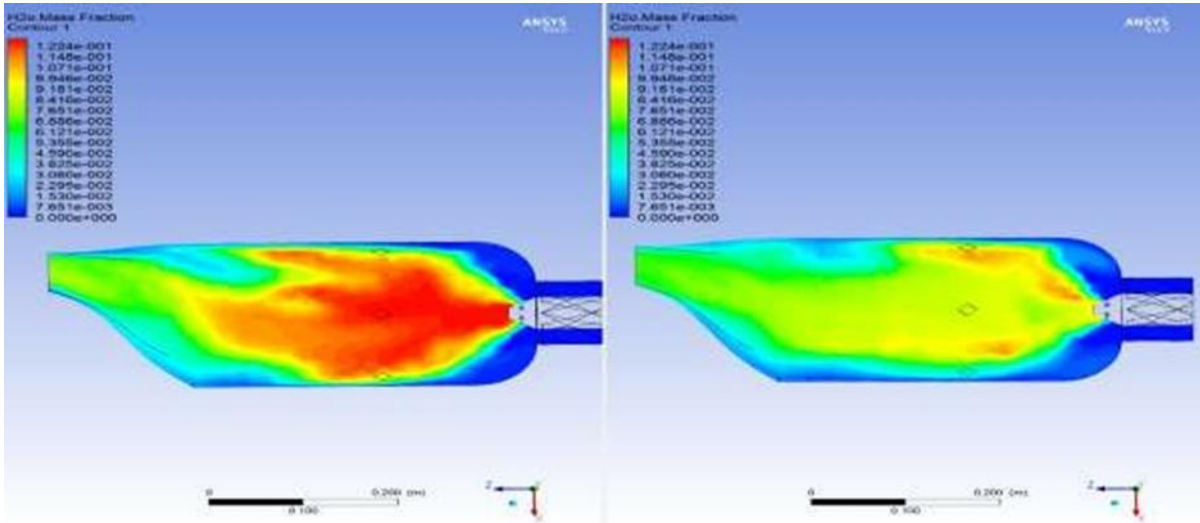


Figure 4.10 : Profile de H₂O mass fraction (Non premixed / Partially premixed)

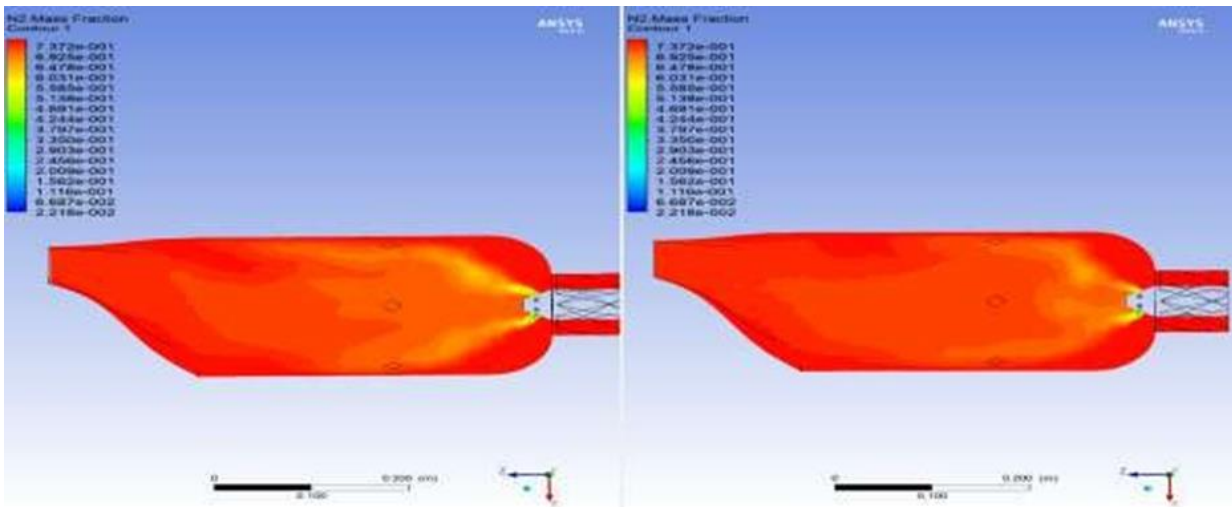


Figure IV.11 : Profile de N₂ mass fraction (Non premixed / Partially premixed)

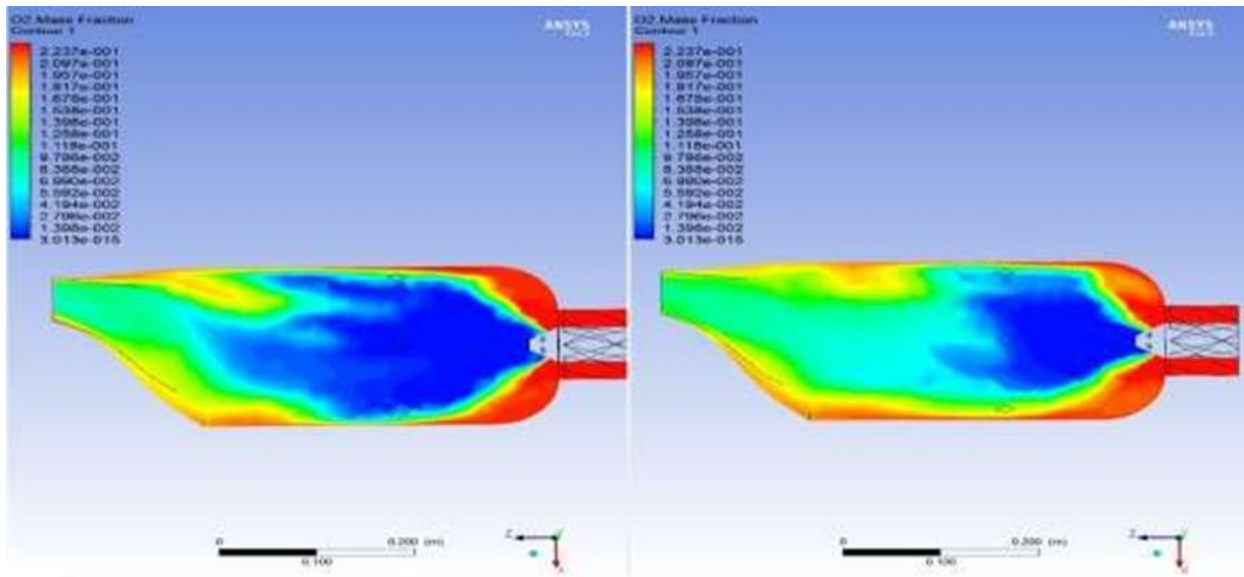


Figure IV.12 : Profile de O₂ mass fraction (Non premixed / Partially premixed)

On a également analysé le profil de fraction massique de CO **Figure IV.13**. En comparant ce profil avec le profil de température, on peut voir que les régions avec la plus forte concentration de monoxyde de carbone correspondent aux régions où les températures sont plus élevées. Ce comportement est attendu car la production de CO augmente avec l'augmentation de la température.

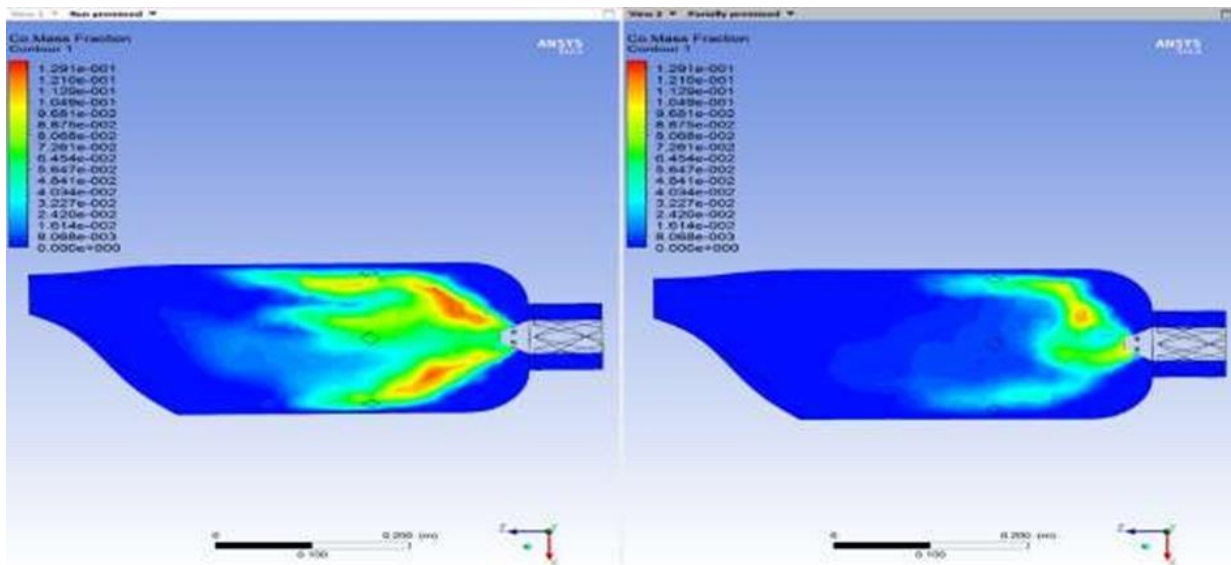


Figure IV.13 : Profile de CO mass fraction (Non premixed / Partially premixed)

La même analyse a été effectuée pour le profil de NO. Le comportement était le même observé dans l'analyse du CO, où la plus forte concentration de NO correspond aux régions où les températures sont plus élevées.

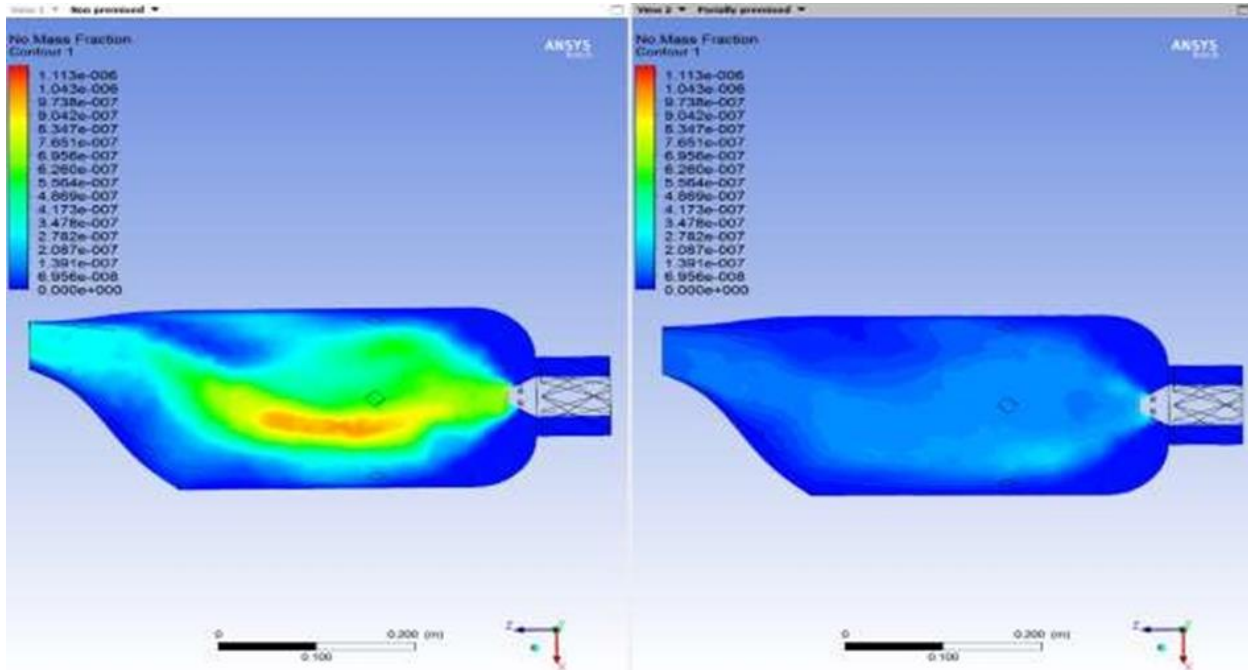


Figure IV.14 : Profile de NO mass fraction (Non premixed / Partially premixed)

En comparant les deux modèles **Figure IV.14**, nous voyons clairement que le modèle Partially premixed offre une très faible formation du NO et CO plus une flamme assez stable malgré un modèle 3D médiocre pour la représentation real du system premixed [4.5].

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ces dernières années, la croissance industrielle rapide a considérablement accru la demande en énergie, posant ainsi un véritable défi : comment produire cette énergie de manière efficace tout en respectant notre environnement ? Dans ce contexte, même si le gaz naturel est largement disponible et que les énergies renouvelables peinent encore à répondre aux besoins industriels, les systèmes de combustion avancés restent essentiels pour concilier performance énergétique et réduction des polluants.

Cette étude nous a permis d'approfondir notre compréhension des mécanismes complexes à l'origine des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) et de monoxyde de carbone (CO), qui affectent tant la santé humaine que l'équilibre de nos écosystèmes. En explorant différentes stratégies, notamment la combustion sans flamme, nous avons découvert une technologie prometteuse qui allie efficacité et respect de l'environnement. Grâce aux simulations numériques, nous avons pu observer l'impact important de paramètres tels que la concentration en hydrogène dans le combustible et la température de l'air d'admission. Ces résultats mettent en lumière comment la dilution interne et la recirculation des gaz peuvent homogénéiser la température à l'intérieur de la chambre de combustion et ainsi réduire les émissions nocives.

Bien que des progrès notables aient été réalisés, le chemin vers des systèmes de combustion toujours plus propres reste semé d'embûches. Face aux enjeux climatiques et aux exigences réglementaires croissantes, la recherche doit continuer à innover pour développer des solutions durables qui répondent aux défis énergétiques actuels.

Pour conclure, ce travail constitue une étape précieuse dans la quête d'une combustion plus propre et plus efficace. Il invite à poursuivre les efforts

scientifiques et techniques afin de construire un futur énergétique qui soit à la fois responsable et respectueux de notre planète

Références bibliographiques

- [1] Darabiha, N., & Maurel, F. (s.d.). Étude expérimentale de l'influence des mélanges gazeux sur la combustion sans flamme.
- [2] Etude expérimentale de l'influence des mélanges gazeux sur la combustion sans flamme (Doctoral dissertation, INSA de Rouen). Rottier, C. (2010).
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Monoxyde_de_carbone.
- [4] Escourrou G. Transports, contraintes climatiques et pollutions, coll. Mobilité Spatiale, SEDES, Paris, 172 (1996)
- [5] Deletraz, G. et Paul E. «Etat de L'art pour L'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes», Contrat ADEME n°9793022, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Université Joseph-Fourier (Grenoble I) (1998).
- [6] Seraghni N, Mesure de la pollution particulaire et métallique dans l'air au niveau de trois sites urbains de la ville de Constantine.page5 ,(2007).
- [7]C. Boullanger.etude de la dispersion du dioxyde d'azote no₂ dans la commune de schoelcher de septembre à décembre 2008, page 5,(Janvier 2009).
- [8] Bennamane A, Bouar O, etude et simulation numerique de la combustion sans flamme,page8, (2017).
- [9] Calcul LES d'une combustion sans flamme, Master Recherche Energie, Aéronautique et Spatial Spécialité Aéronautique et Spatial. Septembre 2006 .Ronan VICQUELIN Ecole Centrale Paris.
- [10]Etude de l'extension du régime de combustion sans flamme aux mélanges Méthane/Hydrogène et aux environnements a basse température Mechline Ayoub. Soutenu le 29 avril 2013. Ecole doctorale SPMII.
- [11] A.Milani, A.Saponaro « Diluted Combustion Technologies », IFRF Combustion Journal, , article 200101, page32,(2001).
- [12] Milani, A. & Wüning, J. G. Combustion sans flamme (FLOX/Flameless Oxidation). Technologies de l'Oxygène et Traitements des Effluents et Métaux (Lyon, France, 12–14 novembre 2002).

- [13] M.Katsuki, T.Hasegawa « The science and technology of combustion in highly preheated air », 27th International Symposium on Combustion / The Combustion Institute, 1998, pp. 3135-3146.
- [14] Ferrand, L. Modélisation et expérimentation des fours de réchauffage sidérurgiques équipés de brûleurs régénératifs à Oxydation sans Flamme. Energie électrique. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003. Français.
- [15] Benzoua , Z. Etude Numérique de la Combustion Sans Flamme des Combustibles à bas Pouvoirs Calorifiques, page 22 ,23.(2018).
- [16] Khatri H, Mahdi M. Réduction des émissions de CO₂ et NO_x par la combustion sans flamme page 9, (2021).
- [17]J.A.Wunning, J.G.Wunning'' « Flameless Oxydation to reduce thermal NO formation », Prog. Energy & Combustion Science, 1997, vol. 23, 12, pp. 81-94.
- [18] R.Weber, A.L.Verlaan, S.Orsino, N.LallemantA « On emerging furnace design methodology that provides substantial energy savings and drastic reductions in CO₂, CO, and NO_x emissions », Journal of the Institute of Energy, 1999, vol.72, pp. 77-83
- [19]Etude expérimentale de l'influence des mélanges gazeux sur la combustion sans flamme , Présentée par Christiane ROTTIER .Soutenue le 2 mars 2010, Ecole doctorale SPMII.
- [20]Flameless Oxidation. J. Wunning .WS Wärmeprozessechnik, Renningen – Germany. 6th HiTACG Symposium - 2005, Essen - Germany, 17th - 19th October 2005.
- [21]Cavaliere, A., De Joannon, M. (2004). MILD combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 30(4), 329–366. DOI: 10.1016/j.pecs.2004.02.003.

عنوان المذكرة: تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وأكاسيد النيتروجين عن طريق الاحتراق بدون لهب في آلات الاحتراق: (توربينات الغاز، فرن الأنابيب)

المؤطر: خالد مريقي

الإسم: حنان

اللقب: غويرق

كريمة

قلولة

ملخص:

الشرط الأساسي لحدوث عملية الاحتراق هو جمع عنصر قابل للاشتعال مع الأوكسجين ومصدر طاقة يساعد على انطلاق عملية الاحتراق. تركز هذه الدراسة على التحليل العددي لظاهرة احتراق الميثان داخل غرفة الاحتراق باستخدام برنامج المحاكاة **FLUENT**. الهدف من الدراسة هو حساب السرعات، ودرجات الحرارة، والكسور الكتلية لمختلف العناصر مثل: الميثان CH_4 ، والأوكسجين O_2 ، وبخار الماء H_2O ، والغازات الملوثة مثل ثاني أكسيد الكربون CO_2 وأحادي أكسيد النيتروجين NO . استخدمنا في دراستنا نموذج K-ε لتدفق الغازات المضطرب، ونموذج EDM (نموذج التشتت الدوامي) لحساب خصائص الاحتراق. بشكل عام، توجد مناطق لاضطراب الغازات، ومناطق ذات درجات حرارة مرتفعة، وكذلك توزيع غير منتظم للعناصر الناتجة داخل غرفة الاحتراق.

كلمات مفتاحية: لهب الانتشار اللولبي، الاحتراق، المحاكاة الرقمية

Memory title : Reduction of CO_2 and NO_x Emissions by Flameless Combustion in Combustion Machines: (Gas Turbine , Tubular Furnace).

Name: GHOUIREG
GUELLOULA

First name: Hanan
Karima

Directed by: MERIGUI khaled

Abstract :

Combustion is considered one of the most important natural and industrial phenomena (forests, engines, etc.). The main condition for having a combustion is to bring together an element capable of burning oxygen and a source of energy by which combustion will take place. The present study focuses on the numerical study of the phenomenon of the combustion of methane in the combustion chamber by simulation using the FLUENT software. The goal is to calculate the speeds, temperatures and mass fractions of different elements such as ; methane CH_4 , oxygen O_2 , water H_2O and polluting gases such as carbon dioxide CO_2 and nitrogen monoxide NO . We used in our study: the K- ε model for turbulent flow and the EDM (Eddy Dissipation Model) model for combustion to calculate its characteristics. In general, there are areas of gas turbulence, others of high temperatures and also a disorderly distribution of the resulting elements in the combustion chamber.

Key words: Flamme de diffusion turbulente, combustion, simulation numérique

Titre du mémoire : Réduction des émissions de CO_2 et NO_x par la combustion sans flamme dans les machines à combustion : (Turbine à gaz, Four tubulaire)

Nom : GHOUIREG
GUELLOULA

Prénom : Hanan
Karima

Encadreur : MERIGUI Khaled

Résumé

La combustion est considérée parmi les plus importants phénomènes naturels et industriels (les forêts, les moteurs, ...). La principale condition pour avoir une combustion c'est de réunir un élément susceptible de brûler l'oxygène et une source d'énergie par laquelle la combustion aura lieu. La présente étude se concentre sur l'étude numérique du phénomène de la combustion du méthane dans la chambre de combustion par simulation en utilisant le logiciel FLUENT. Le but c'est de calculer les vitesses, les températures et les fractions massiques des différents éléments tels que; le méthane CH_4 , l'oxygène O_2 , l'eau H_2O et les gaz polluants tels que dioxyde de

carbone CO₂ et le monoxyde d'azote NO. On a utilisé dans notre étude: le modèle K- ε pour l'écoulement turbulent et le modèle EDM (Eddy Dissipation Model) pour la combustion pour calculer ses caractéristiques. On remarque, en général, des zones de turbulence des gaz, d'autres de hautes températures et aussi une distribution désordonnée des éléments résultant dans la chambre de combustion.

Mots clés : Flamme de diffusion turbulente, combustion, simulation numérique