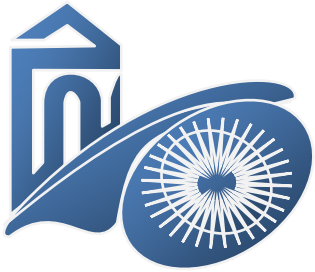
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie la Matière
Section Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Option : Energétique et thermiques des systèmes

Thème

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

Proposé et *Dirigé par :*

Dr. ALLICHE Mounir

Présenté par :

BENZERROUK Abd-el-Kader

Promotion 2013

Dédicace

Ce travail est dédier à ma mère et à mon père pour leurs aides et leur patience, et que je pense ne jamais pouvoir assez remercier.

A mes frères, A mes sœurs, toute ma famille.

A tous mes amis. A tous ceux qui mon aider de près ou de loin.

BENZERROUK Abd-el-Kader.

.

Remerciements

Je remercie **Dieu** qui m'a donné la capacité à accomplir ce modeste travail.

Je remercie mon Encadreur **Dr .Alliche Mounir** qui m'a beaucoup aidé et m'a soutenu par ses conseils pour réaliser cette recherche.

Je tiens à remercier aussi touts nos enseignants qui nous ont guidé tout au long de notre formation.

Merci.

Résumé

Les flammes turbulentes de non pré mélanges, caractérisent aujourd'hui un bon nombre de systèmes de production d'énergie thermique. Les brûleurs fonctionnant avec ce type de flammes, trouvent essentiellement leurs applications dans les fours industriels, les chambres de combustion des turbines à gaz, ou bien dans les foyers de réchauffe des turboréacteurs aéronautiques.
La compréhension de la structure complexe de ces flammes nous motivé le présent travail qui est une étude numérique par l'approche (R.A.N.S), de l'aérothermochimie turbulente des flammes non pré mélangées H2/Air

La modélisation de la combustion est basée sur le modèle de Magnusen. Le model k-epsilon est utiliser pour modéliser la turbulence.

Les différentes simulations numériques ont été faites àl'aide du code de calcule en volume fini (AnsysFluent) version 14. Une étude paramétrique a été menée. On examinera l'effet des conditions initiales sur la structure de la flamme ; en occurrence : la vitesse d'injection de l'hydrogène, la vitesse d'injection de l'air et la température d'entrée du combustible.

Mots-clés : Turbulence, Combustion, flammes non prémélangées

Abstract

The turbulent premixed flames can be found in a wide variety of thermal energyProduction systems. The burners operating with this type of flames are utilized for example in furnaces, industrial gas turbines combustion chambers or in those of aeronautical turbojets.
The need to understand the complicated structure of these flames has been our motivation to carry out a numerical study of the turbulent aero thermo chemistry of H2 / Air no premixeda burner using (R.A.N.S) approach. The modeling of combustion is based on the model of Magnussen. About turbulence modeling, the k-epsilon model is used.
Interesting resultwere obtained concerning the field of temperature, velocity and mass fractions

Key Words: Turbulence, Combustion,no premixedflame

ملخص

إن المحارق التي تعمل وفق هذا الصنف من الشعلات تجد تطبيقاتها المباشرة في الأفران الصناعية،في غرف الاحتراق الخاصة بالتربيناتالغازية أو في بؤر إعادة التحمية لمحركات الطائرات. إن فهم البنية المعقدة لهذه الشعلات تعتبر ذو أهمية بالغة مما دعانا في هذا العمل لإخراج دراسة عددية بمقاربة (RANS)(CFD)
للأيرو كيمياء الحرارية المضطربة للشعلات غير مختلط هواء/**الهدرجين.**المعادلات التي تصف الظاهرة المدروسة قد تم حلها بواسطة طريقة الحجوم المنتهية. تم استعمال نموذج(K-ε).

تهدف هذه الدراسة الى التقليل من انتشار الغازات السامة وكذلك اثر الشروط الابتدائية على لهب الهدروجين(سرعه الحقن هواء/**الهدرجين.** حرارة.)
كلمات مفتاحية: شعلةغير مختلطة- إحتراق - إضطراب

Table des matières

NOMENCLATEURE

Introduction

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralité sur la combustion et la flamme

Introduction.....4

I-1 Définition de la combustion.....4

I.2 La combustion turbulente 5

I.2.1.Modes de combustion élémentaires.....5

I.2.1. a .La combustion pré mélangée.....5

I.2.1.b. La combustion non prémélangée 5

I.2.1.c. La combustion partiellement prémélangée.....5

I.3 Applications industrielles de la combustion turbulente..... ...6

I.4 Les Flamme 7

I.4 .1. Définition.....7

I.4 .2. Eteindre une flamme.....7

I.5 Classification des flammes 8

I.5.1 Structure d'une flamme de diffusion laminaire 10

I.5.2 Flammes turbulentes de diffusion.....12

I.5.2.1 Structure des flammes de diffusion turbulentes.....13

I.6.Interactions flamme/turbulence.....16

I.7. Influence de la turbulence.....19

Chapitre II : *Propriétés* et caractéristiques de l'Hydrogène

II. L'Hydrogène comme combustible.....22

II .1. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures.....24

II .1.1. Le vaporeformage 24

II .1. 2. L'oxydation partielle 25

II .2 Production nucléaire d'hydrogène.....25

II.3. Production d'hydrogène à partir d'enzymes.....26

II.4. Production d'hydrogène en utilisant la biomasse.....28

II.5 .Usage de l'hydrogène 29

II.5. 1.moteur à combustion interne 29

II.5.2 Pile à combustible 30

II.6.Stockage l'hydrogène 31

II.6.1. Stockage sous pression 31

II.6.2. Stockage liquide 31

II.6.3. Stockage sous forme « solide » 32

II.7. Inconvénients et Avantages 33

Conclusion.....34

Chapitre *III* formulation mathématique

Introduction.....36

III.1. Les Equations gouverné..... 36

III.2.1.Equations de continuité.....36

III.2.2.Equations de conservation de quantité de mouvement……36

III.2.3. Equations de conservation de l'énergie ……..……...37

III.2.4.Equations de conservation des espèces chimiques ……38

III.2.5.Equitations d'état ……..……..38

III.2.6. Modèle de turbulence ……..…39

III.2.6.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente…….. 39

III.2.6.2. Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ……40

III.2.7. Modélisation de la réaction de combustion……..…40

III.2.7.1. Modèle Eddy Dissipation.....40

III.2.7.2.Burning Velocity Model……41

III.2.8 Réaction progresse ……...42

Chapitre IV Présentation du code ANSYS fluent

Introduction……45

IV.1. ANSYS Fluent……45

IV.2. Méthode numérique……46

IV.3. Méthodes des volumes finis……46

IV.4. Les étapes de mise en marche ……..47

IV.4.1.Lagéométrie ……..……..47

IV.4.2.Le maillage……48

IV.4.3. la configuration ……50

IV.4.4 LA SOLUTION……55

IV.4.5.Les résultats ……..…57

Chapitre V : résultats et discussion

V.1. Description du problème……..…58

V.2. Configuration et choix de modèles……..…58

V.3maillage……60

V.4. Effet du Maillage……61

V.5. descussion des resultats de simulation……..62

V.5.1 champ de temperature……62

V.5. 2. Champ turbulent……..…63

V.5.3. Le champs de fractions massique de certaines espèces

dans la flamme ……..……65

V.5.3. Effet de la Température d'entrée du fuel (Hydrogène)…….…69

V.4.2. Effet de la vitesse du fuel (Hydrogène)……..…73

V.5.4. Effet de la vitesse de l'air……76

Conclusion……78

Liste des figures

N° Figure **Désignation**

Fig. I.1 : triangle de feu ……..…….4

Fig. I.2 : Une flamme ……..……..…..…7

Fig. I.3 : Types de flammes : (a) pré mélangée, (b) non pré mélangée……..…..9

Fig. I.4 : Différents régimes de flammes et applications Phénomènes……..…..10

Fig. I.5 : : Structure d'une flamme de diffusion laminaire. ……11

Fig. I.6 : Schématisation d'une flamme non pré mélangée turbulente dans une Configuration coaxiale ……13

Fig. (I. 7): Schéma d'une portion de flamme de diffusion turbulente……..14

Fig. (I.8) : Régimes des flammes de diffusion turbulentes (Diagramme de Barrère-Borghi)……17

Fig. (I.9) – Effet de la turbulence sur la structure de la zone de réaction……20

Fig. (I.10) Effet de turbulences sur l'étirement du front de flamme……*20*

Fig. II.1 Table périodique……24

Fig. II.2 *les hydrogénases à fer* ……*27*

Fig. II.3 *les hydrogénases à nickel-fer*……..*27*

Fig. II.4 la biomasse agricole ……28

Fig. IV.1 convergence……57

Fig. V.1 Géométrie détaillée de la chambre de combustion……59

Fig. V.2 Independence du maillage……..61

Fig. V.3 maillages (85372 nœuds)……61

Fig. V.4 contour de la température suivant l axe de la flamme……62

Fig. V.5 profile axial la température suivant l axe de la flamme……..63

Fig. V.6 profil axial de l'énergie cinétique turbulent……64

Fig. V.7 profil axial du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulent……64

Fig. V.8 intensité de turbulence……65

Fig. V.9 Profil axial de la fraction massique d'hydrogène……66

Fig. V.10 Contour de la fraction massique d'hydrogène……66

Fig. V.11 Profil axial de la fraction massique de (o2)……..…67

Fig. V.12 Contour de la fraction massique d' oxygène……67

Fig. V.13 Profil axial de la fraction massique de (no)……..…68

Fig. V.14 contour de la fraction massique de (no)……68

Fig. V.15 contour de la fraction massique de la vapeur d'eau

dans la flamme……69

Fig. V.15 profil axial de la fraction massique de la vapeur d'eau……..69

Fig. V.17 Champs de température à w=296m/s à T=600 K……70

Fig. V.18 Champs de température à w=296m/s à T=300 K ……70

Fig. V.19 Champs de température à w=296m/s à T=900 K……..…71

Fig. V.20 L'effet de la température d'entré (fuel) suivant l'axe x……71

Fig. V.21 L'effet de la température d'entré (fuel) suivant l'axe x sur la fraction massique du no……72

Fig. V.22.Champs de température à vitesse w=50m/s et à T=300 K……..…73

Fig. V.23.Champs de température à vitesse w=100m/s et à T=300 K……74

Fig. V.24.Champs de température à vitesse w=200m/s et à T=300 K……74

Fig. V.25 L'effet de la vitesse d'entré (fuel) suivant l'axe(x) sur la fraction massique du no ……75
Fig. V.26 Champs de température à w=7m/s à T=300 K……76
Fig. V.27 Champs de température à w=20m/s à T=300 K……76
Fig. V.28 L'effet de la vitesse d entré (air) suivant l'axe x
Sur la fraction massique du(no)……76

Liste des tableaux

Tableau (V.1) : Schéma de discrétisation……60

NOMENCLATURE

Symbole	***Unité***	***Définition***
C	[--]	Variable d'avancement de la réaction
c_p	[J/ (kg K)]	Chaleur spécifique à pression constante du mélange
c_{pk}	[J/ (kg K)]	Chaleur pression constante de l'espèce k
$c_\mu, c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}, \sigma_k$ et σ_ε	[--]	Constantes du modèle k-ε
D_K	[m2/s]	Coefficient de diffusion de l'espèce k dans le mélange
D_a	[--]	Nombre de Damkhöler
D_{inj}	[m]	Diamètre de l'injecteur (brûleur)
f_{kf}	[m/s2]	Force spécifique de volume agissante sur l'espèce *k* dans la direction *j*
$h_{F,K}$	k[J/kg]	Enthalpie chimique spécifique de l'espèce
h_K	k[J/kg]	Enthalpie spécifique de l'espèce
hs,k	k[J/kg]	Enthalpie sensible de l'espèce
k	[m2/s2]	Energie de turbulence
Ka	[--]	Nombre de Karlovitz
L	[m]	Echelle intégrale de longueur

$l\delta$	[m]	Epaisseur de la couche interne de la flamme
lf	[m]	Epaisseur de la flamme laminaire
P	[N/m2]	Pression
Q	[J/ (m^3s)]	Source de chaleur
R	[J/(Kg K)]	Constante universelle des gaz parfaits
Ret	[--]	Nombre de Reynolds de la turbulence
S	[--]	Rapport stœchiométrique
SL	[m/s]	Vitesse de la flamme laminaire
Sc	[--]	Nombre de Schmidt
T	[K]	Température
T°	[K]	Température maximale (adiabatique) de la flamme laminaire
uη	[m/s]	Vitesse de retournement du tourbillon de Kolmogorov
ui	[m/s]	Vitesse dans la direction i
tη	[s]	Echelle de temps de Kolmogorov

ui'	[m/s]	Fluctuation de vitesse dans la direction i
Vk,i	[m/s]	Vitesse de diffusion de l'espèce k dans la direction i
Wk	[mole/kg]	Masse molaire de l'espèce k
Yk	[--]	massique de l'espèce k
Z	[--]	Fraction de mélange

La combustion est un phénomène extrêmement répandu dans la nature et au niveau de l'industrie. Depuis son existence sur Terre, l'homme n'a cessé d'utiliser la combustion. Il utilisa le feu pour se nourrir, se réchauffer et pour se défendre.

Aujourd'hui, la vie industrielle est basée en grande partie sur la combustion et les flammes. Une définition courante de la combustion la présente comme une réaction chimique exothermique, qui se matérialise par des flammes, entre l'oxygène de l'air et certaines substances (gaz, liquide ou solide) dites combustibles.

La combustion ne peut se produire que lorsque l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant (oxygène) et une énergie d'activation (certaine température). On appelle ceci le triangle du feu.

Il existe un nombre important de techniques menant à la combustion d'un carburant par un oxydant. En se limitant à la combustion gazeuse, deux modes de combustion élémentaires peuvent être identifiés : la combustion prémélangée et la combustion non prémélangée. Entre ces deux modes de combustion élémentaires se trouvent différents modes de combustion intermédiaires, comme le prémélange partiel.

Dans ce travail, on s'intéresse beaucoup plus à la combustion non prémélangée

Objectifs du travail

L'objectif principal du présent travail est la simulation numérique d'un transport d'écoulement réactif turbulent dans le cas d'une flamme de diffusion (non prémélange) Hydrogène-Air, par une approche CFD utilisant la méthode des volumes finis. On a utilisé le code ANSYS-FLUENT. Un couplage Combustion-Turbulence-Ecoulement sera étudié.

Contenu du mémoire

Le présent travail comprend cinq chapitres :

- Le premier chapitre présentera les *Généralités sur la combustion et la flamme*.
- Le deuxième chapitre présentera les propriétés et caractéristiques de l'hydrogène (combustible).
- Le troisième chapitre comportera une formulation mathématique du problème étudié.
- Le quatrième chapitre donnera une présentation générale du code **ANSYS- FLUENT**.
- Le dernier chapitre est consacré aux résultats du calcul numérique et à la discussion de ces résultats.

CHAPITRE I

Introduction

La combustion est un phénomène très répandu dans la nature, et c'est grâce à elle, en majeure partie, que l'activité humaine a pu se développer et se développe encore, quelquefois trop dans l'antiquité et jusqu'au moyen âge.

Le feu était même considéré comme l'un des quatre éléments de base dont l'univers entier était constitué. C'est à dire que l'étude et la compréhension de ce qui concerne la combustion et le feu ont un intérêt tout à fait important.

I-1 Définition de la combustion :

La combustion est une réaction exothermique complexe entre un combustible et un comburant (air, oxygène pur…). Le combustible est oxydé avec en général un dégagement de chaleur et de lumière. Trois facteurs doivent être réunis pour que la combustion puisse avoir lieu : un combustible, un comburant et de l'énergie. [1]

On définit ainsi classiquement le triangle du feu :

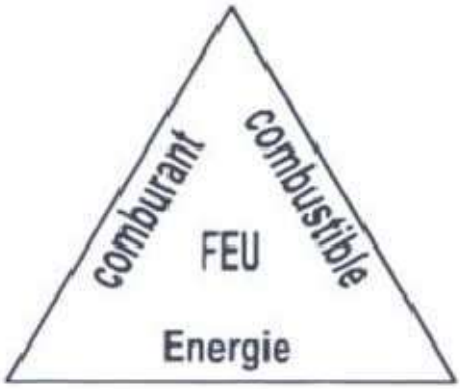


Fig. (I.1) : Triangle de feu

$$\boldsymbol{a}\ \text{comburant} + \boldsymbol{b}\ \text{combustible} \longrightarrow \boldsymbol{c}\ CO2 + \boldsymbol{d}\ H2O + \ldots$$

Cette écriture a pour objet d'indiquer simplement quels sont les produits initiaux et finaux du processus. On l'appelle réaction de bilan stœchiométrique. Elle n'indique pas du tout ce qui passe au cours de la combustion.

I.2 La combustion turbulente

Dans un foyer, l'écoulement est turbulent c'est à dire que les vitesses des gaz, mesurées en un point fluctue continuellement de façon apparemment aléatoire, même en régime parfaitement établi ; ceci est vrai pour la température et toute autre caractéristique du milieu. Cette turbulence est due à une forte vitesse de l'écoulement entrant. Elle s'est développée dans le canal amont à cause des gradients de vitesse aux parois et à partir d'obstacle tels que les injecteurs. [1]

I.2.1.Modes de combustion élémentaires

I.2.1.a. La combustion prémélangée

C'est est un mode de combustion où carburant et oxydant sont pré mélangés avant d'atteindre le front de flamme. Ce mode est souvent utilisé en régime pauvre, permettant ainsi d'augmenter le rendement du système de combustion et de réduire la production d'oxydes d'azote, polluant très nocif dont on veut limiter la production.

En contre partie, les flammes obtenues sont souvent difficiles à maîtriser, nécessitant l'utilisation de dispositifs complexes d'accrochage de flamme. De même, la question du stockage d'un mélange air/carburant dans la gamme de flammabilité est prépondérante et n'est pas envisageable dans un contexte industriel.

I.2.1.b. La combustion non prémélangée

C'est est un mode de combustion où carburant et oxydant sont injectés par deux courants différents. Le front de flamme se positionne à la rencontre des deux lignes d'introduction des courants. Ce mode de combustion, qui est donc plus facile à maîtriser, a le désavantage de former plus de polluants, du fait des hautes températures atteintes dans le front de flamme.

I.2.1.c. La combustion partiellement prémélangée

C'est est un mode de combustion intermédiaire retrouvé fréquemment dans les applications industrielles. Pour des raisons de sécurité, l'oxydant et le carburant sont stockés séparément (l'oxydant est par ailleurs bien souvent pris

dans l'environnement extérieur et n'est pas stocké par le système de combustion). L'oxydant et le carburant sont donc injectés par deux courants différents, en amont du front de flamme, et sont supposés se mélanger avant d'atteindre le front de flamme. Mais il arrive très fréquemment que le mélange ne soit pas parfait et que des hétérogénéités de mélange atteignent le front de flamme. Dans un autre sens, il est envisageable que les deux courants d'un système non prémélangé se mélangent avant d'atteindre le front de flamme. Ainsi le mode de combustion n'est plus non prémélangé mais partiellement prémélangé. [2]

I.3 Applications industrielles de la combustion turbulente [3]

A- Les moteurs

Une première grande catégorie de dispositifs concerne les moteurs, qui doivent propulser divers véhicules (avions, fusées, bateaux, automobiles,…) grâce à l'énergie thermique que la combustion peut libérer. On cite :

- Les moteurs à piston à allumage commandé «par bougie ».
- Le statoréacteur qui peut être utilisé pour un avion.
- La chambre de combustion des turboréacteurs.
- Les moteurs de fusée.

B- Les brûleurs

Les brûleurs sont les autres dispositifs industriels utilisant la combustion, qui sont utilisés dans des foyers, des fours, ou des chaudières: leur intérêt n'est pas de propulser un véhicule de types quelconque, mais de fournir «de la chaleur», ou de détruire ou transformer certains produits. Ils sont utilisés dans l'industrie, ou dans les centrales thermiques.

C- Les incendies

Les incendies et explosions constituent, enfin, la dernière catégorie de situations industrielles, ou naturelles, dans la quelles la combustion joue un rôle prépondérant.

Il est possible de décrire et d'analyser les différentes situations de ces types encore en termes de flammes de prémélange ou diffusion, en phase gazeuse ou avec intervention de liquide ou solides.

I.4 Les Flammes :

I.4 .1. ***Définition*** :

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

Cette réaction n'a lieu que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant et de l'énergie pour activer la transformation.

L'énergie d'activation est souvent la chaleur, produite par une autre flamme (propagation), un câble qui chauffe, un frottement, ou une simple étincelle (pierre de briquet, allume gaz…).

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



Fig. (I.2) **Une flamme**

I.4.2. ***Eteindre une flamme*** :

La méthode la plus habituelle est de souffler cette flamme. Cet entrainement par l'air éloigne la flamme de la source de carburant, et provoque

une dilution autour de la flamme, l'empêchant ainsi de se propager. Cependant, dans le cas d'une bougie, cette méthode n'arrête pas la vaporisation de la stéarine puisque la mèche reste chaude, c'est pour cela que l'on coupait l'extrémité de la mèche pour éviter que la bougie ne fume (mouchage). A plus grande échelle, les pompiers utilisent parfois des explosifs pour tenter de souffler une flamme confinée.

Prenons ensuite le cas de l'eau. Sa vaporisation est endothermique. Autrement dit, lorsqu'elle se vaporise, elle absorbe beaucoup d'énergie. De plus, elle occupe à l'état gazeux un volume beaucoup plus grand qu'à l'état liquide, ce qui a tendance à chasser l'air. Autrement dit, l'eau étouffe la flamme et refroidit l'espace, et c'est cette combinaison qui permet d'éteindre certains feux.

Une autre méthode serait d'empêcher les vapeurs de carburant de se diffuser. C'est le cas des extincteurs à mousse et à poudre, très efficaces sur les feux de liquides. [4]

I.5 Classification des flammes

Deux situations généralement rencontrées sont identifiées selon la procédure utilisée pour introduire les réactifs dans la zone de flamme. Elles sont schématisées sur la figure(I.3).

Flammes pré mélangées**:** Les réactifs sont mélangés avant la zone de réaction.

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

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

D'autre part, les écoulements pouvant être laminaires ou turbulents, quatre situations sont possibles, résumées dans la figure (I.4) qui y associe quelques applications pratiques. Si les flammes laminaires semblent n'intervenir

que dans quelques applications très simples (*bougie, flamme de briquet*), la compréhension de la structure de ces flammes est cependant fondamentale pour la description et la modélisation de nombreuses situations industrielles.

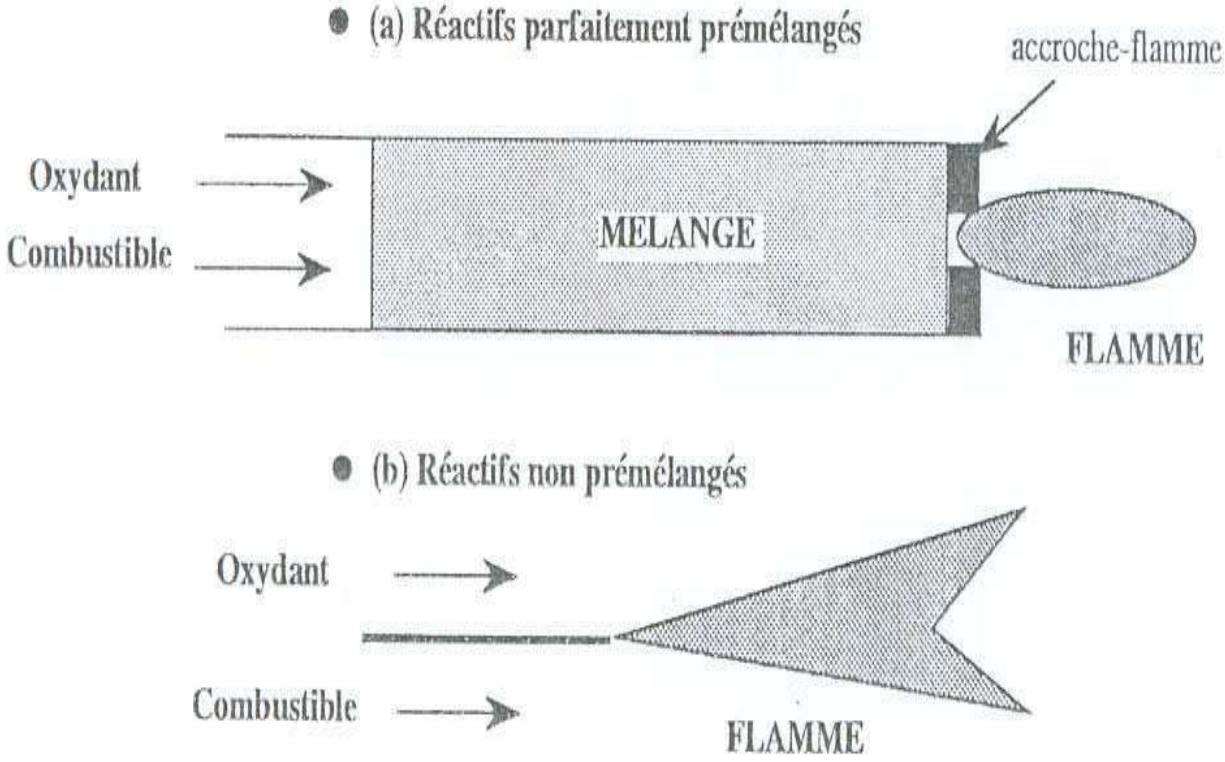


Fig. (I.3) : Types de flammes : (a) prémélangée, (b) non prémélangée

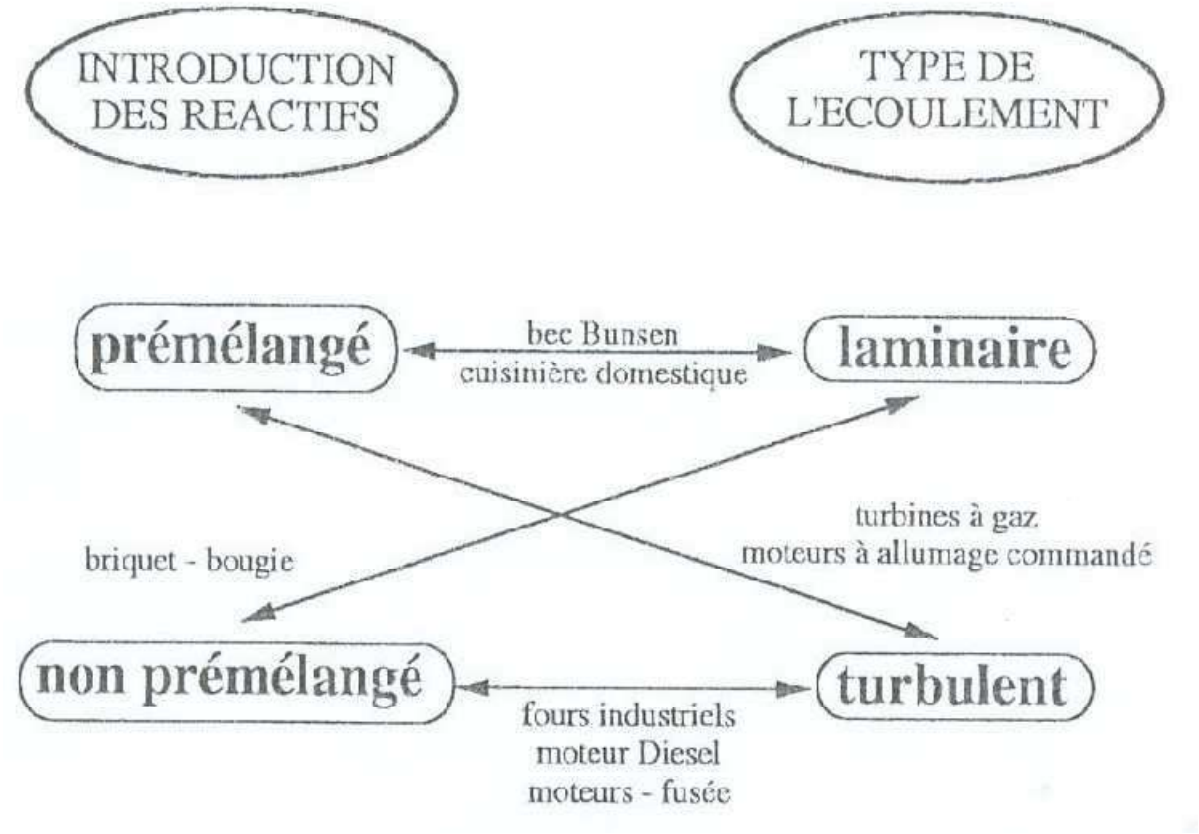


Fig. (I.4): Différents régimes de flammes et applications Phénomènes

I.5.1 Structure d'une flamme de diffusion laminaire

La flamme de diffusion constitue une classe spécifique de la combustion où les réactifs ne sont pas mélangés avant de brûler. La structure d'une flamme laminaire de diffusion non étirée est représentée sur la Figure **(I.5)** et met en évidence un certain nombre de considérations:

- ✓ Loin de part et d'autre de la flamme, le mélange est soit trop riche, soit trop pauvre pour brûler. Le mélange le plus favorable est obtenu lorsque le fuel et l'oxygène sont présents dans les proportions stœchiométriques. La flamme de diffusion s'étend alors dans les zones où la diffusion crée un mélange stœchiométrique.

- ✓ Contrairement au cas prémélangé, la flamme laminaire de diffusion n'est pas stationnaire en l'absence d'étirement. Du fait de la diffusion dans la flamme, on observe une diminution du gradient des espèces et une augmentation de l'épaisseur de la zone réactive. De ce fait, le maximum du taux de réaction diminue lentement au cours du temps.
- ✓ Pour la raison décrite dans le point précédent, une flamme de diffusion n'a pas d'épaisseur de référence, car son épaisseur est en constante évolution.
- ✓ Contrairement à la flamme de prémélange, la flamme de diffusion ne peut pas se propager dans l'écoulement (de part et d'autre de la flamme ; l'un des réactifs est déficitaire), il n'existe donc pas de vitesse de référence de la flamme. En revanche, dans un écoulement turbulent, la flamme de diffusion est plus sensible aux perturbations de vitesse que la flamme de prémélange.
- ✓ En terme d'applications industrielles, la combustion non prémélangée est plus sécuritaire, car la flamme ne se propage pas, par contre la combustion est moins efficace.

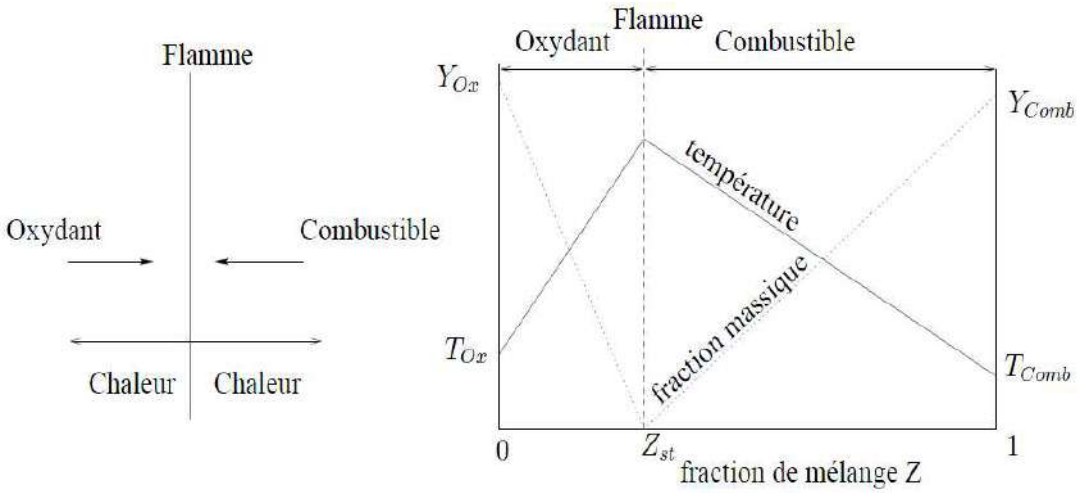


Fig. (I.5) : Structure d'une flamme de diffusion laminaire. [5]

La structure d'une flamme de diffusion est schématisée sur la figure 1.5. La fraction massique d'oxydant est maximale dans l'oxydant pur puis diminue lorsque l'oxydant se mélange aux produits de combustion. Il n'y a plus d'oxydant au niveau de la flamme car la réaction chimique l'a intégralement consommé. L'évolution est la même pour le combustible. La température de flamme T_F est celle des produits de combustion à l'état d'équilibre. Ainsi, une flamme de diffusion sépare le combustible de l'oxydant alors qu'une flamme de prémélange sépare les gaz frais des gaz brûlés. Ces deux types de flammes ne sont que des cas limites, des flammes correspondant à un type intermédiaire sont possibles. Il existe, par exemple, des structures de flammes qui peuvent à la fois présenter une structure de prémélange et de diffusion, on parle alors de flammes triples ; elles jouent un rôle important dans le processus de stabilisation des flammes non prémélangées (Fossi et *al.* 2010 ; Williams, 1985). [5]

D'autre part, si on considère une seule réaction globale et pour le cas limite d'un temps chimique infiniment court devant le temps de mélange des espèces, la flamme est considérée comme une zone fine dans l'écoulement. Cette interface sépare le carburant du comburant qui ne peut pas coexister. En utilisant ces approximations, introduites par Burke et Schumann (1928) [5], on peut définir une variable unique qui permet de caractériser l'état thermochimique du mélange: la fraction de mélange Z. Cette quantité est un scalaire passif défini de telle façon que sa valeur est nulle dans le comburant pur et égale à l'unité dans le carburant pur. La flamme se positionne alors sur l'iso-surface $Z = Z_{st}$ où Z_{st} est la fraction de mélange correspondant à la stœchiométrie.

I.5.2 Flammes turbulentes de diffusion

La description des différents régimes de flammes de diffusion turbulentes se fait par des paramètres physiques qui sont : les échelles caractéristiques et les nombres adimensionnels. Dans le cas d'une flamme de diffusion, on ne peut pas définir une vitesse et une épaisseur de flamme ; ces notions dans une flamme de diffusion n'ont pas de sens physique ; en effet, on peut obtenir plusieurs vitesses de flammes de diffusion dans la même configuration expérimentale.

I.5.2.1 Structure des flammes de diffusion turbulentes

Un écoulement axisymétrique réactif en configuration coaxiale, représentant une géométrie modèle des bruleurs industriels, comprend classiquement trois zones détaillées schématisées sur Fig. I.6.

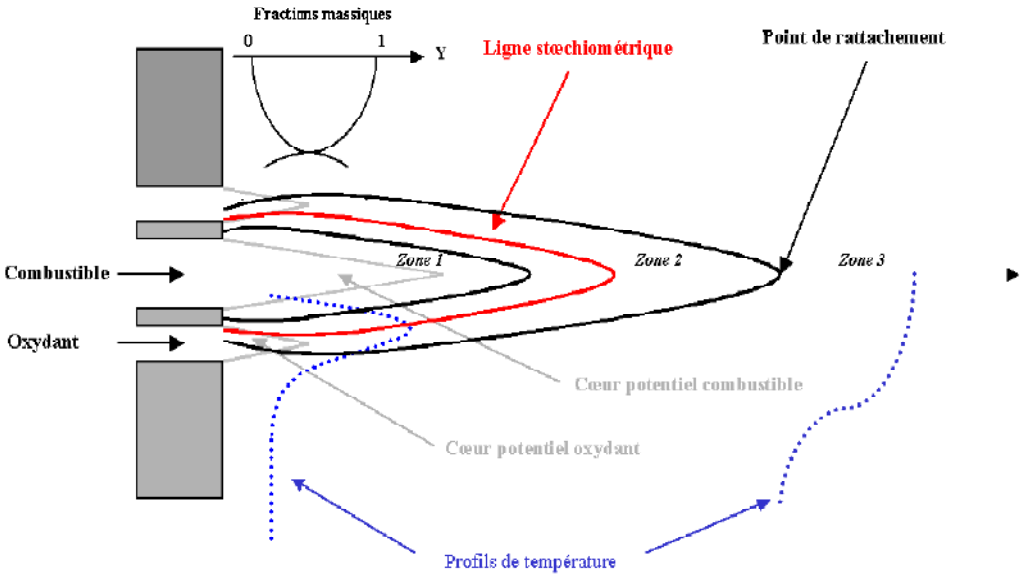


Fig. (I.6): Schématisation d'une flamme non-premelangée turbulente dans une Configuration coaxiale. [6]

- La première (zone 1) est la zone centrale où le profil de vitesse est faiblement perturbépar la turbulence, notamment à cause du rôle de ≪ barrière ≫ joué par l'effet laminaire de la combustion.
- La deuxième partie (zone 2) est une zone de mélange et de rection en périphérie du jet central. Les gradients de vitesse sont élèves (favorisant la turbulence) ainsi que la température (favorisant la réaction). Cette région de flamme où la turbulence et la combustion sont en compétition est limitée par le point de convergence de l'écoulement annulaire (point de rattachement), qui définit une longueur de flamme. [6]

A la base de la flamme, la réaction a lieu à l'interface des jets de combustible et d'oxydant, puis, après les cœurs potentiels, c'est une zone de combustion intense qui débute.

- La dernière région (zone 3) dans le champ lointain est le panache de la flamme, où toutes les quantités trouvent un profil quasi-uniforme, et/ou il

est possible d'observer des zones de combustion in stationnaires par paquets avec recombinaisons d'espèces et consommations de produits intermédiaires.

Cette structure est en fait valable lorsque la turbulence n'est pas trop forte, la flamme est alors constituée d'une longue « flammelette » légèrement plissée, alternativement étirée et comprimée par les mouvements turbulents. La structure résultante est constituée d'une zone de réaction, d'épaisseur très fine, séparant deux zones de convection-diffusion encadrées elles-mêmes par du combustible pur d'un côté et du comburant pur de l'autre fig. (I.7)

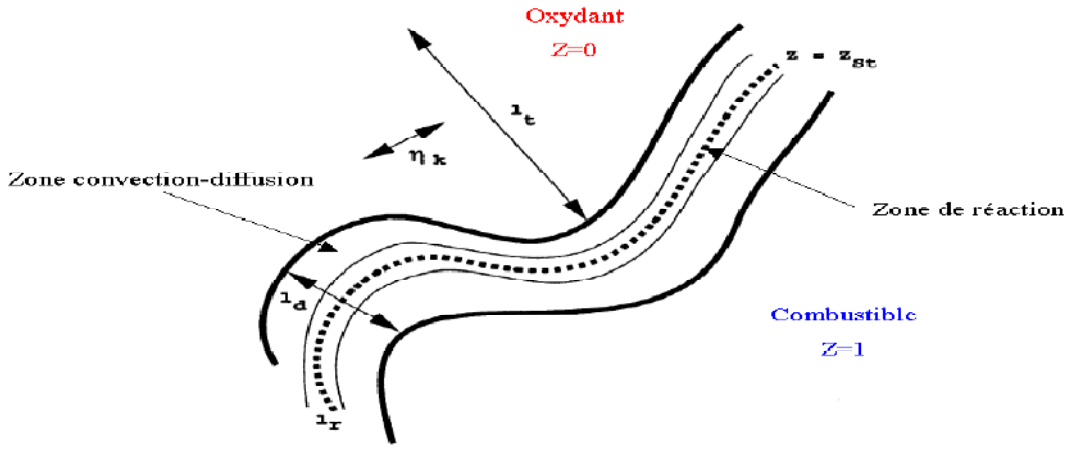


Fig. (I. 7): Schéma d'une portion de flamme de diffusion turbulente. [6]

Z est la fraction démêlage,l_t est l'échelle intégrale de la turbulence, $\eta_k$est l'échelle de Kolmogorov η_d est l'épaisseur de la couche de mélange,l_r est l'épaisseur de la zone de réaction.

Cette structure est appelée flammelette lorsque son épaisseur (l_r) est inferieure aux plus petites échelles de la turbulence (l_r).Lorsque la turbulence devient plus forte, les interactions avec la zone de réaction se font à toutes les échelles du spectre turbulent. Les petites échelles de Kolmogorov (η_k) vont provoquer un épaississement local de la zone de réaction si elles sont du même ordre de grandeur que l'épaisseur de réaction (l_r). Les plus grosses structures (l_t) vont être responsables, d'une part, de l'interaction entre deux portions de flammelette qui donneront des boucles de flammelette, et d'autre part, de l'étirement local des flammelettes pouvant conduire à leur extinction. Sous l'effet

de l'étirement (qui augmente le taux de dissipation scalaire l'épaisseur de mélange diminue

$$l_d = \left(\frac{D}{X_s}\right)^{1/2} \quad \text{I.1}$$

Avec, D le coefficient de diffusion et $X_s$le taux de dissipation scalaire représentant la dissipation de l'énergie de la réaction de combustion par la turbulence :

$$\boldsymbol{X_s} = D|\nabla Zs|^2 \quad \text{I.2}$$

La surface de réaction étant augmentée, la température de flamme diminue à cause de l'augmentation des flux de chaleur vers les gaz frais. Il y a extinction locale lorsque la température de flamme est inférieure à la température d'extinction du mélange

Cette zone de réaction est donc principalement influencée par la dynamique des fluides qui, comme on l'a vu, modifie la structure de flamme, mais aussi par la cinétique chimique qui détermine les taux auxquels sont consommées et produites les différentes espèces chimiques, ainsi que les transferts d'espèces et de chaleur qui ont lieu dans la flamme.

Tous ces paramètres sont relies entre eux, rendant le phénomène de combustion non-premelangée très complexe. Deux hypothèses sont alors souvent utilisées :

- La première ne considère que le mélange entre les espèces et le transfert de chaleur estsurtout réalisé par la turbulence. Ainsi les transferts diffusifs des espèces et de l'enthalpie sont donnés par le même coefficient de diffusion turbulente, indépendant des espèces. Le nombre de Lewis est alors unitaire. Cette hypothèse est vraie à partir de quelques diamètres de la sortie du bruleur ou les fluctuations de vitesse sont importantes et/ou le régime de flamme turbulente est établi .A la base de la flamme, les phénomènes de diffusion différentielle sont importants et ce sont les transferts diffusifs qui gouvernent le mélange dans la zone de réaction .Typiquement cette zone laminaire est environ de 10 diamètres pour les flammes de CO/H2/N2 et de 20 diamètres pour les flammes de CH4/H2.
- La deuxième hypothèse ne considère que les temps caractéristiques de la chimie soient inférieurs aux temps caractéristiques de la turbulence. De cette manière, en tous points et à tout moment, la réaction peut être écrite par un

schéma global simple où les espèces considérées ont le temps d'être produites et consommées dans les proportions stœchiométriques. Cette hypothèse est cependant mise en défaut pour les suies et les oxydes d'azote qui ont des temps de formation plus longs, et lorsque les interactions turbulence combustion ne permettent pas de considérer la réaction chimique comme infiniment rapide. [6]

I.6.Interactions flamme/turbulence

Pour une flamme de prémélange, on définit une vitesse S_L et une épaisseur e_l qui correspond respectivement à la vitesse de propagation de la flamme de prémélange laminaire puis l'épaisseur de la flamme considérée constante. On a :

$$S_l=\alpha\left(\frac{\upsilon}{\tau_c}\right)^{1/2} \text{ et } e_l=\beta(\nu\tau_c)^{1/2} \qquad \text{I.3}$$

υ Représente la viscosité cinématique du milieu réactif où évolue la flamme, τ_c représente un temps global de la chimie dans le processus de combustion.

Dans le cadre d'une flamme de diffusion turbulente, S_L et e_l seront simplement utilisées comme des grandeurs caractéristiques ,on a le terme τ_c qui pourra prendre en compte les zones d'extinctions ou d'allumages partiels.

On définit d'autres échelles qui permettront de mieux décrire les régimes des flammes de diffusion turbulentes. Il s'agit des échelles liées aux grosses structures de la turbulence. On a la vitesse $K^{½}$des gros tourbillons porteurs d'énergie puis λ_τ et τ_τ respectivement la longueur et le temps caractéristiques de ces gros tourbillons :

$$L_t=C\mu^{¾}\frac{K^{3/2}}{\varepsilon} \text{ et } \tau = C\mu^{1/2}\frac{K}{\varepsilon} \qquad \text{I.4}$$

Un dernier type d'échelles peut être défini par les phénomènes dus aux petites structures de la turbulence. Ce sont les échelles de Kolmogorov; ces petites structures disparaissent par dissipation. On a aussi les deux paramètres τ_κ et η qui représentent respectivement les échelles de temps et de longueurs des petites structures

$$\tau_k = \left(\frac{\nu}{\tau}\right)^{1/2} et\ \eta = \frac{\nu^3}{\varepsilon} \qquad \text{I.5}$$

On ajoute, en complément de ces grandeurs caractéristiques, deux nombres adimensionnels pour décrire les différents régimes d'une flamme de diffusion turbulente : le nombre de Damkhöler et le nombre de Reynolds turbulent

$$Da=\frac{\tau_t}{\tau_c} \qquad et\ \ R_{et}=k^{1/3}\frac{l_t}{\nu} \qquad \text{I.6}$$

Les régimes de flammes turbulentes sont décrits dans les repères (X, Y) ou (X', Y') par Barrère (Barrère, 1974) et Borghi (Borghi, 1984) :

Soit le repère Logarithmique (X, Y) suivant :

$$X=\frac{l_t}{e_l} et \qquad Y=\frac{k^{1/3}}{U_l} puis,\ X'=R_{et}\ et\ Y'=D_a$$

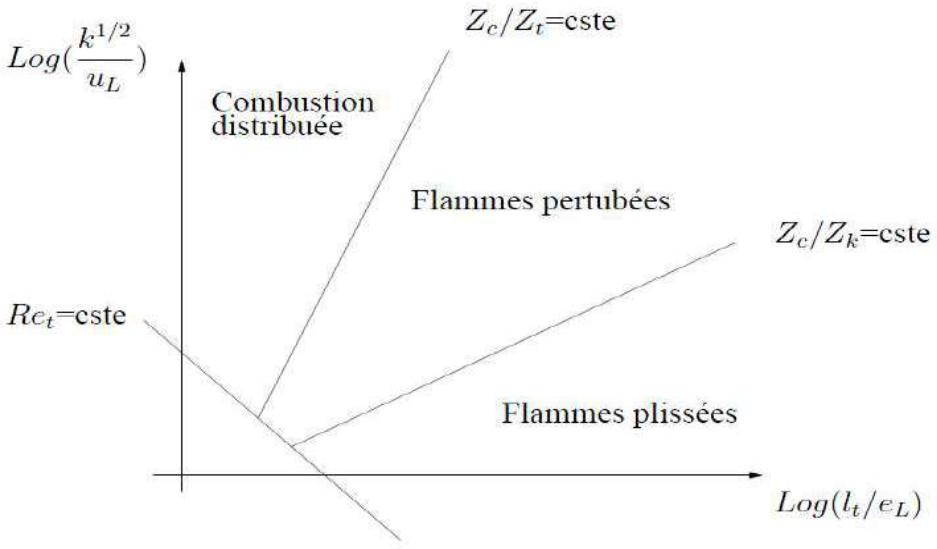


Fig. (I.8) : Régimes des flammes de diffusion turbulentes (diagramme de Barrère-Borghi).

Tout d'abord, on a une ligne frontière R_{et}= constante délimitant la $Z_e$correspondant au régime turbulent de celle du régime laminaire. Cette

frontière est une hyperbole dans les axes linéaires et une droite en coordonnées log-log ; nous avons en effet

$$R_{et}=\alpha\left(\frac{\tau_t}{\tau_k}\right)^2 = constante \qquad (I.7)$$

$$(X^2)=\left(\frac{\tau_t}{e_l}\right)^2=\alpha R_{et}\frac{\tau_t}{\tau_c}, \qquad (Y^2)=\left(\frac{k^{1/2}}{e_l}\right)^2=\alpha R_{et}\frac{\tau_c}{\tau_t} \qquad (I.8)$$

Or XY=constant ; d'où $Y=\frac{\beta}{X}$, α et β étant des constantes positives.

On note que la constante (R_{et}= constante) déterminant la limite du régime turbulent de celui laminaire est généralement fixée arbitrairement égale à l'unité ; mais en réalité, elle est de l'ordre de 30 à 50 pour les modèles de turbulence.
La partie inférieur du plan (X, Y) représente les régimes de flammes turbulentes où les temps de la chimie τ_c sont très petits. On obtient ainsi des flammes de diffusion de même structure que les flammes laminaires. Elles sont déformées par le champ turbulent ; on parle de "régime de flammes plissées" tant que les fronts de flammes ne peuvent pas être localement éteints par l'étirement, ce qui arrive lorsque $\tau_\chi = \tau_k$ à un ordre près.

Le temps de la chimie τ_χ sert de "jauge" dans le balayage du repère (X, Y). On rencontre en premier le plus petit temps de la turbulence τ_κ ; la frontière $\tau_c = \tau_k$ (à une constante multiplicative près) délimite la zone des flammes plissées et une zone où l'on voit progressivement apparaître des extinctions partielles et rallumages. Les temps de la turbulence arrivent à certains endroits à éteindre la flamme ; on parle de régime de "flammes perturbées". [5]

Puis τ_χ devient de l'ordre des temps caractéristiques des gros tourbillons. La frontière $\tau_c = \tau_t$ Limite la zone des flammes perturbées et une zone où la structure des flammes est complètement "dégradée" parla turbulence. On retrouve à ce niveau la même structure que dans le cas des flammes de prémélange turbulentes, à savoir : la présence de poches de gaz frais et brulés distribuées par la turbulence dans l'épaisseur de la flamme. On parle de régime de "flammes épaissies" ou de régime de "combustion distribuée".

On note que la frontière $\tau_c = \tau_t$ est une droite:

$$\frac{\tau_c}{\tau_t} = \text{constant} \qquad \text{(I.9)}$$

$$(X)^2 = \frac{{l_t}^2}{e_l} = \frac{\tau_c}{\tau_t} \quad , \quad (Y)^2 = \left(\frac{k^{\frac{1}{2}}}{u_l}\right)^2 = \alpha R_{et} \frac{\tau_t}{\tau_c} \qquad \text{(I.10)}$$

Y = f(X) est une droite de pente positive.

I.7. Influence de la turbulence

Comme les flammes de diffusion sont plus sensibles à l'étirement que les flammes de prémlange, elles sont plus susceptibles de subir des extinctions locales. Dans ce cas l'hypothèse de flammelette n'est plus justifiée.

Lorsque le nombre de Damkohler est petit (Da<1), les échelles de la turbulence et la longueur de mélange sont plus petits que l'épaisseur de la flamme .Ces Petits tourbillons intensifient le transport turbulent, et donc le mélange dans la zone de réaction régime est appelé régime de zones de rection distribuées. [7]

Si la combustion est rapide comparée au mélange, le nombre de Damkohler est grand (Da>1) et l'effet de la turbulence sur le front de flamme est faible. C'est le régime de flammette.

Ces deux régimes sont représentés schématiquement sur la fig. (I.9)

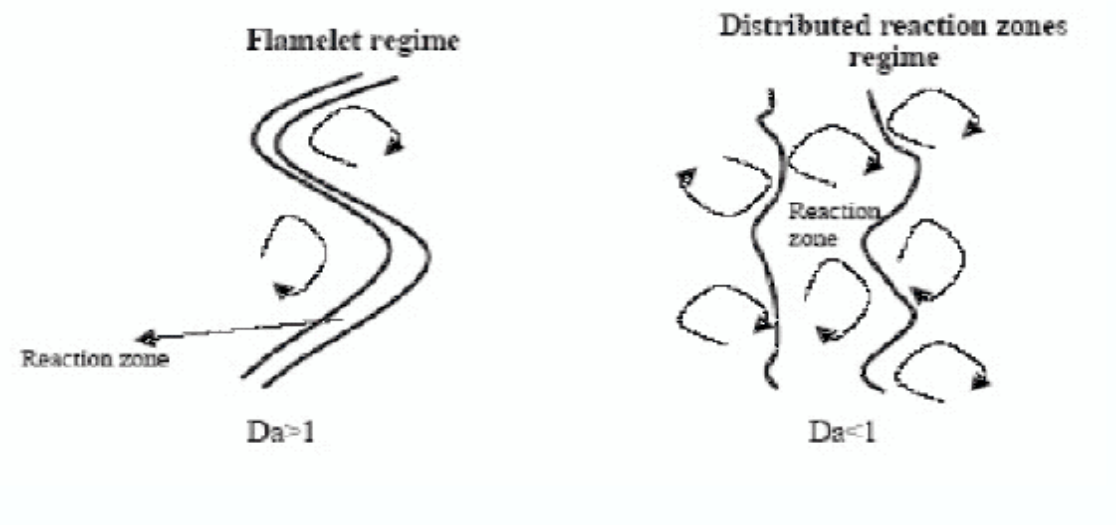


Fig. (I.9) – Effet de la turbulence sur la structure de la zone de réaction. [7]

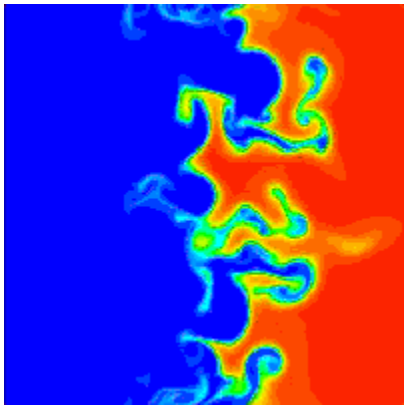


Fig. (I.10) *Effet de turbulences sur l'étirement du front de flamme*

CHAPITRE II

II. L'Hydrogène comme combustible

A l'aube du 21ème siècle, la production mondiale d'énergie est essentiellement basée sur des combustibles fossiles. Pétrole, charbon et gaz naturel (3 combustibles fossiles) représentent à eux seuls 90% de la demande en énergie primaire.

L'énergie nucléaire quant à elle représente 6% ; cette énergie est basée sur la fission de l'uranium 235. Or, on remarque que 96% de la consommation mondiale d'énergie primaire est basée sur des ressources non renouvelables et cette consommation ne cesse d'augmenter. La production d'énergie est liée à l'accroissement de l'effet de serre, notamment à l'augmentation de la teneur en CO2 dans l'atmosphère.

Ainsi, au 20ème siècle, la température moyenne de l'air à la surface du globe a augmenté d'environ 0,5°C ; ce qui entraîne des modifications climatiques irréversibles (fonte des glaces, élévation du niveau de la mer…).

Des accords internationaux, adoptés suite au sommet de Rio en 1992 et au protocole de Kyoto en 1997, visent à réduire de 5% les émissions de CO2 dans les pays industrialisés malgré les difficultés que cela entraîne au niveau de la production d'énergie.

D'après de récentes estimations, si la consommation est maintenue à ce rythme, dans 40 ans les réserves de pétrole seraient épuisées. Quant au gaz naturel et au charbon, ils disparaîtraient respectivement dans 60 et 200 ans.

Certains pays, dépourvus de ressources fossiles, ils n'ont pas une indépendance énergétique totale.

Par conséquent, si nous persistons dans cette voix, 3 problèmes vont se présenter à nous : l'augmentation de CO2 ayant pour conséquence des changements climatiques, une aggravation de la pollution dans les zones urbaines et la raréfaction des combustibles fossiles.

Il devient donc impératif d'utiliser de nouvelles sources primaires d'énergie, de préférence renouvelables. L'hydrogène, qui est à la fois renouvelable, compatible avec toutes les autres sources d'énergie et sans effets polluants, semble être l'une des meilleures solutions proposées à ce jour.

L'hydrogène est un gaz très explosif, inodore et incolore; c'est le plus léger de tous les éléments chimiques. Son numéro atomique est égal à **1**.

Dès le XVIème siècle, les alchimistes savaient préparer l'hydrogène gazeux ou dihydrogène par l'action de certains métaux sur les acides. C'est en 1766 que le chimiste anglais Henry Cavendish, physicien et chimiste britannique, fondateur de l'électrostatique, démontra que l'hydrogène était un élément en mesurant sa densité et le volume de gaz dégagé à partir d'une quantité donnée d'acide et de métal (l'hydrogène était obtenu en faisant réagir de l'acide sulfurique sur du fer).

En1781, Lavoisier proposa le nom d'hydrogène. Le mot hydrogène signifie "qui produit de l'eau". L'hydrogène est en effet un gaz qui brûle dans l'air et qui, en se combinant avec l'oxygène, produit de l'eau L'hydrogène ne représente que 0,8% de la masse de l'écorce terrestre; sur Terre, c'est l'eau qui constitue le composé d'hydrogène le plus abondant. En effet, l'hydrogène libre est rare, c'est un constituant des gaz rejetés par les volcans. [3]

L'hydrogène est l'élément le plus léger existant dans la nature et contient une grande quantité d'énergie dans sa liaison chimique. En raison de sa faible densité, l'hydrogène liquide pèse moins de combustible dérivé du pétrole. La densité de l'hydrogène gazeuse est 0,0899 grammes par litre (g/l). (L'air est 1,4fois plus dense) revirent hydrogène liquide à-252.77degrés Celsius, et il a une densité de 70,99g/l.

Avec ces propriétés, l'hydrogène a plus le plus élevé rapport énergie-poids de tous les combustibles : 1kilogramme (kg) de l'hydrogène a la même quantité d'énergie que 2,1kg de gaz naturel ou 2,8 kg d'essence. L'hydrogène brule dans l'air à des concentrations dans l'ordre de 4% à 75%en volume tandis que le méthane à 5,3% à 15%(concentration en pourcentage en volume). [10]

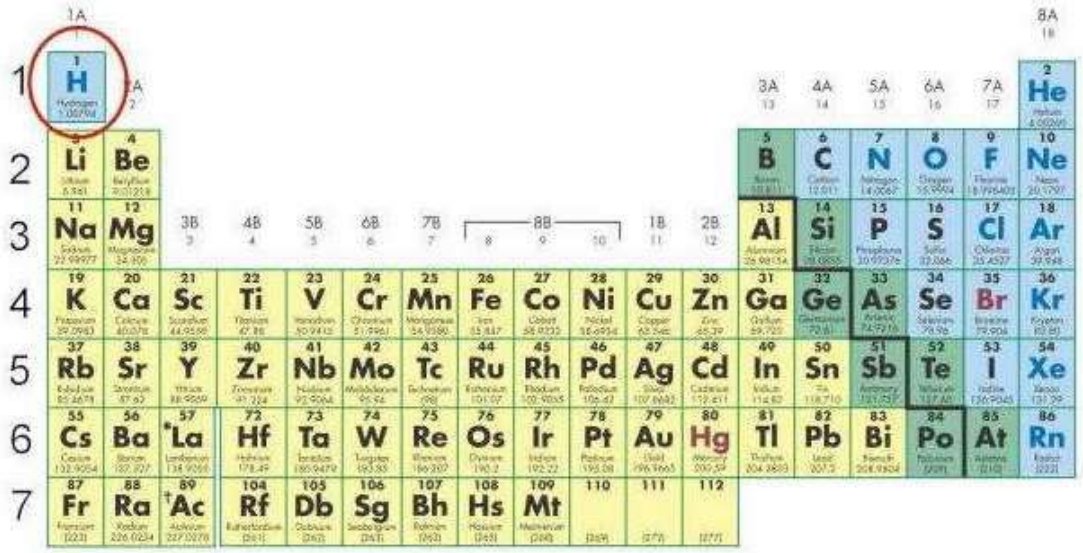


Fig. II.1 Table périodique

II .1. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures [3]

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de convertir des hydrocarbures en hydrogène. Néanmoins, elles entraînent la formation de dioxyde de carbone, qui est au centre des polémiques actuelles sur les problèmes liés à l'effet de serre. Elles présentent donc des avantages économiques et pratiques mais ne sont pas très écologiques.

N.B. : les exemples sont rédigés à partir du méthane car c'est le principal composant du gaz naturel.

II .1.1. Le vaporeformage :

Il consiste à transformer des charges légères d'hydrocarbures (méthane, gaz naturel…) en gaz de synthèse composé de monoxyde de carbone et de dihydrogène.

Pour cela on fait réagir l'hydrocarbure avec de la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel entre 840 et 950 °C. A partir du gaz de synthèse, on convertit le monoxyde de carbone à l'aide de vapeur d'eau pour obtenir du dioxyde de carbone et du dihydrogène.

Le vaporeformage du méthane CH_4 :

Vaporeformage $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$

Conversion du CO $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$

Bilan $\mathbf{CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2}$

Au final il faut séparer le dioxyde de carbone du dihydrogène et éliminer les impuretés.

II .1. 2. L'oxydation partielle :

Elle permet de produire de l'hydrogène à partir de charges plus ou moins lourdes d'hydrocarbures en les faisant réagir avec du dioxygène à une température et une pression élevée. Cette réaction produit du gaz de synthèse composé de monoxyde de carbone et de dihydrogène. Il faut ensuite convertir le monoxyde de carbone en le faisant réagir avec de la vapeur d'eau pour obtenir du dioxyde de carbone et du dihydrogène.

L'oxydation partielle du méthane CH4 :

Oxidation partielle $CH4 + ½O2 \longrightarrow CO + 2H2$

Conversion du CO $CO + H2O \longrightarrow CO2 + H2$

Bilan $\mathbf{CH4 + H2O + ½O2 \longrightarrow CO2 + 3H2}$

Cette méthode nécessite aussi une purification : les deux procédés envisagés pour le vaporeformage sont appropriés à l'oxydation partielle.

II .2 Production nucléaire d'hydrogène [3]

Les réserves nucléaires de la Terre sont considérables. C'est pourquoi l'utilisation de l'énergie nucléaire qui a l'avantage de ne pas produire de CO2 est donc envisagée pour produire de l'hydrogène. Les possibilités de production s'orientent vers la dissociation de la molécule d'eau qui est, elle aussi, très abondante. Cette dissociation peut se faire selon deux voies :

- -l'électrolyse de l'eau par du courant électrique produit par une centrale nucléaire.

- -des cycles thermochimiques endothermiques alimentés en chaleur par une centrale nucléaire.

L'électrolyse de l'eau fait appel à la réaction suivante : **$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$.** Elle s'opère par le biais du courant électrique produit dans ce cas par une centrale nucléaire. On envisage aussi d'utiliser l'énergie électrique récupérée sur le réseau pendant les heures creuses : l'hydrogène serait alors un moyen de stocker l'énergie telle une batterie d'accumulateurs. Néanmoins l'électrolyse de l'eau dévoile un faible rendement énergétique : 25 à 30%.

Les cycles thermochimiques présentent un rendement énergétique supérieur : de l'ordre de 50%, voire 60% en cas de cogénération d'électricité. Dans cette voie, l'énergie nucléaire est utilisée pour apporter la chaleur nécessaire à la réalisation des réactions. Il s'agit de cycles car la dissociation de l'eau est réalisée suite à plusieurs réactions dont les sous-produits sont réinvestis.

II.3.) Production d'hydrogène à partir d'enzymes [3]

On connaissait l'existence d'enzymes capable de réaliser la réaction réversible de l'oxydation de l'hydrogène depuis un siècle : les hydrogénases. Elles sont particulièrement étudiées depuis le premier choc pétrolier en 1973.
On distingue deux grandes familles d'hydrogénases :

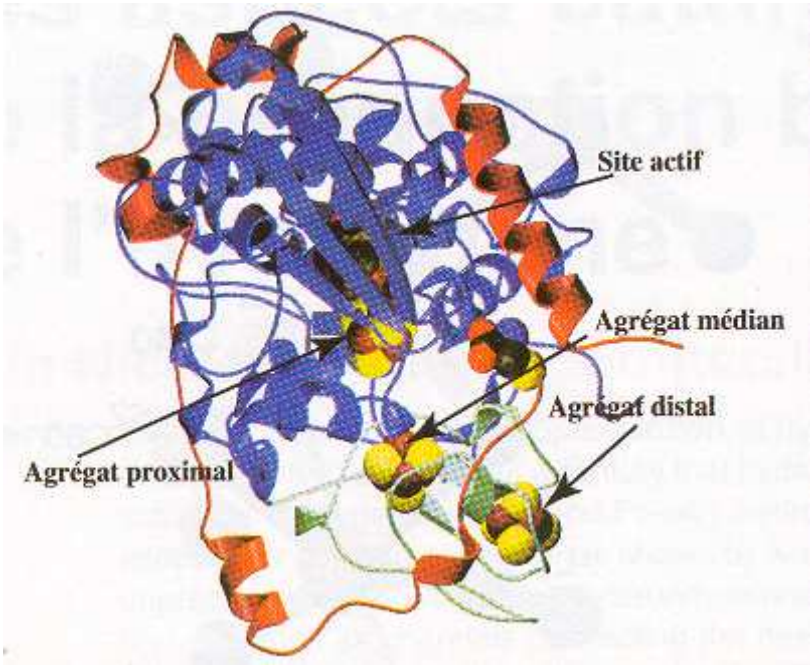


Fig. II.2 *les hydrogénases à fer : très actives, productrices d'hydrogène mais sensibles aux*
Inhibiteurs comme le monoxyde de carbone et l'oxygène [3]

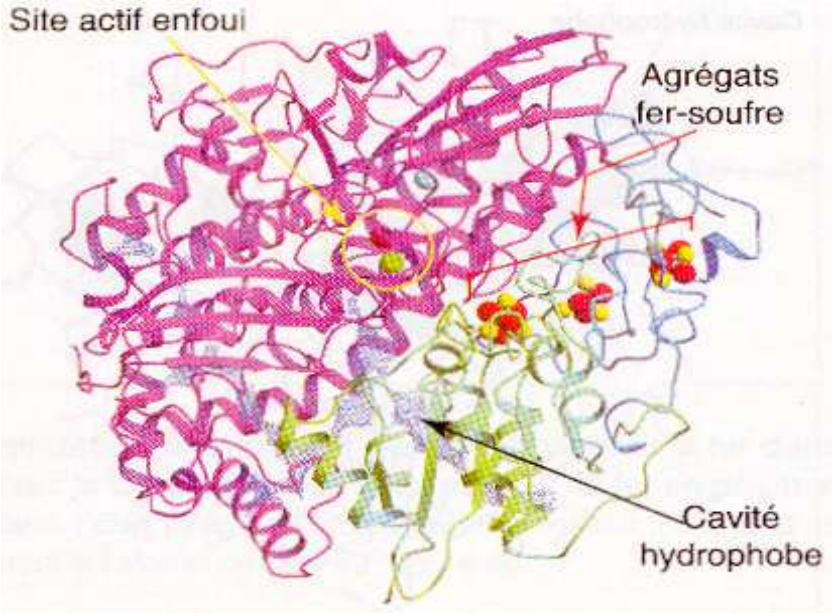


Fig. II.3 *les hydrogénases à nickel-fer : peu actives, moins sensibles aux impuretés, mais plutôt consommatrices d'hydrogène*

Elles réalisent la réaction suivante : $H_2O \rightarrow H_2 + ½O_2$. Elles sont capables de la faire dans les deux sens.

Ces enzymes font l'objet de nombreuses recherches afin de comprendre et de tirer profit de la manière de produire de l'hydrogène selon la nature. On envisage ainsi d'adapter les hydrogénases à l'utilisation industrielle de l'hydrogène ou bien de les mimer. En effet, elles possèdent des propriétés catalyseuses qu'il serait intéressant d'analyser afin de pouvoir les reproduire.

Ce procédé est en cours d'étude et n'a actuellement aucune finalité concrète.

II.4.) Production d'hydrogène en utilisant la biomasse [3]

La biomasse correspond à tous les végétaux qui se développent sur la planète grâce à l'assimilation de l'énergie solaire. Elle représente une ressource renouvelable considérable. On distingue, parmi les ressources utilisables pour la production d'énergie :

- la biomasse forestière : bois d'œuvre, rémanents forestiers, bois de taillis, écorces, chutes.
- la biomasse agricole : pailles, plantations possibles sur la jachère.
- les déchets : bois, papiers et cartons usagés, farines animales, autres résidus.



Fig. II.4 la biomasse agricole [3]

Pour produire du dihydrogène à partir de la biomasse, il faut faire une transformation thermochimique. Les produits de la biomasse sont composés principalement de C6H9O5.

La première étape consiste donc à sécher la matière qui devient alors C6H7O4. Ensuite, on chauffe à 600°C, pour provoquer la dégradation thermique : c'est la thermolyse. Après cette étape, les produits sont à 70% gazeux, sous forme de CH4, H2, CO, CO2 et quelques indésirables tels les goudrons. Les 30% solides restants sont essentiellement composés de carbone. On continue donc à élever la température jusqu'à 1000°C pour gazéifier le carbone. On introduit ensuite de la vapeur d'eau qui, réagissant avec le carbone, produit du dihydrogène et du monoxyde de carbone. On convertit ensuite le CO par une réaction avec de l'eau.

$C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$

Bilan $\mathbf{C + 2H_2O \rightarrow 2H_2 + CO_2}$

Après cette opération, on élève la température jusqu'à 1100°C afin d'éliminer les acides et les goudrons. Enfin, on raffine le gaz de biomasse pour récupérer le dihydrogène.

Le rendement de la transformation thermochimique est de 3KWh produits /1Kwh consommé.

II.5 .Usage de l'hydrogène :

. L'hydrogène est également utilisé dans les traitements thermiques des métaux, la fabrication du verre, la micro-électronique et la propulsion des véhicules spatiaux.

II.5. 1.ICE :

L'hydrogène comme l'essence ayant des propriétés explosives, il nous est paru comme envisageable le fait de l'utiliser comme l'essence en combustion directe dans un moteur à explosion. Cependant, même si un moteur utilise de l'hydrogène, il est toujours soumis au cycle de Carnot qui limite son rendement à 70%, et même si la

combustion de l'hydrogène est beaucoup plus « propre » que celle d'une essence ordinaire, le moteur rejettera toujours un peu de monoxyde d'azote.

L'hydrogène peut également être utilisé pour alimenter des turbines à gaz d'aéronefs.

En 1989, un triple jet-alimenté, modifiée avion Tupolev -154 avalé dans l'ancienne union soviétique à l'aide d'hydrogène liquide comme carburant. Daimler-Benz Aerospace AIRBUS (DASA), en coopération avec la Russie, est l'élaboration d'un avion alimenté par hydrogène liquide.

II.5.2 Pile à combustible :

L'hydrogène peut également servir de combustible et plus particulièrement pour les piles à combustibles. Le principe de fonctionnement est extrêmement simple : il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur Q, selon une réaction chimique globale universellement connue :

$$H2 + ½\ O2 \rightarrow H2O + Q$$

Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte ; c'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. à l'heure actuelle, le déploiement d'engins de manutentions fonctionnant à l'hydrogène est en cours à travers le monde. plusieurs constructeurs automobiles ont démarré des productions en série de véhicules électriques équipés de piles à combustible.

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant contribue à la baisse des émissions de CO_2 dans l'air. Utilisé dans une pile à combustible, le rendement est très élevé.
Le stockage à bord du véhicule doit être optimisé au niveau de la masse, du volume, du coût et de la sécurité. [3]

II.6.Stockage l'hydrogène :

Le stockage de l'hydrogène est rendu complexe du fait de sa très faible masse molaire et de sa très basse température de liquéfaction, tout particulièrement quand il s'agit d'un stockage mobile. Par conséquent, l'hydrogène peut-être stocké sous ses 3 états en fonction de son utilisation et des volumes mis en jeu.

Si l'état liquide s'impose indiscutablement quand le besoin se chiffre en tonnes, voire en dizaines de tonnes, le stockage à l'état gazeux sous pression présente de nombreux avantages quand les quantités mises en jeu ne dépassent pas quelques kilogrammes ou dizaines de kilogrammes. Le stockage sous forme solide (nanotubes ou hydrures) fait l'objet d'intense recherche car il parait particulièrement adapté aux stockages mobiles.

II.6.1. Stockage sous pression :

Le stockage et la distribution d'hydrogène sous pression sont une pratique standard, depuis de très nombreuses années, avec des bouteilles ou assemblages de bouteilles cylindriques, en acier, gonflées à 20 ou 25 MPa. L'inconvénient de ce mode de stockage est l'encombrement , seulement 14 kg/m3 à 20 MPa et à température ordinaire (21°C) contre 100 kg/m3 pour le méthane et surtout le poids qui résulte de l'utilisation d'aciers à de bas niveaux de contraintes pour éviter les problèmes de fragilisation par l'hydrogène. La situation a radicalement changé avec la technologie des réservoirs dits de type III ou IV. Dans ces derniers, des structures de renforcement en composite constituées de fibres (verre, aramide, carbone) et d'une résine (thermodurcissable ou thermoplastique) permettent de travailler à des pressions beaucoup plus élevées tout en réduisant la masse et en évitant les risques de rupture explosive malgré des agressions externes sévères. C'est ainsi que 35 MPa est pratiquement devenu le standard actuel.

II.6.2. Stockage liquide :

Les gaz que nous connaissons à la température ambiante sous la pression atmosphérique se liquéfient tous si l'on abaisse suffisamment leur température en

maintenant leur pression constante. Les températures de cette « condensation » sont en fait très différentes suivant la nature du gaz : ainsi l'hydrogène, maintenu à la pression atmosphérique, devient liquide à 20,3 K soit – 252,85 °C. Il est alors près de 800 fois plus dense que le gaz, d'où, à priori, l'intérêt évident que présente cette forme liquide pour le stocker et le transporter, mais un certain niveau de technologie cryogénique est à mettre en œuvre que ce soit pour le liquéfier ou pour le conserver à l'état liquide. L'hydrogène est utilisé sous cette forme depuis longtemps par les industriels, et en particulier par ceux qui le distribuent aux divers utilisateurs.

II.6.3. Stockage sous forme « solide » :

Le stockage de l'hydrogène sous forme « solide » est un abus de langage. L'hydrogène gazeux est soit adsorbé et retenu à la surface d'un matériau poreux soit absorbé lors de la formation d'un hydrure solide.

L'adsorption d'un gaz comme l'hydrogène par un solide est l'augmentation de la densité de ce gaz à la surface du solide par l'effet des forces intermoléculaires. Cette adsorption augmente avec la pression du gaz et est d'autant plus importante que la température est plus basse. Etant purement physique, l'adsorption est réversible : elle diminue lorsqu'on abaisse la pression ou que la température augmente. Utiliser ce phénomène de surface pour stocker un gaz ne peut se faire qu'avec un solide à grande surface c'est à dire à la fois très poreux et très divisé, sous forme de fine poudre. Dans la pratique si le stockage par adsorption exige de grandes surfaces spécifiques, il nécessite également une densité apparente des adsorbants la plus élevé possible afin d'emmagasiner un maximum de gaz dans un volume donné. Cela peut être obtenu par compactage des adsorbants, mais cette opération n'est guère possible avec les charbons actifs conventionnels en revanche d'après de premières expériences elle l'est avec des nanotubes, un intérêt évident pour ce nouveau matériau.

Une autre méthode de stockage de l'hydrogène, dite absorption, est fondée sur la formation d'hydrures métalliques solides. L'hydrogène moléculaire s'absorbe en effet dans une large variété de métaux et d'alliages métalliques. Cette absorption

résulte de la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes composant ces matériaux, liaison dite liaison métallique. Les composés ainsi formés sont appelés hydrures métalliques.

D'un point de vue pratique, il faut tenir compte des effets thermiques liés à l'hydruration (adsorption ou remplissage) et à la déhydruration (désorption ou vidage). L'hydruration est fortement exothermique (~ 150 kJ/kg) et la chaleur produite nécessite d'être évacuée. A l'inverse la déhydruration est endothermique et nécessite un apport de chaleur. Les températures de la réaction d'hydruration sont typiquement situées entre 300 et 650 K à des pressions de 0.1 à 10 MPa. Des protocoles ont été proposés pour l'utilisation des hydrures à bord de véhicules où on se sert de la chaleur produite par le fonctionnement du moteur pour la désorption, l'adsorption devant cependant s'accompagner d'un refroidissement du réservoir. Pour de telles applications mobiles ce sont plutôt les hydrures de magnésium et les alanates qui sont retenus alors que pour les applications stationnaire on utilise les hydrures à base d'alliages (lanthane-nickel, calcium-nickel, zirconium-manganèse, fer-titane).

II.7. Inconvénients et Avantages :

Avantage :

- L'avantage majeur est que l'hydrogène produisant environ 2,8 fois l'énergie par unité de masse que l'essence.
- Quand l'hydrogène est brulé, la seule émission est la vapeur d'eau .Le dioxyde de carbone(CO_2) n'est pas produit.
- L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers, ce qui représente environ3/4 de toutes les matières. L'hélium qui constitue l'essentiel de la participation restante de 25%. L'oxygène est le troisième élément le plus abondant dans l'univers. Tous les autres éléments sont relativement rares. Partout où il y'a de l'eau (H_2O), on peut avoir de l'hydrogène et de l'oxygène.
- Réduire la dépendance au pétrole. Nous avons montré que la technologie à hydrogène a été autour depuis plus de cent ans. L'hydrogène est un carburant très efficace et non polluant.

Inconvénients :

- Il a besoin de quatre fois le volume pour donner une quantité donnée d'énergie. Par exemple, un réservoir de 15 gallons d'essence contient 90 livres de l'essence un réservoir de 60gallons d'hydrogène gazeux pèserait seulement 34 livres. L'hydrogène a le potentiel de réduire la quantité de carburant consommée par les plates-formes, mais la taille du réservoir de stockage augmenterait.
- Contrairement aux combustibles fossiles qui peuvent être minées ou extraites, l'hydrogène doit être produit.
- L'hydrogène est incolore et inodore et brule avec une flamme presque invisible. Large intervalle d'explosivité de l'hydrogène, couplé avec son énergie d'allumage très faible, lui donnent un inconvénient potentiel car une accumulation d'hydrogène à l'intérieur d'un véhicule mal ventilé peut exploser facilement.
- L'ajustement dans les parties et composant manufacturés sera nécessaire pour l'hydrogène liquide cryogénique. La plage de température cryogénique est de -150 degrés Celsius (-238°F) à -273 degrés Celsius (-460° F).

Conclusion

On peut conclure que l'hydrogène présente des qualités très acceptables et en tant que carburant de remplacement et ouvre une voie énergétique prometteuse dans la période après pétrole.

CHAPITRE III

Introduction

La combustion est un phénomène très compliqué qui met en jeu plusieurs aspects (chimiques, physiques, mécaniques, …). Afin de déterminer les différents paramètres caractéristiques dans n'importe quel point de volume de contrôle, on procède à la résolution des équations du bilan aéro thermochimie, associées au système étudié. La solution analytique est presque impossible surtout dans le cas turbulent et non adiabatique, où les équations sont non linéaires. On opte donc pour les solutions numériques et ceci nécessite des modèles pour surmonter le problème de fermeture du système.

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

III.1. Les Equations gouverné

III.2.1.Equations de continuité :

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

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

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

III.2.2.Equations de conservation de quantité de mouvement :

Les équations de quantité de mouvement moyennées de Navier Stokes, connues sous le nom de RANS sont pour un fluide incompressible et newtonien données par :

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

Où les $-\rho u_j\overline{u_j}$ sont les composantes du tenseur des contraintes de Reynolds.

Pour les relier à l'écoulement moyen, on a recours au concept de Boussinesq [8] qui permet de les exprimer en fonction des gradients des vitesses moyennes :

$$-\rho u_i\overline{u_j} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial xj}+\frac{\partial u_j}{\partial x_1}\right) - \frac{2}{3}(\rho k+\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_1})\delta_{ij} \qquad \textbf{III.3}$$

F_i sont les forces de volume.

III.2.3. Equations de conservation de l'énergie

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

Avec :

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

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff}\left(\frac{u_j}{x_i}+\frac{u_i}{u_j}\right)\frac{2}{3}\mu_{eff}\frac{u_i}{x_1}\delta_{ij} \qquad \textbf{III.6}$$

Dans cette équation :

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

$\vec{j}$: Vecteur flux de chaleur du à la conduction et à la diffusion de l'enthalpie (effet Dufour).

k_{eff}: conductivité effective ($k+k_t$) ou kt est la conductivité thermique turbulente).

$(\tau_{ij})_{eff}$: tenseur effectif newtonien des contraintes visqueuses

T : température de mélange.

$D=D_{i,m}$: coefficient de diffusion de l'espace i dans le mélange (loi de Fick)

S_h : Energie due à la réaction chimique et au rayonnement.

III.2.4.Equations de conservation des espèces chimiques :

La détermination de la fraction massique pour chaque espèce, Y_i, se fait par la solution de l'équation de transport de la i^{éme} espèce, qui a la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Y_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\left(\rho D\mathrm{i,m} + \frac{\mu t}{sct}\right) Y_1\right) + R_1 \qquad \text{III.8}$$

Y_i : est la fraction massique de espèce i ;

Sc_t : est le nombre de Schmidt turbulent $\frac{\mu t}{\rho Dt}$;

R_i : est le taux net de production par réaction chimique

Calcul de la masse volumique :

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

R :est la constant universelle des gaz

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

p_{op} :est la prission de référence

III.2.5.Equitations d'état

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

$$p=\rho RT\sum\frac{Y_i}{M_i} \quad \text{III.10}$$

$$h=\sum h_1(T)y_1 \quad \text{III.11}$$

$$h_i=\int_{T_{r,f}}^{T} cp_i dT \quad \text{III.12}$$

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

C_p: est la capacité calorifique du mélange.

M_i : est la fraction massique de l'espace

III.2.6. Modèle de turbulence :

En plus des équations de conservation, le problème de combustion est généralement couplé avec la présence du phénomène de turbulence et de rayonnement.

Pour la turbulence, plusieurs modèles sont proposés[9]. **Le modèle k-ε** standard (qu'on a adopté pour cette étude) est un modèle semi empirique basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente k et de sa dissipation ε. L'équation modélisée de l'énergie turbulente est dérivée de l'équation exacte. Celle de la dissipation est obtenue sur la base d'un raisonnement physique. Dans ce modèle, l'écoulement est supposé complètement turbulent.

III.2.6.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}+\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial xj}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon \quad \text{III.14}$$

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

Ce terme est difinit par :

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

$\beta = \frac{1}{\partial}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$ ou :G_b est l'effet Buyancy(poussée d'Archiméde)

- **Modélisation de la viscosité turbulente :**

La viscosité turbulent μ_t est obtenue en combinant k et ε comme siut :

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

Pour la conctant c_μ : c_μ=0.09

III.2.6.2. Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente

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

Les constantes usuelles du modèle de turbulence k-ε sont données à partir de l'expérience ou de la théorie par :

$C_{1\varepsilon}$ = 1.44 ; $C_{2\varepsilon}$=1.92 ; $C\mu$ =0.09 ; σ_k=1.3

III.2.7. Modélisation de la réaction de combustion :

Plusieurs modèles de combustion existent dans la littérature. On présente ici quelques modèles qu'on a utilisé lors de cette étude et qui sont implémentés dans le code CFD fluent.

On note que le présent travail traite essentiellement un problème de flammes turbulentes non prémélangées (ou de diffusion). Ces modèles seront donc utilisés pour la modélisation des taux de réaction.

III.2.7.1. Modèle Eddy Dissipation :

Le modèle Eddy Dissipation qui est basé sur les travaux de Magnussen et Hjertager dans lequel la chimie est considérée très rapide par rapport à la turbulence.[9]

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

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

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

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

Où :

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

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

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

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

III.2.7.2. Burning Velocity Model (Premixed or Partially Premixed)

Le modèle pour la combustion pré-mélangée ou partiellement pré-mélangée peut être coupé en deux parties indépendantes:

- ✓ Modèle pour le progrès de la réaction globale: Modèle brûlant de vitesse (BVM), également appelé la fermeture de Turbulent Flamme (TFC)
- ✓ Modèle pour la composition des fractions réagies et non-réagies du fluide: Flamelet laminaire avec le PDF

Les fractions de masse dans la fraction non-réagie du fluide $Y_{i,fresh}$ sont obtenus par compositions linéaires du mélange de carburant et d'oxydant.

Les espèces dans la fraction brûlée du fluide$Y_{i,burned}$, sont calculées en appliquant le modèle de Flamelet.

III.2.8 Réaction progresse:

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

Combustible +comburant ⟶ produits

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHAPITRE IV

Introduction

On a utilisé dans le présent travail une approche CFD pour simuler une flamme turbulente non prémélangée Hydrogène-Air. Le code CFD **Ansys**, disponible au laboratoire de recherche LMP2M de l'Université de Medea, a été utilisé et particulièrement le module **fluent** des écoulements de fluides. On présente dans ce chapitre ce module et les étapes suivies lors de notre simulation.

La CFD, i.e. "Computationnel Fluide Dynamics" (soit en français, << Calcul de Dynamique des Fluides >> est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique. Les équations qui interviennent sont celles de la mécanique des fluides, résolues par des méthodes numériques. [10]

IV.1. ANSYS Fluent

ANSYS Fluent 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 allant de l'écoulement d'air autour d'une aile d'avion, à la combustion à l'intérieur d'un four ; des colonnes à bulles aux plates-formes pétrolières ; du flux sanguin à la fabrication de semi-conducteurs ; de la conception de salles blanches aux usines de traitement des eaux usées. Des modèles spécifiques sont proposés pour modéliser les phénomènes de combustion interne, d'aéro acoustique ainsi que les turbomachines et les systèmes multiphasiques, ce qui élargit encore son champ d'application.

Aujourd'hui des milliers d'entreprises à travers le monde utilisent ANSYS Fluent comme partie intégrante des phases de conception et d'optimisation de leurs produits. Son solveur avancé fournit des résultats rapides, précis, des maillages adaptatifs et déformables et peut évoluer facilement vers le calcul parallèle. A l'aide des fonctions personnalisables, les utilisateurs peuvent mettre en œuvre de nouveaux modèles spécifiques ou personnaliser entièrement les modèles proposés. Grâce aux fonctions interactives de prétraitement, de résolution et de post-traitement, il est facile d'interrompre un calcul, d'examiner les résultats à l'aide des fonctionnalités intégrées de post-traitement, de modifier un paramètre, puis de poursuivre le calcul au sein de la même application.

IV.2. Méthode numérique

Les équations décrites au troisième chapitre sont des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires, elliptiques et couplées. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature. On peut distinguer les méthodes suivantes :

- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes spectrales (MS).
- Méthodes des volumes finis (MVF).

Comme la plupart des codes commercialisés tels que : PHOENICS, STAR-CD, CFX-F3D, ANSYS, …etc, le code FLUENT utilise la méthode des volumes finis pour la modélisation numérique.

IV.3. Méthodes des volumes finis

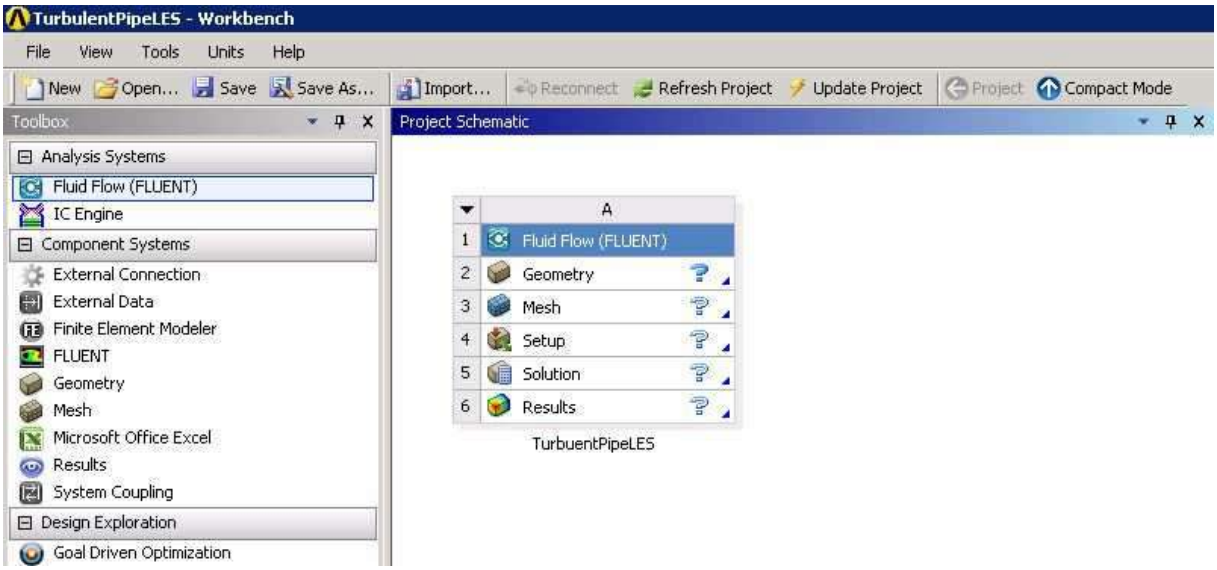
La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes entourant chaque point du maillage. Cette méthode, même si elle ne fournit qu'une précision du premier ordre, possède des qualités qui en font l'une des plus adaptées à l'étude des écoulements turbulents. En effet, celle-ci est très robuste et permet de traiter des équations comportant

des termes sources complexes et non-linéaires. De plus, elle a l'avantage de satisfaire la conservation de la masse sur chaque volume de contrôle. Enfin, elle peut être utilisée avec des maillages relativement grossiers, ce qui permet la mise en œuvre de code pour un coût raisonnable.

IV.4. Les étapes de mise en marche :

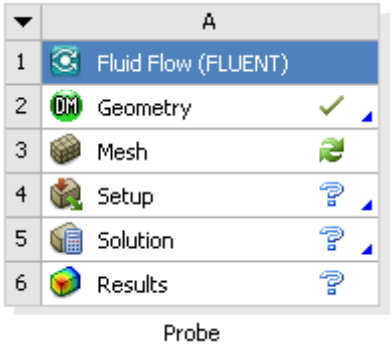
1. Allez dans le menu, programmes : choisis **>Ansys>Worbench**
2. Sélectionnez le système d'analyse **fluent** (à gauche), glissez-le dans le schéma de projet (à droite), et lâchez-le dans le rectangle en surbrillance.

3 Double-déclic sur l'installation pour lancer **fluent** :



IV.4.1. La géométrie :

Dans **fluent**, il y' a 5 étapes (cellules)



Faites un clic gauche sur la cellule Géométrie est choisis

Prospérités >Analyses Type **3D**

Identifiant des états de cellules:

 Non atteint: données ascendantes manquantes**.**

 De · requise: corriger la cellule ou les cellules ascendantes.

 Régénèrent requis: les données ascendantes ont changé, besoin de régénérer la cellule. Une mise à jour également régénérera la cellule et régénérera n'importe quelle donnée de rendement (par exemple maille, résultats).

 De requise: les données ont changé et le rendement de la cellule doit être régénéré.

 À jour.

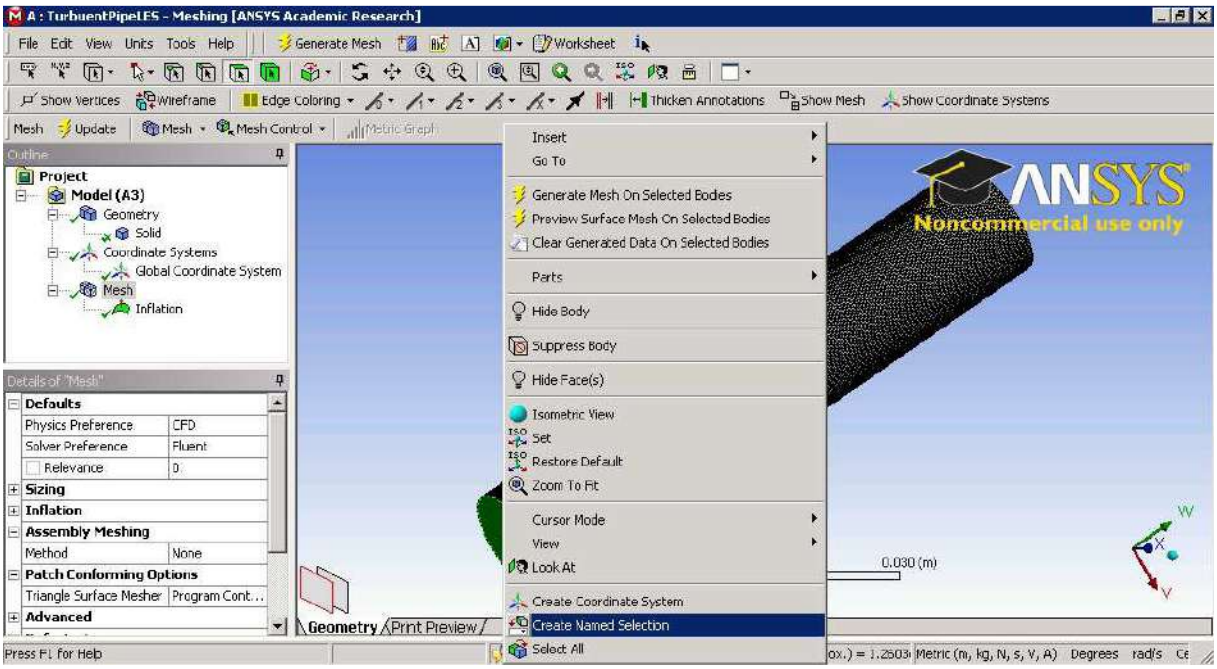
 De change en attendant: la cellule est localement à jour mais peut changer quand la prochaine mise à jour est due exécuter aux changements ascendants.

 Interrompu: le solutionneur a été manuellement arrêté avant qu'il ait fini. Peut employer le résumé ou la mise à jour pour continuer à la solution.

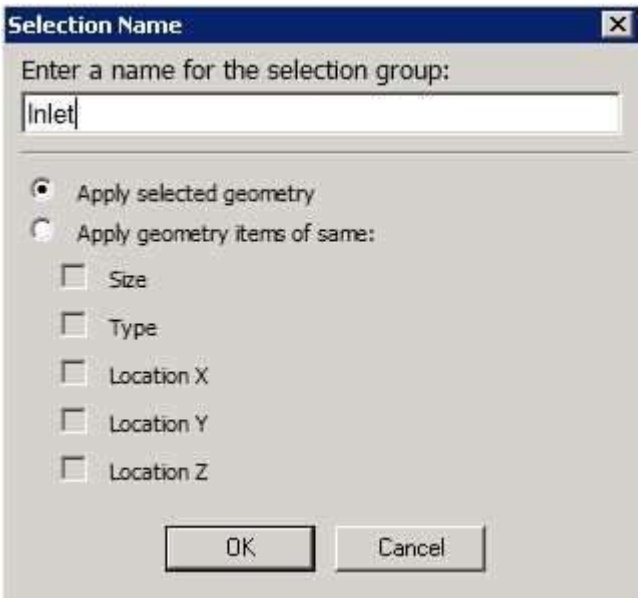
IV.4.2. Le maillage :

Le degré de résolution de maille est exigé dans chaque région du domaine. La maille doit résoudre les dispositifs géométriques d'intérêt et capturer des gradients de souci par exemple, pression, gradients de la température…etc.

Elle peut prévoir des régions des gradients élevés pour employer l'adaptation et augmenter la résolution.



Nommée la sélection (in let, out let, Wall…..etc.)

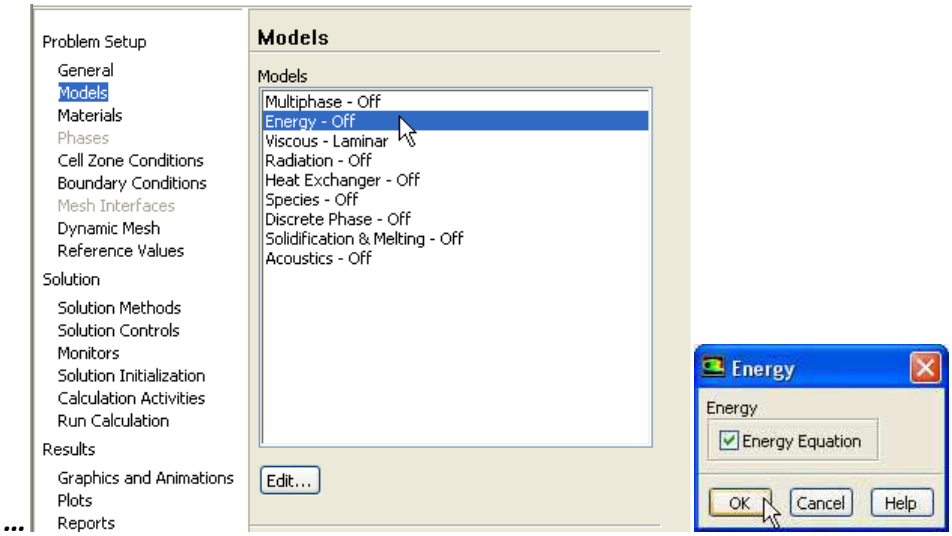


IV.4.3. la configuration :

Cette étape a pour objectif de définir les conditions aux limites et de choisir le modèle utilisé (**ex :** modèle de turbulente et modèle de combustions et modèle de radiation …etc.)



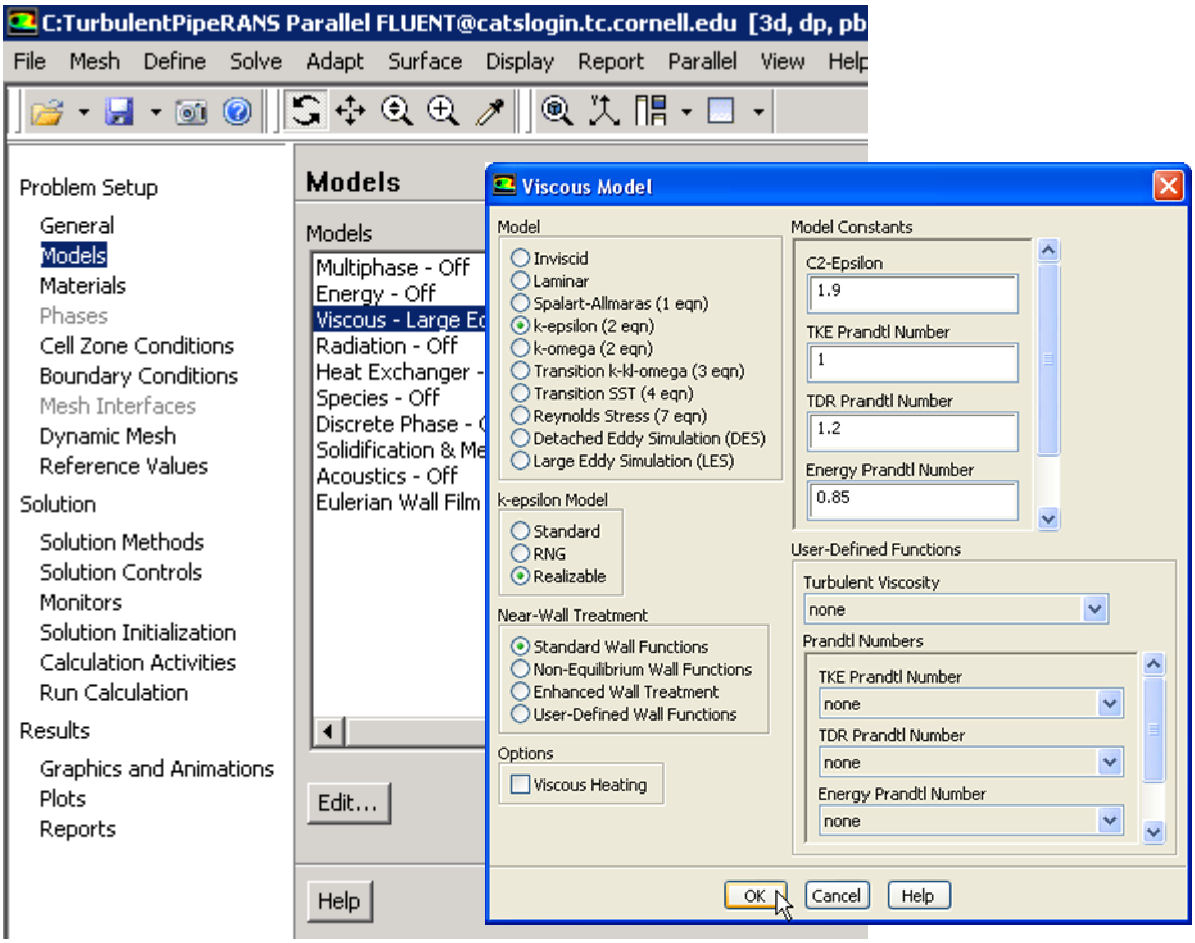
(Cliquer) Problem Setup > Models >



Activer l'équation de l'énergie pour que la variation de la température simuler au model.

Models → Viscous →Edit...

C'est le model **k-epsilon (2eqn)** avec l'option fonction de paroi **(Wall function)**. Cette étape représente une approche pour modéliser l'écoulement prés des parois.

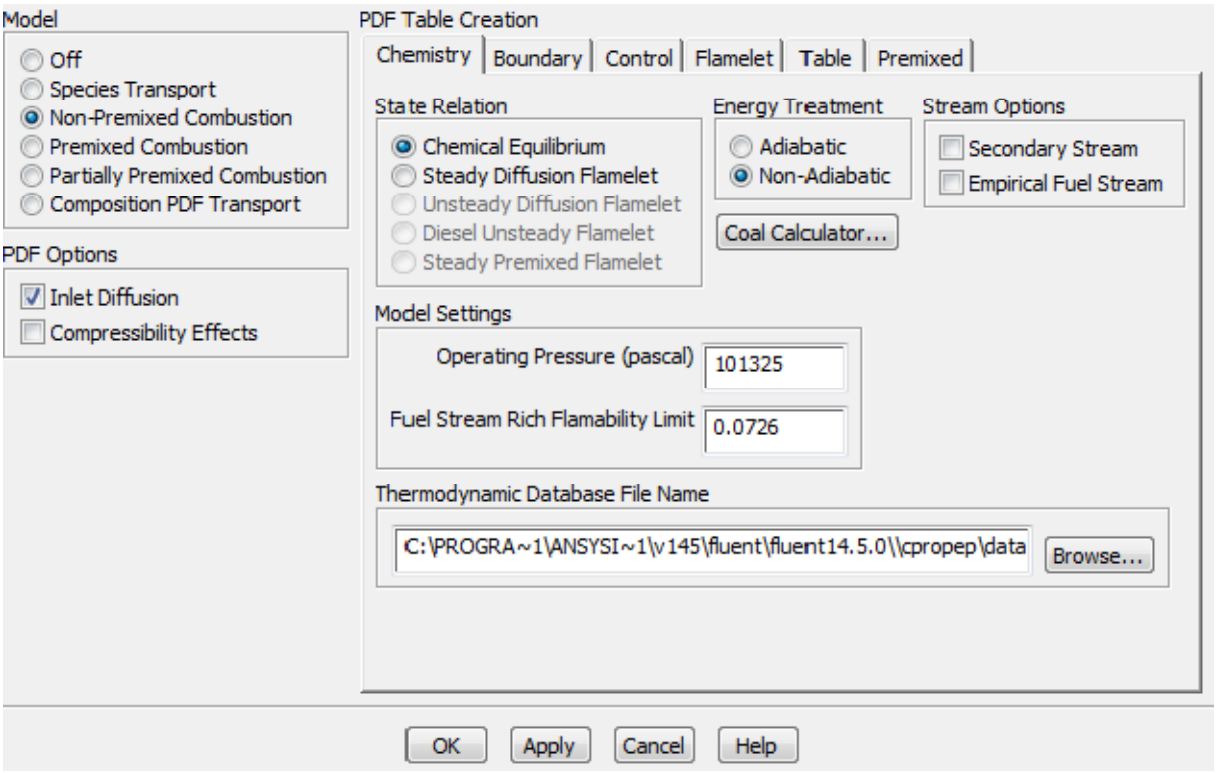


❖ **Model > species > edit**

a) sélectionné **non- premixed combustion.**

b) sélectionné **in let diffusion** sur **PDF option**

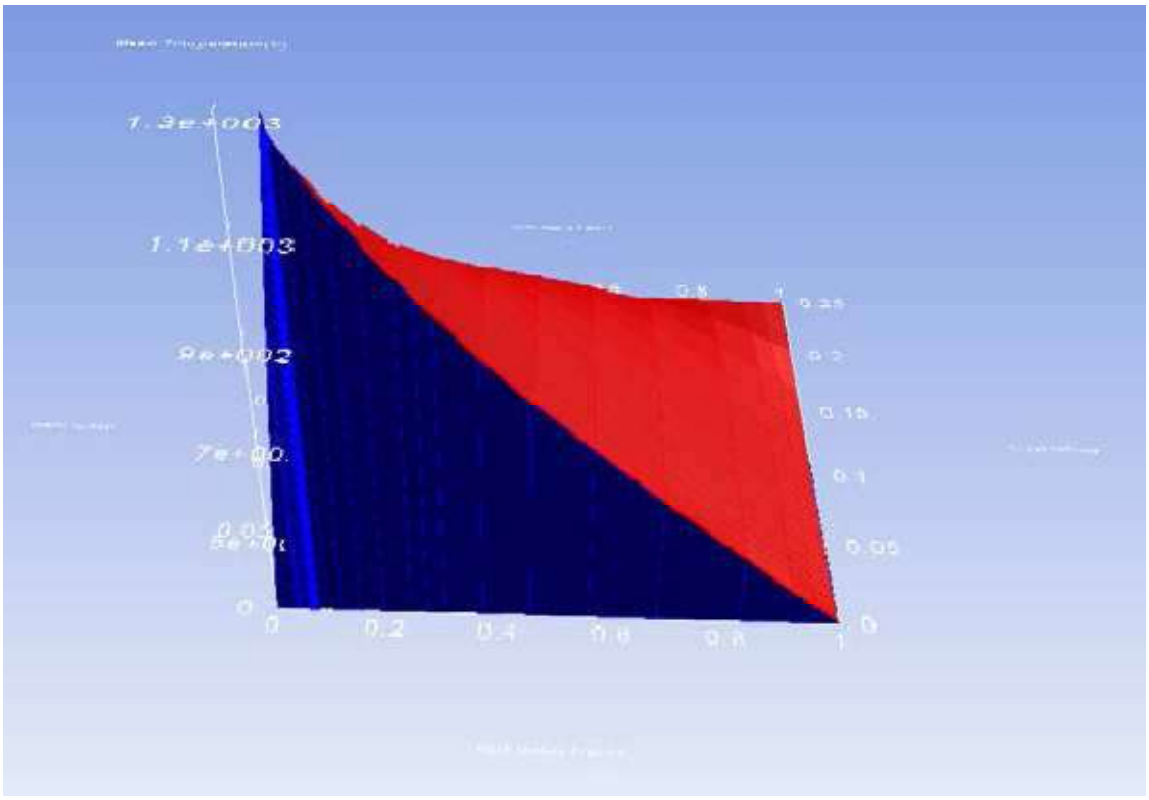
c) prend les sélections par défaut de **equilibrium** et **non adiabatique**.



d) maintenant cliquer sur **boundary** et définis **boundary speices**.

Speices	fuel	oxid
H2	1	0
O2	0	0.231
N2	0	0.761
H2o	0	0.00720

e) cliquer sur **table >** ***calculate PDF table > display***



f) enregistrer le fichier **PDF** crée : **file> export PDF > bureau**

❖ Materials

Problem Setup > Materials > Fluid > Create/Edit

C'est le choix du fluide utilisé avec l'introduction des données concernant les propriétés physique.

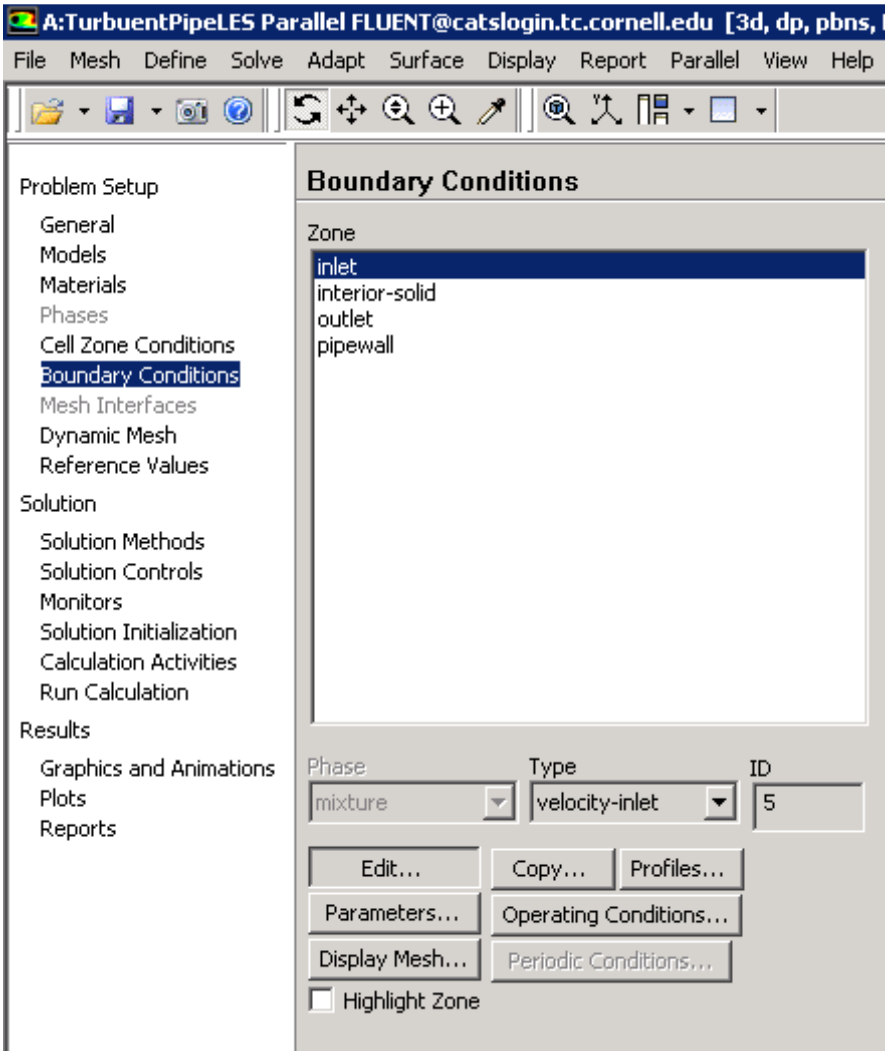
On note qu'il faut cliquer sur le bouton **change/ create** avant de quitter le panneau

Créez les conditions de frontière pour un domaine

Les conditions aux limites pour chaque frontière serons défini avec la fenêtre **boundary condition** après avoir sélectionné chaque fois la frontière concernée et faire rentrer les conditions aux limites de cette dernière ensuite valider.

❖ Boundary Conditions

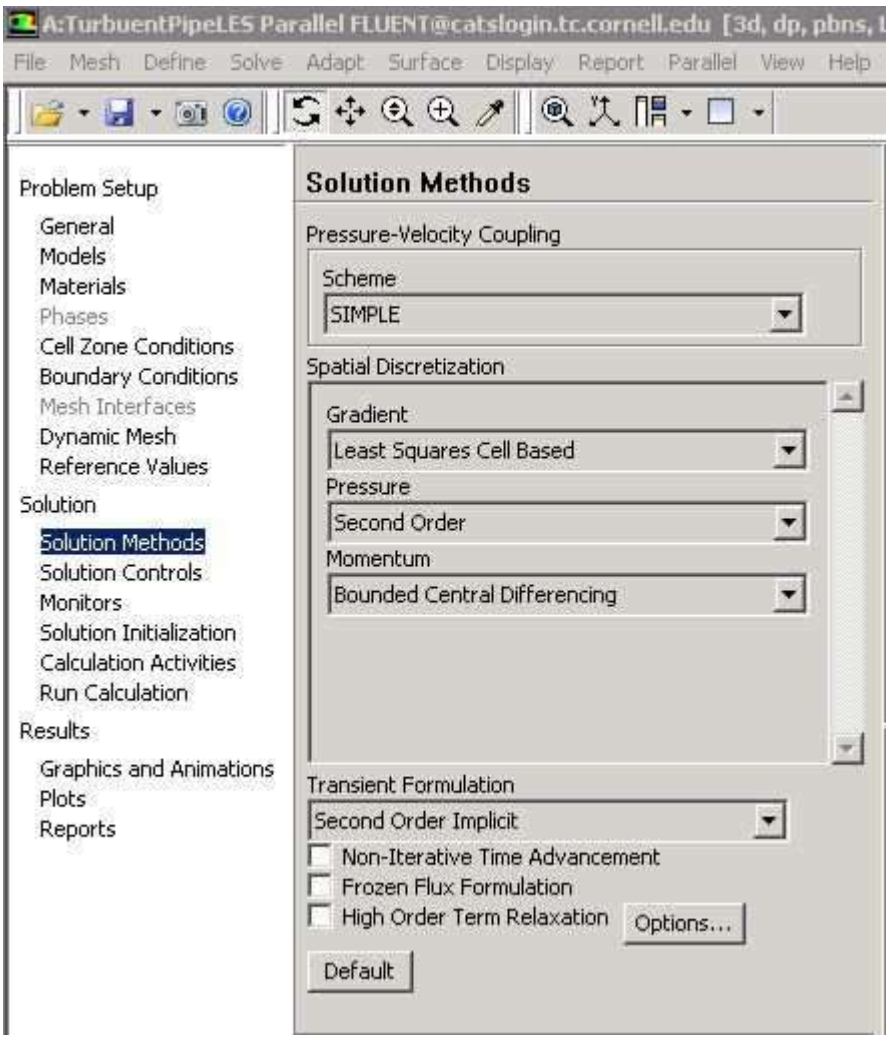
File > Read > Profile...(PDF)



IV.4.4 LA SOLUTION

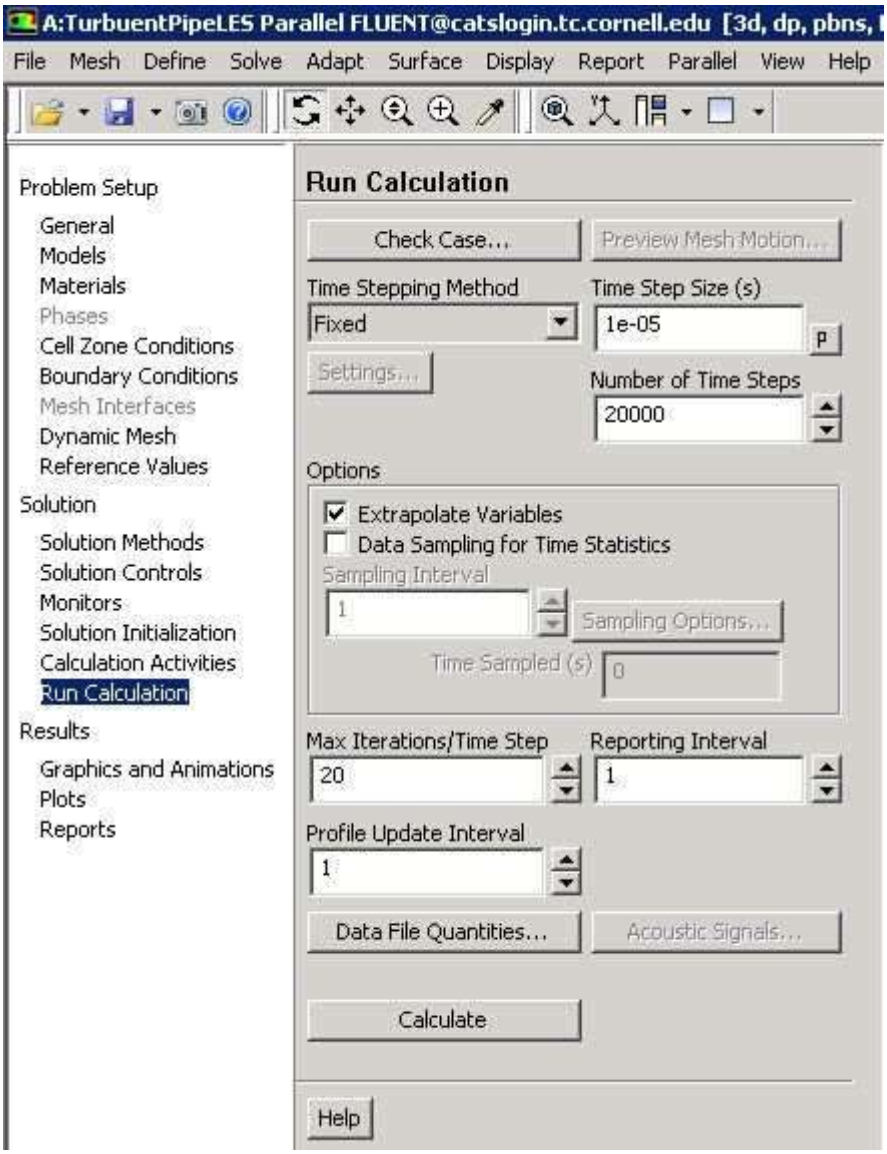
❖ Arrangements du solver

Le dernier menu utilisé pour entamer le calcul est le menu **(solution). O**n doit choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation les facteurs de relaxation et le critère de convergence, le calcule est initialise d'après les conditions aux limites.



❖ Execution du calculus :

Cliquer **calculate** pour lancer les calculs



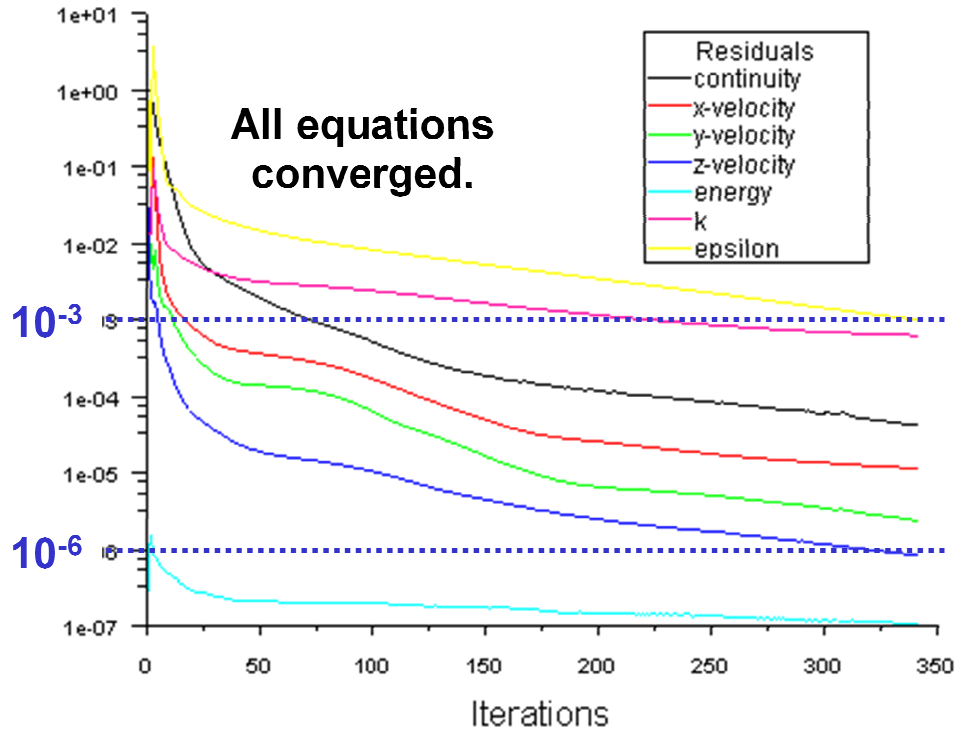


Fig. IV.1. Evolution des Résidus de la solution (Suivie de Convergence)

IV.4.5. Les résultats :

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

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

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

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

CHAPITRE V

V.1. Description du problème

Le code « fluent » a été utilisé pour simuler le transport des écoulements réactifs dans un bruleur .la configuration géométrique considérée dans le présent travail est illustrée sur la (figure **V.1)**.

La chambre de combustion a un diamètre de 500 mm et une longueur de 1510mm.

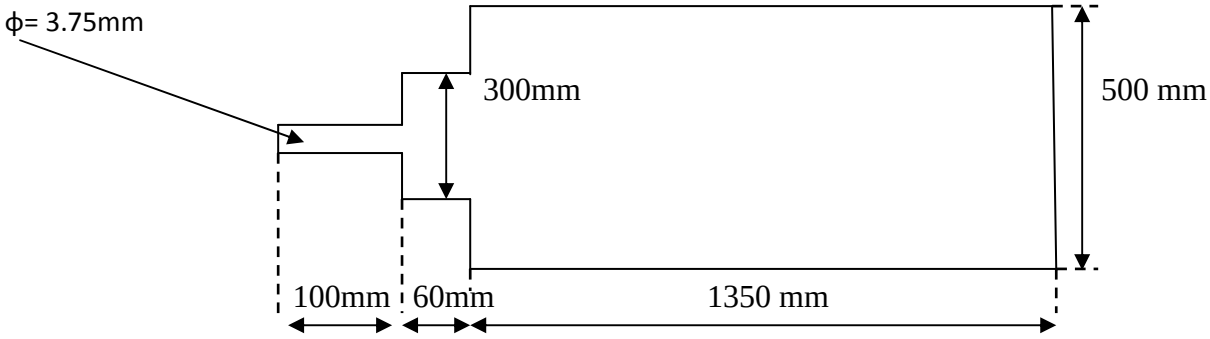


Fig. V.1 Géométrie détaillée de la chambre de combustion

Le bruleur est constitué d'un tube Horizontale de diamètre extérieur égal à 500 mm centré sur deux sections transversales. Le tube central apporte le combustible (**H2**) avec une vitesse de 296m/s, ce qui assure un régime turbulent. L'écoulement périphérique est un écoulement d'air en amont débauchant à 1 m/s. Cet écoulement est pleinement turbulent et son intensité initiale est égale à 10%.

Le domaine d'étude est basé dans sa globalité sur la zone de développement du jet (zone de flamme).

V.2. Configuration et choix de modèles

Pour tout problème, on doit choisir :

- Le matériel à utiliser : dans notre cas le mélange combustible à étudier
- Le modèle de combustion pour suivre l'évolution et la progression de la réaction chimique de combustion

- Le modèle de turbulence associée
- Les équations de conservation à résoudre qui gèrent l'écoulement du fluide en occurrence :
    - ✓ Équations de continuité .
    - ✓ Équations de conservation de quantité de mouvement .
    - ✓ Equations de conservation de l'énergie.
    - ✓ Equations de conservation des espèces chimiques .

Combustible (hydrogène): H2, O, H, OH, O2, H2O, HO2, H2O2, NO, HNO, N2, N, NO2, N2**.**

V.3 maillage

Dans la présente simulation, les maillages utilisés sont non-uniformes avec des mailles de forme quadrilatérale. Un raffinement au niveau du diamètre a été effectué afin de capter les différents phénomènes qui peuvent intervenir dans cette zone où les gradients des variables dépendantes sont importants notamment les gradients de vitesse.

Les schémas de discrétisation des différentes variables sont résumés dans le tableau **(**V.1)

Tableau (V.1) : Schéma de discrétisation.

variable	schéma
Pression	Standard
Quantité de mouvement	Décentré 1 er amont ordre
Couplage pression _ vitesse	Simple
énergie	Décentré 1 er amont ordre
Energie cinétique turbulente	Décentré 1 er amont ordre
Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulent	Décentré 1 er amont ordre
Fraction massique d'espèces	Décentré 1 er amont ordre

V.4. Effet du Maillage

On a testé au début plusieurs maillages à raffinement progressif afin de voir l'impact du maillage sur la solution. On remarque qu'à partir d'un certain seuil, le raffinement du maillage n'influe plus sur la qualité de la solution (ici la vitesse axiale par exemple) qui ne change pas d'une manière significative. On peut conclure que la solution est indépendante du maillage. On adopte alors le maillage de 85375 nœuds. (Figure V.2)

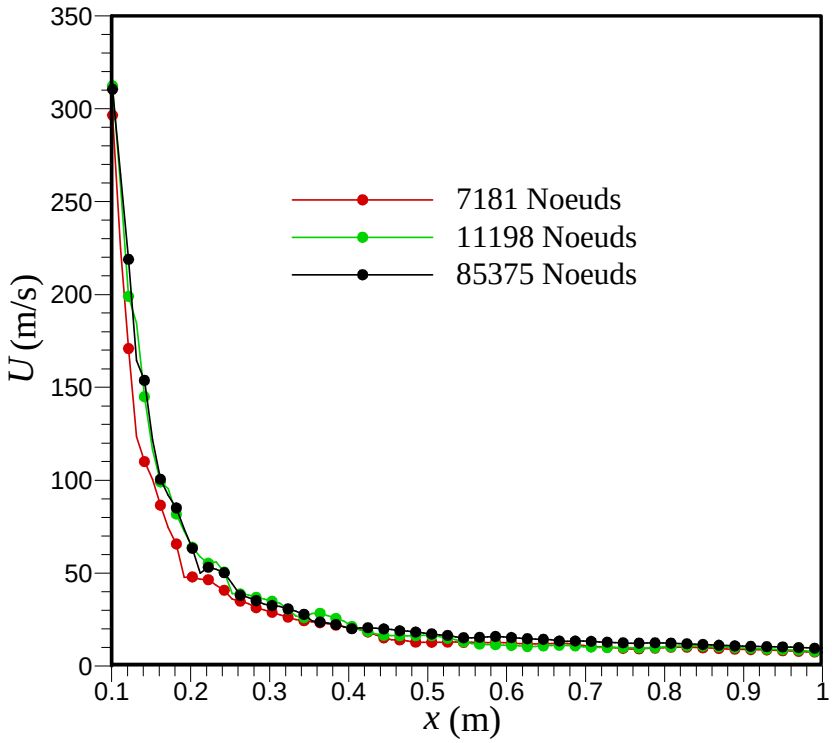


Fig. V.2 Independence du maillage

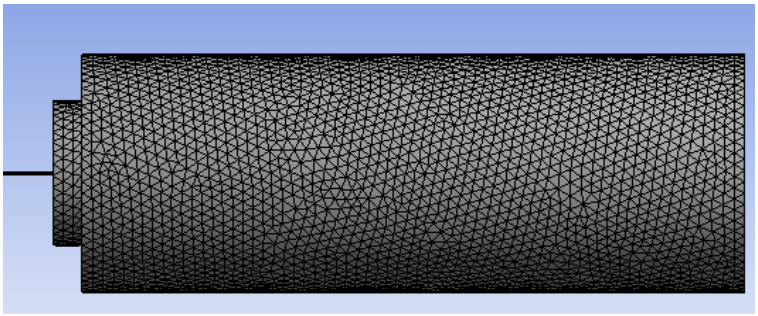


Fig. V.3 maillages (85372 nœuds)

V.5. Discussion des resultats de simulation

V.5.1 Champ de température

La variation de la température suivant la direction axiale est montrée par la figure(V.3). Une augmentation rapide de la temperature ,qui est l'une des manifestations les plus importantes de la combustion est constateés dans la zone de reaction. La temperature maximale atteinte est de l'ordere de **2150 K**.

La température augmente de façon régulière jusqu' à une distance égale à x = 0.36 m pour laquelle la température atteint sa valeur maximale (définissant la longueur de flamme) et qui se situe sur l'axe du jet (l'axe de symétrie) avant qu'elle diminue progressivement.

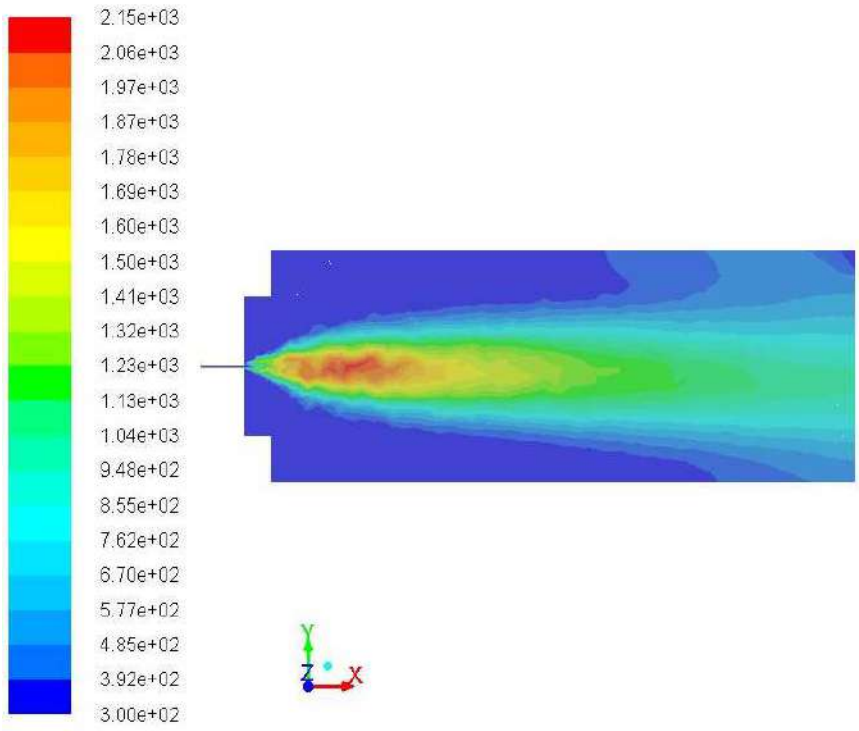


Fig. V.4- Contour de la température suivant l'axe de la flamme

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

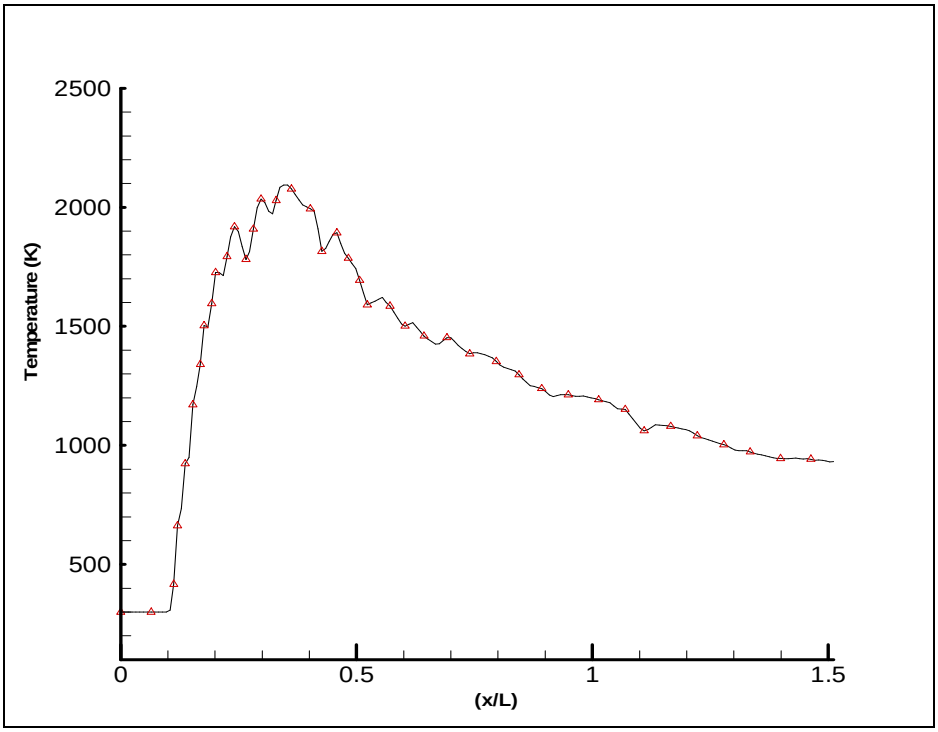


Fig. V.5- Profile axial la température suivant l'axe de la flamme

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

V.5. 2. Champ turbulent

Concernant le champ turbulent, la figure V.6 montre que l'énergie cinétique entame dans un 1er temps un régime décroissant depuis la sortie du bruleur et le long de l'axe ; ce qui laisse penser que la combustion joue un rôle dissipatif. Généralement, ce phénomène est appelé « dissipation par délitation » Dans un 2ème temps la turbulence sur l'axe est fortement intensifiée. Cette augmentation est due aux jets réactifs, c'est une zone de forte production de turbulence et des gradients de vitesse moyennement importants.

Les figures V.6, V.7 et V.8 illustrent l'évolution, le long de l'axe du jet, de l'énergie cinétique, l'intensité de la turbulence et son taux de dissipation, respectivement. La similitude entre les composantes k et Epsilon peut s'expliquer par le fait que là où il y a une turbulence intense dans le jet, il y a aussi un taux de dissipation important.

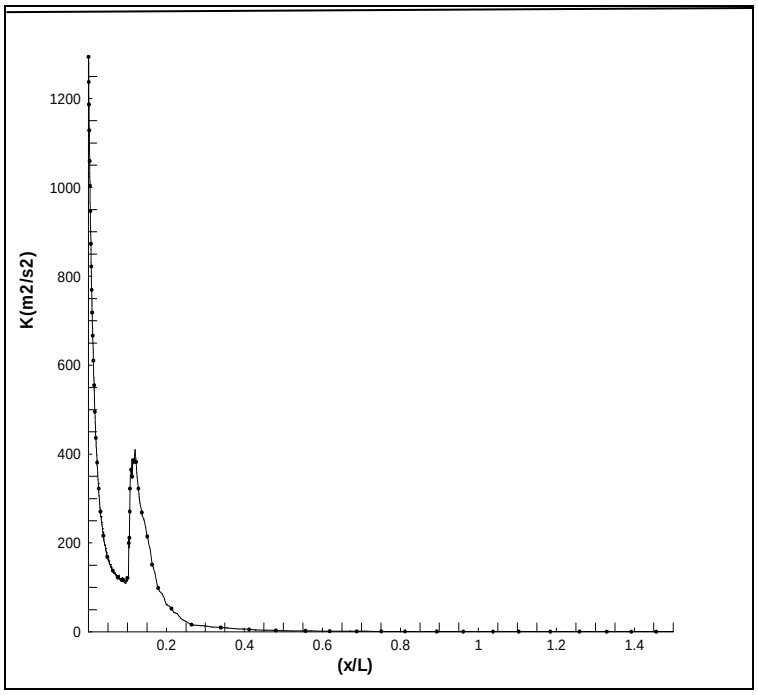


Fig. V.6 profil axial de l'énergie cinétique turbulente

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s , T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

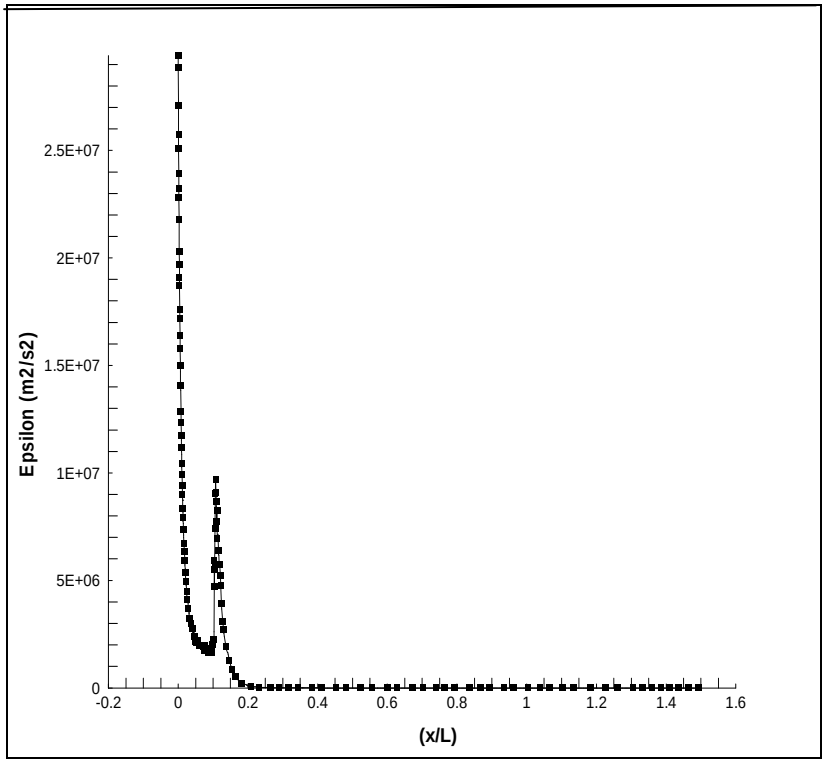


Fig. V.7 profil axial du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulent

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

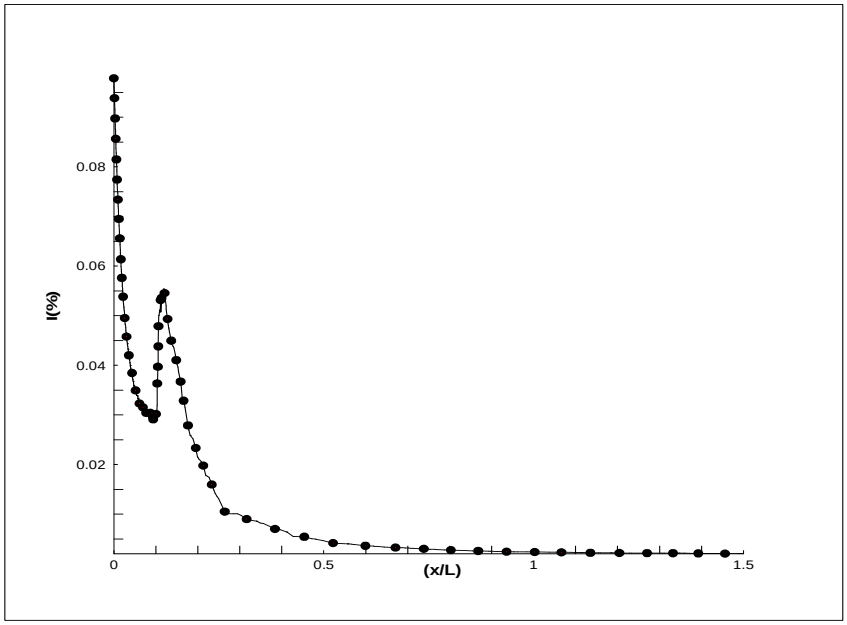


Fig. V.8 intensité de turbulence

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

V.5.3. Le champs de fractions massiques de certaines espèces dans la flamme

Sur les figures V.9 et V.10 sont representées, respectivement, le profil axial et le contour de l' evolution axial d'hydrogene illustrant ainsi la consomation du combustible. En effet, la fraction massique diminue progressivement de la valeur initiale (en sortie du jet) pour disparaitre complètement à la fin de la zone de réaction. On observe près de la sortie du jet d'hydrogène que le centre du jet est riche en H_2 ; la zone de la température élevée (zone de flamme) occupe un espace annulaire qui sépare la zone riche en hydrogène de celle, extérieure, riche en oxygène, (voir Figures V.11 et V.12)

Les produits de combustion, inexistants au début dans le mélange, vont progressivement apparaitre et augmenter pour atteindre des valeurs maximales dans la zone de réaction comme le montrent respectivement pour la fraction de NO (les figures V.13 et V.14) et la fraction de H2O (Figures V.15 et V.16). On notera un comportement similaire de ces deux fractions.

En aval, au front de la flamme, la concentration de ces espèces diminue puisqu' elle se mélange avec l'air de l'environnement.

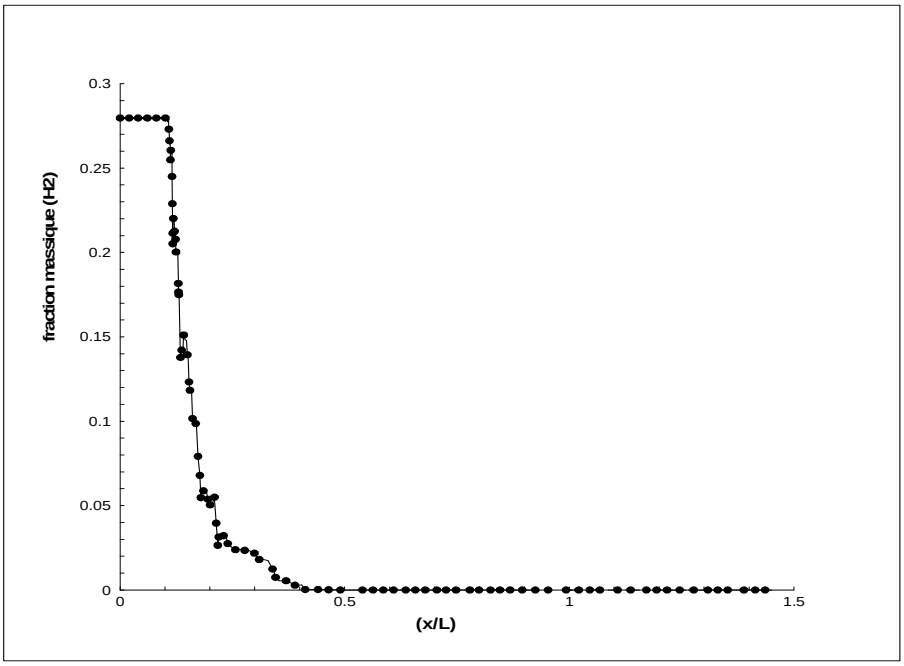


Fig. V.9 Profil axial de la fraction massique d'hydrogène

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

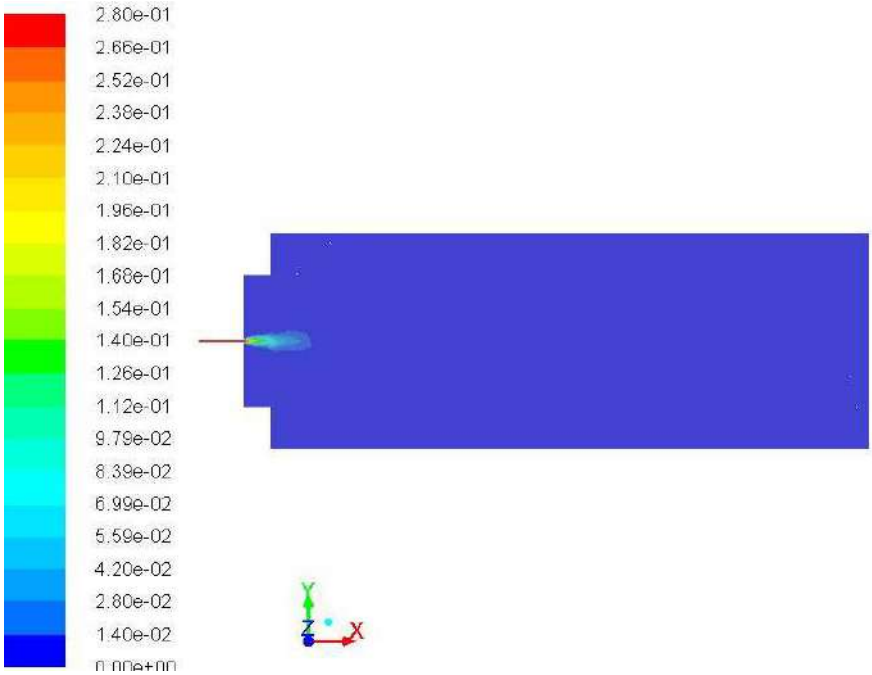


Fig. V.10 Contour de la fraction massique d'hydrogène

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

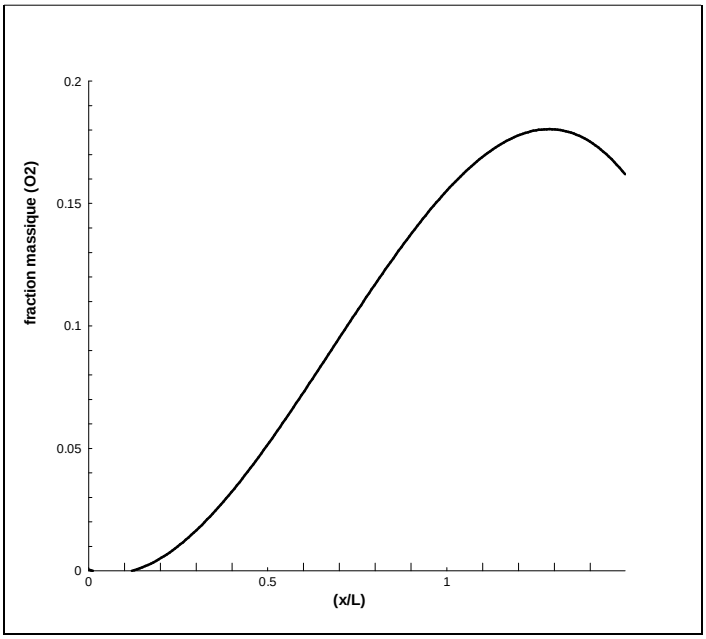


Fig. V.11 Profil axial de la fraction massique de (O2)

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

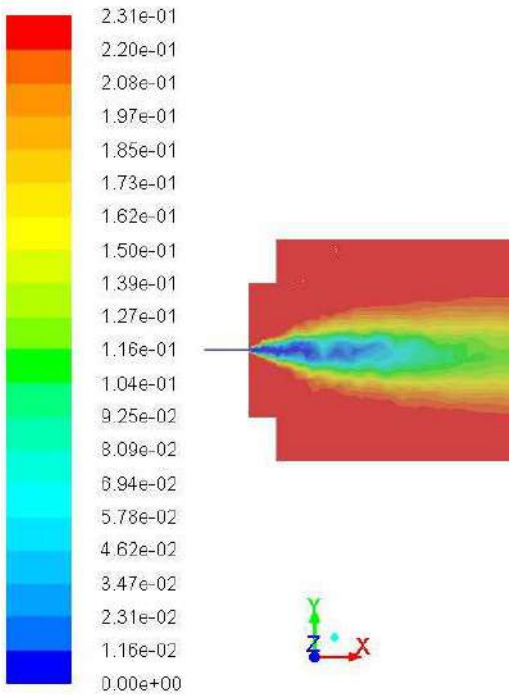


Fig. V.12- Contour de la fraction massique d'oxygène

(V_{H2}=296 m/s ,V_{air}=1.00 m/s , T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

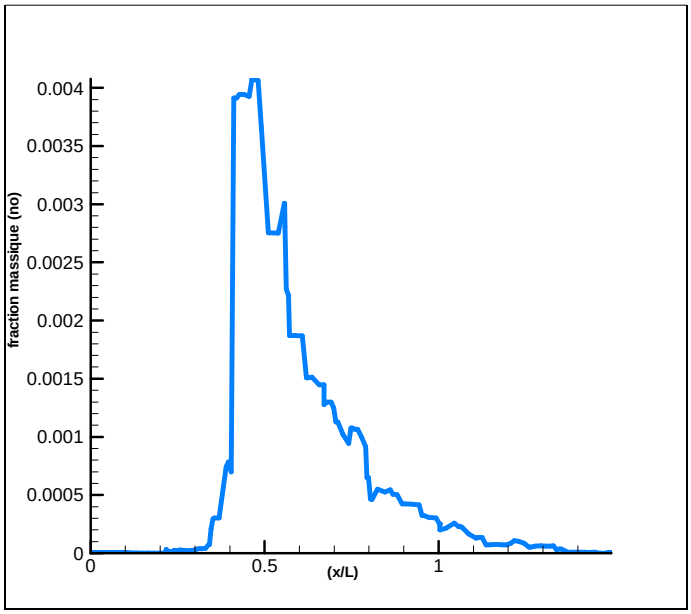


Fig. V.13 Profil axial de la fraction massique de (NO)

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

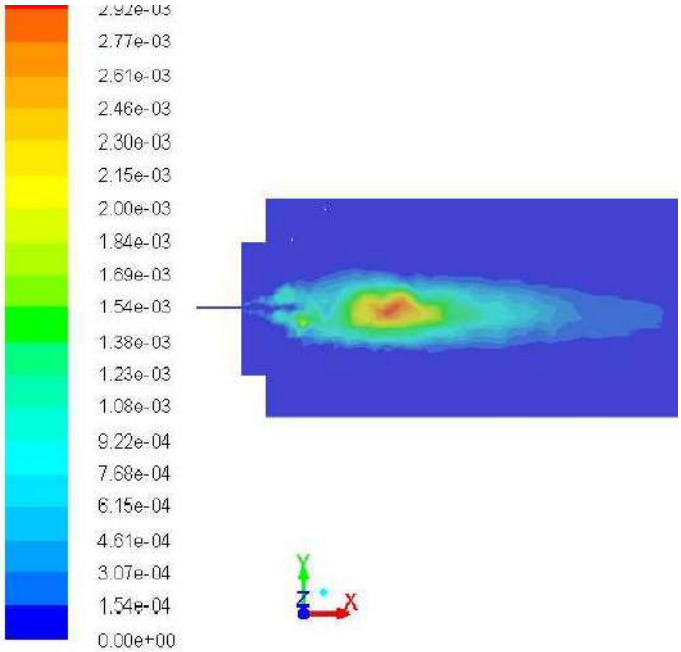


Fig. V.14- Contour de la fraction massique de (no)

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

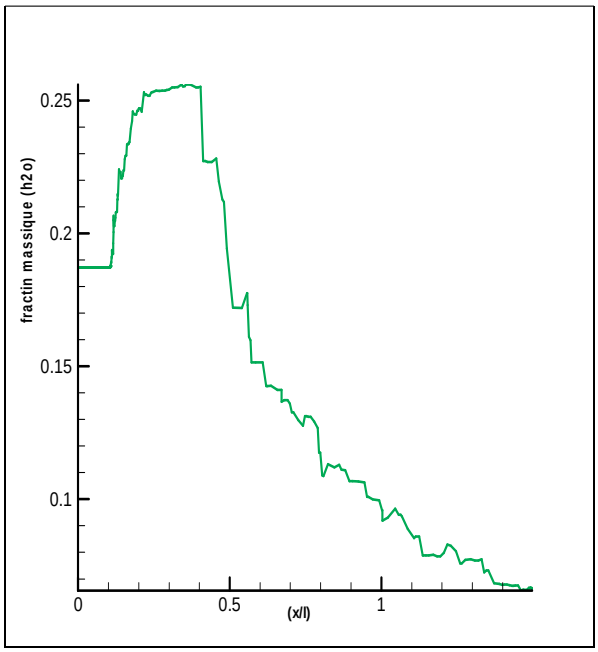


Fig. V.15 profil axial de la fraction massique de la vapeur d'eau

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s , T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

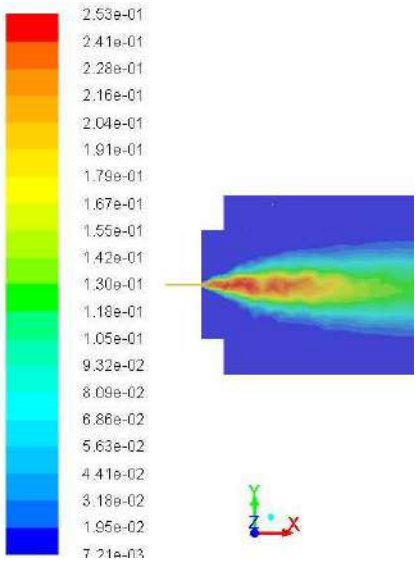


Fig. V.16- Contour de la fraction massique de la vapeur d'eau dans la flamme

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

V.5.3. Effet de la Température d'entrée du fuel (Hydrogène)

On veut mettre en évidence l'effet de la température d'entrée du combustible sur la structure de la flamme, on a fixé une vitesse d'entrée à 296m/s. La vitesse de l'air étant fixée à 1m/s.

On remarque que plus la température d'entrée est grande plus la flamme s'accroche au bec d'injection ; ce qui peut représenter un danger par la fusion du bec si le temps résiduel dépasse une certaine limite ou donne lieu à une possibilité du retour de flamme si le diamètre d'injection dépasse le distance de coincement de la flamme en question. (Voir Figures V.17 à V.18)

On constate que la longueur de la flamme diminue avec l'augmentation de la température d'entrée.

En outre, la température maximale de la flamme augmente avec l'augmentation de la température d'injection du fuel. (Figure V.20)

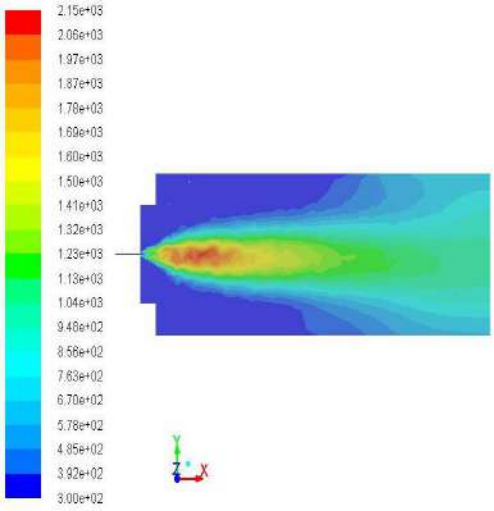


Fig. V.17 Champs de température à w=296m/s à T=300 K

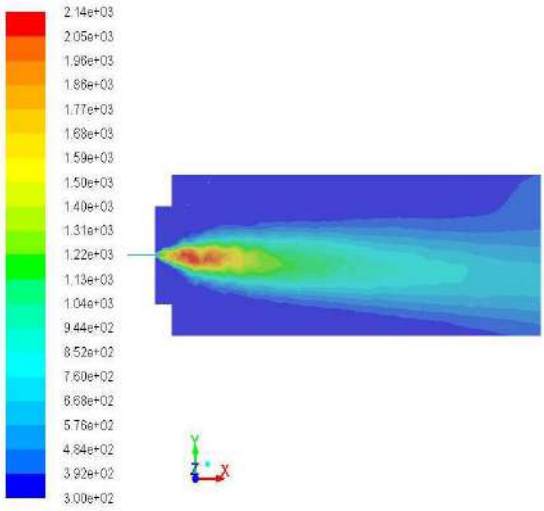


Fig. V.18 Champs de température à w=296m/s à T=600 K

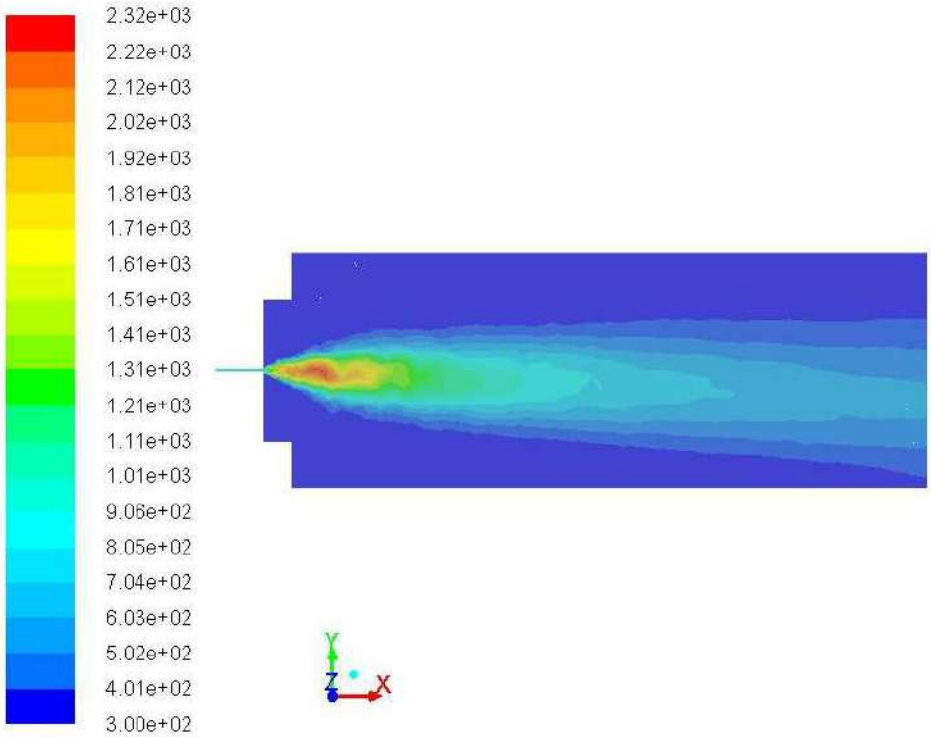


Fig. V.19 Champs de température à w=296m/s à T=900 K

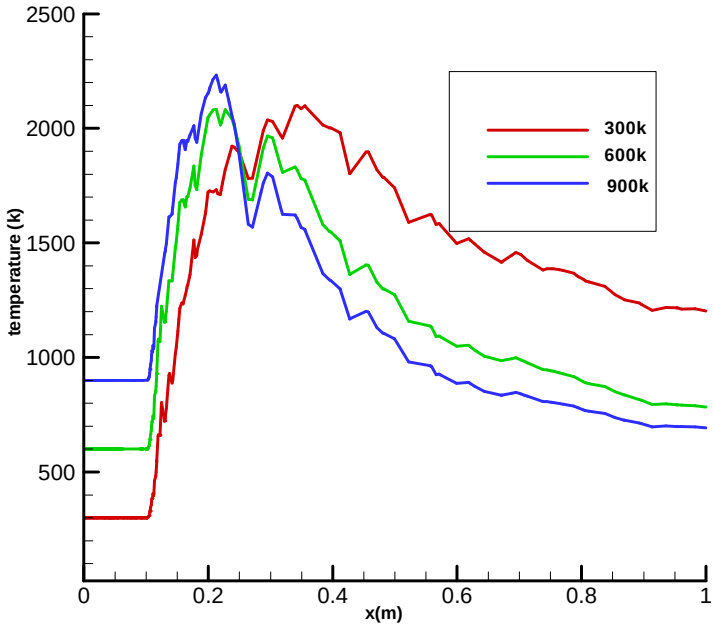


Fig. V.20 L'effet de la température d'entrée du fuel sur la température de la flamme suivant l'axe x.

(V_{H2}=296 m/s, V_{air}=1.00 m/s, T_{air}=300 k)

On peut aussi noter que la combustion de l'hydrogène ne génère que des traces de NO (ne dépassant pas un taux de 0.35%). L'augmentation de la température d'injection favorise la concentration de NO dans les zones près du bec d'injection comme montre la figure V.21.

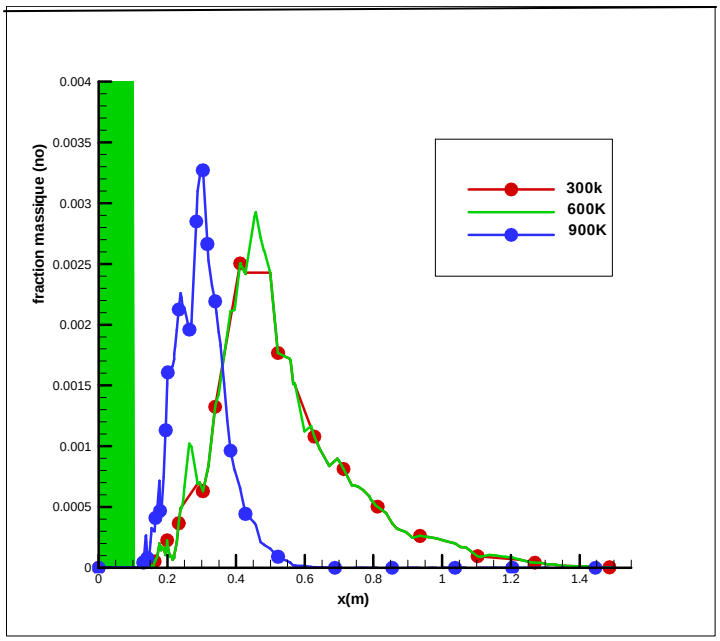


Fig. V.21- L'effet de la température d'entrée du fuel suivant l'axe x sur la fraction massique du (NO)

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

Le but de cette partie est de voir l'effet de variation de la vitesse d'injection du carburant (dans ce cas le H_2) sur la structure de la flamme d'hydrogène-Air, ainsi que son influence sur la température de combustion. On suppose que le combustible est injecté à 300°K.

On remarque que l'augmentation de la vitesse d'injection d'hydrogène (de 50 à 200 m/s) provoque un soufflage de la flamme loin du bec d'injection. Néanmoins, il est prudent de déterminer la valeur limite provoquant le blow-off de la flamme (sortie de la flamme hors de la chambre) ou détachement de la flamme. On remarque aussi une nette augmentation dans la longueur et largeur de flamme. (Figures V.22, V.23, V.24)

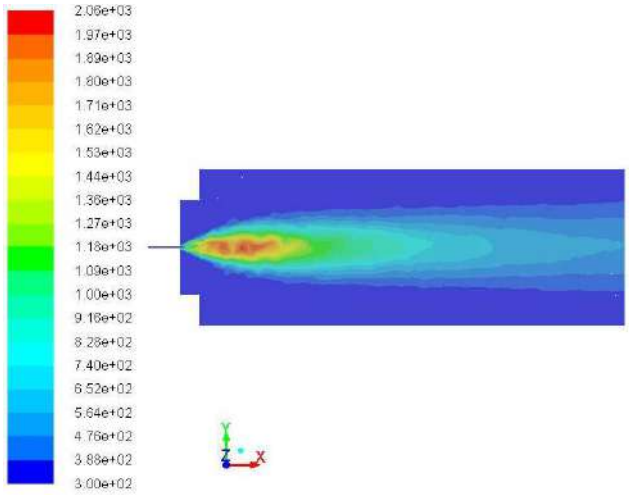


Fig. V.22.Champs de température à vitesse w=50m/s et à T=300 K

(V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

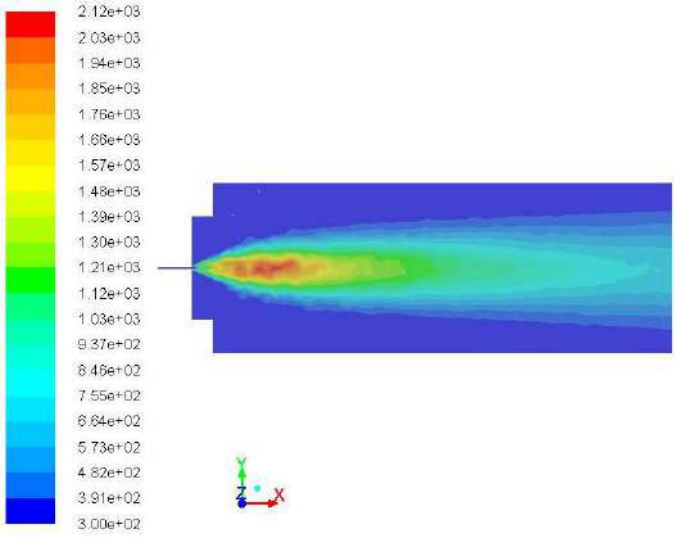


Fig. V.23.Champs de température à vitesse w=100m/s et à T=300 K

(V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

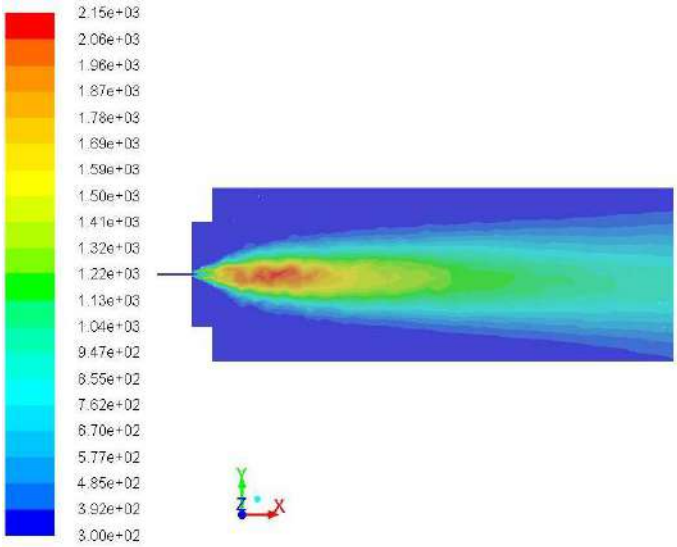


Fig. V.24.Champs de température à vitesse w=200m/s et à T=300 K

(V_{air}=1.00 m/s, T_{H2}=300 k, T_{air}=300 k)

D'autre part, la réaction de combustion de l'hydrogène est caractérisée par un dégagement de produits de gaz très propres (principalement le H_2O). Les quantités d'oxyde d'azote NO ne représentent que des traces seulement d'environ 0.3% pour un débit important en fuel. (Voir Figure V.25)

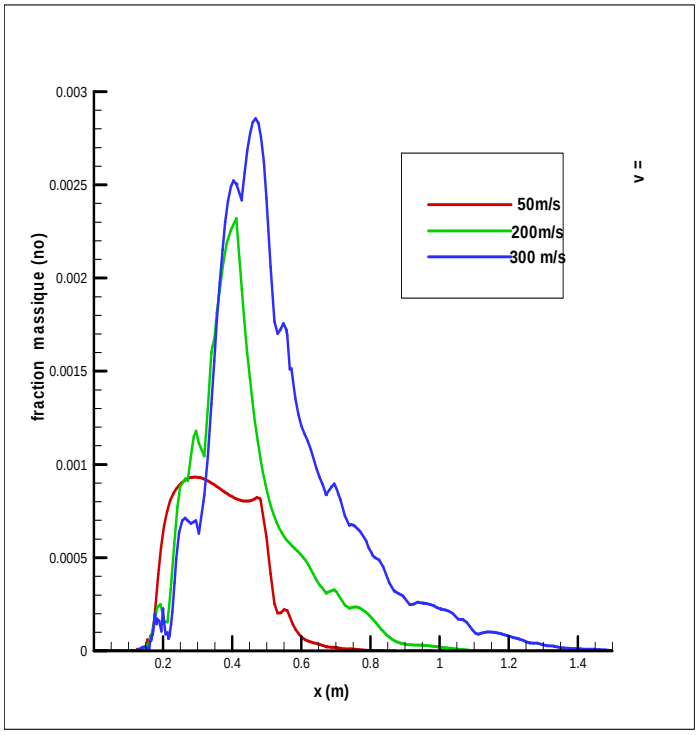


Fig. V.25 - L'effet de la vitesse d'entrée du fuel suivant l'axe x sur la fraction massique du (NO)

V.5.4. Effet de la vitesse de l'air

On met en évidence l'effet de la vitesse d'entrée de l'air sur la structure de la flamme. On a fixé une température d'entrée du fuel à 300 K et une vitesse à 296m/s.

On remarque que plus la vitesse d'entrée est élevée plus la flamme s'accroche au bec d'injection. (Voir Figures V.26 à V.28).

La longueur de la flamme diminue avec l'augmentation de la vitesse de l'air par effet de refroidissement du foyer de combustion. Cependant, il convient d'aller plus loin dans les valeurs de V_{air} si on veut déterminer le seuil d'extinction de la flamme.

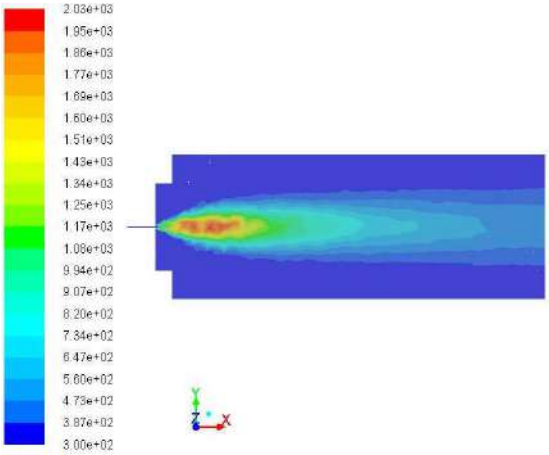


Fig. V.26 Champs de température à w=10m/s à T=300 K

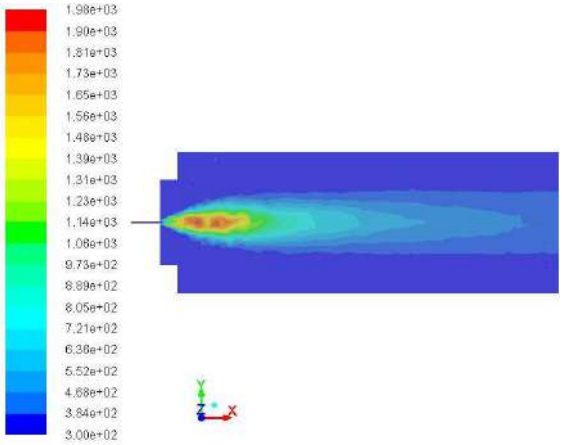


Fig. V.27 Champs de température à w=7m/s à T=300 K

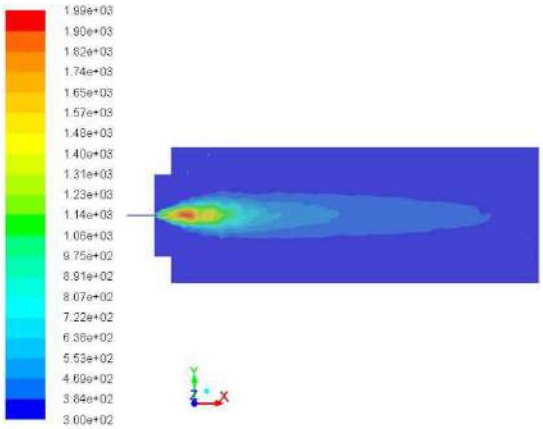


Fig. V.28 Champs de température à w=20m/s à T=300 K

Par ailleurs, la fraction massique de NO est beaucoup plus faible si on augmente la vitesse d'entrée d'air qui rend le mélange réactif plus froid ne favorisant pas la formation du NO par dissociation. Les faibles vitesses d'injection d'air augmentent la production de NO (en terme de valeur maximale et en volume d'occupation) comme est montré sur la figure (V.29).

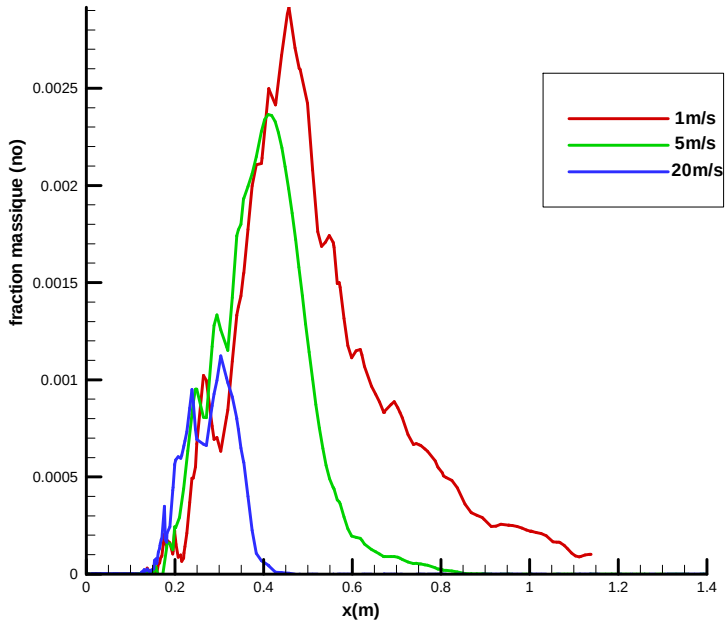


Fig. V.29 L'effet de la vitesse d'entrée d'Air suivant l'axe x sur la fraction massique du (NO)

CONCLUSION GENERALE

L'étude et la compréhension du comportement des flammes turbulentes, est devenu une exigence d'actualité afin d'améliorer leurs performances et de réduire l'émission des polluants.

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

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

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

Au cours de cette simulation, on a utilisé le modèle k-εet le modèle EDM avec un mécanisme de réaction réduit.

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

Tout d'abord, on a pu voir que la combustion du mélange Hydrogène-Air ne génère que des traces insignifiantes de NO.

D'autre part, on a remarqué que l'augmentation de la vitesse d'injection de l'hydrogène provoque un soufflage de la flamme loin du bec d'injection. Les zones à fort gradient de température sont poussées vers la sortie du tube loin de l'injecteur ce qui favorise un refroidissement de la région du bec.

Les grandes vitesses d'injection du combustible diminuent la température maximale à la zone centrale du tube tandis qu'elles favorisent une augmentation des températures près des parois. La température maximale diminue avec l'augmentation de la vitesse du combustible.

On a remarqué aussi que plus la température d'entrée est grande plus la flamme s'accroche au bec d'injection ce qui peut représenter un danger par la fusion du bec si le temps résiduel dépasse une certaine limite et donne lieu à une possibilité du retour de flamme

si le diamètre d'injection dépasse le distance de coincement de la flamme. La longueur de la flamme diminue avec l'augmentation de la température d'entrée.

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

Afin d'améliorer la qualité de la simulation, on propose de tester les autres modèles de combustion que le code Fluent propose. L'utilisation d'un mécanisme réactionnel plus détaillé s'impose en utilisant des UDF adéquates.

REFERENCES

[1] : NOUAI **SAMIRA**, « ETUDE NUMERIQUE DE LA COMBUSTION DES GAZ DANS UN FOUR CIMENTERIE », THESE MAGISTER, UNIVERSITE DE BATNA(2006).

[2] : **Guillaume Albouze**, « Simulation aux grandes échelles des écoulements réactifs non-Pré mélangés », thèse doctorat, université de Toulouse(2009).

[3] :P. **Hollmuller, J.-M. Joubert, B. Lachal et K. Yvon,** « Les piles à combustible, état du développement » : PRINGENT. Editions Technip, (2002).

[4] : **Clothilde Hoffmann,** Des flammes sur le plateau

[5] : **MOUANGUE Ruben Martin**, « Contribution à la modélisation de la combustion Turbulente non-pré mélangée avec prise en compte de l'auto-allumage », Université de YAOUNDE I (2011).

[6] : **Xavier PAUBEL**, « Analyse expérimentale des oxy-flammes turbulentes no Premelangé de gaz a faible pouvoir calorifique », THÈSE, l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen. (2007).

[7]: **Karine Truffin**, « simulation aux grandes échelles et identification acoustique des turbines à gaz régime partiellement premelangé » THÈSE, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE (2005).

[8] : Fluent. Documentation .User Guid. Fluent Inc. (2009)

[9]:**J.o.Hinze**. Turbulence, [.Mc Graw Hill. CO.New.york, 1975]

.

[10] :**H. Nouri**, **F. Ravelet,** « Tutoriel introductif à la simulation numérique des écoulements », cours, paris, France, (14 décembre 2012).