**République Algérienne Démocratique et Populaire**
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**
**Université Dr. Yahia Farès de Médéa**
**Faculté des Sciences et de la Technologie**
**Département de Génie la Matière**
**Section Génie Mécanique**



# MÉMOIRE DE FIN D'ETUDE

**En vue de l'obtention de diplôme de Master en Génie Mécanique**
**Option : Energétique et thermiques des systèmes**

## Thème

# Etude du Comportement de la Flamme d'Hydrogène dans des Canaux en utilisant une Approche CFD

Proposé et *Dirigé par :*
**Dr. ALLICHE Mounir**

Présenté par :
**BOUKHELEF Mohamed**
**ALLEG Karima**

**Promotion 2014**

# *Dédicaces*

*A mes parents et mes grands-parents.*

*A ma femme et mes enfants : Imadeddine, Bochra, Mounir,*

*A mon oncle Djillali et sa femme*

*A, mes frères et mes sœurs*

*A tous ceux qui ont contribués de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail.*

*Mohamed Boukhelef*

## Remerciements:

Nous remercions vivement notre encadreur ***Dr. ALLICHE Mounir***, qui nous a confié ce travail, pour son assistance et pour son temps qui nous a consacré pour que ce travail voir la lumière.

Un vif remerciement aussi à ***Dr. BENAROUS Abdellah*** pour ces conseils précieux en matière de CFD qu'ils nous ont raccourci le chemin pour que la simulation converge rapidement.

Nos gratitudes au **Dr. BOUKHELEF Djillali**, qui nous a donné l'étincelle pour continuer mes études.

Nos remerciements vont aussi à nos enseignants pour leurs efforts tout au long de nos études.

Nous tenons à remercier aussi les membres de jury pour avoir accepté de nous honorer par l'examen de ce travail ; en occurrence :

***Dr. BENTCHICO Mohamed***, ***Dr. KORICHI Abdelkader*** et ***Dr. BENAROUS Abdellah***.

**RESUME**

L'objectif de ce travail est d'analyser un écoulement réactif par simulation numérique. A défaut complexité de ces problèmes, la zone d'étude est réduite à 2D axisymétrique. Le code de calcul utilisé est FLUENT. Pour choisir une résolution appropriée de la maille de problème, plusieurs variantes de maillage ont été testées, ils sont tous générés par Pointwise.

Dans cette étude, le modèle de turbulence utilisé est le K-ε, le modèle de combustion est NON PRÉMÉLANGÉE, et la chambre de combustion comporte des injecteurs coaxiaux. Le combustible est l'hydrogène et l'oxydant est de l'oxygène ou de l'air. Une étude paramétrique a été menée dans laquelle nous avons examiné l'effet de conditions initiales et de l'effet oxydant de la structure de la flamme. En outre, nous avons effectué une comparaison entre deux configurations différentes de brûleurs. Dans le premier cas, le carburant est injecté dans l'injecteur axial et l'oxydant dans l'injecteur annulaire. Dans le second cas, l'oxydant dans l'injecteur axial et le carburant dans l'injecteur annulaire. Le but est devoir l'effet de la configuration du brûleur dans le processus de combustion.

**Mots Clés : CFD, Fluent, Combustion, Flamme de diffusion, Hydrogène**

**ABSTRACT**

The objective of this work is to study a reactive flows using numerical simulation. Failing complexity of these problems, the study area is reduced to 2D axisymmetric. The computer code used is FLUENT. To choose an appropriate resolution of the problem mesh, several mesh variants have been tested, they are all generated by Pointwise.
In this study, the turbulence model used is the K-ε, the combustion model is NON-PREMIXED, and the combustion chamber has coaxial injectors. The fuel is hydrogen and the oxidant is oxygen or air. A parametric study was conducted in which we examined the effect of initial conditions and the effect of oxidant on the structure of the flame. Also, we present a comparison between two different configurations of burners. The first case, the fuel is injected in the axial injector and the oxidant in the annular injector. In the second case, it was switched. The goal is to see the effect of the configuration of the burner in the combustion process.

**Keys Words: CFD, Fluent, Combustion, Non Premixed Flame, Hydrogen**

**Sommaire :**


| | | |
|---|---|---|
| **Dédicaces** | | |
| **Remerciements** | | |
| **Résumé** | | |
| **Sommaire** | | |
| **Liste des Figures** | | |
| **Nomenclature** | | |
| **Introduction générale** | | **01** |
| **Chapitre I** | **Généralités sur la combustion et les flammes** | **03** |
| I.1 | Introduction | 04 |
| I.2 | Définition de la combustion | 04 |
| I.2.1 | La combustion turbulente | 05 |
| I.3 | Modes de combustion élémentaire | 05 |
| I.3.1 | La combustion prémélangée | 05 |
| I.3.2 | La combustion non prémélangée | 06 |
| I.3.3 | La combustion partiellement prémélangée | 06 |
| I.4 | Applications industrielles de la combustion turbulente | 07 |
| I.5 | Les flammes | 07 |
| I.5.1 | Définition | 07 |
| I.5.2 | Bruleur d'une flamme | 08 |
| I.5.3 | Extinction d'une flamme | 08 |
| I.5.4 | Classification des flammes | 09 |
| I.5.5 | Théorie dur la structure de flamme | 10 |
| I.5.5.1 | Structure des flammes laminaires | 10 |
| I.5.5.1.A | Les flammes de prémélange laminaires | 10 |
| I.5.5.1.B | Structure d'une flamme de diffusion laminaire | 10 |
| I.5.5.2 | Structure des flammes turbulentes | 12 |
| I.5.5.2.A | Les flammes de prémélange turbulent | 12 |
| I.5.5.2.B | Les flammes de diffusion turbulentes | 15 |
| I.6 | Conclusion | 18 |

| | | |
|---|---|---|
| **Chapitre I I** | **Propriétés et caractéristiques de l'hydrogène** | **19** |
| II.1 | Aperçu historique sur la découverte et l'utilisation d'hydrogène | 20 |
| II.2 | Principales propriétés physico-chimique d'hydrogène | 21 |
| II.2.1 | Etat naturel | 23 |
| II.2.2 | L'hydrogène et l'énergie nucléaire | 23 |
| II.3 | La production d'hydrogène | 24 |
| II.3.1.A | Procédé industriel | 24 |
| II.3.1.B | Oxydation partielle | 25 |
| II.3.1.3 | Reformage autotherme | 26 |

| | | |
|---|---|---|
| II.3.1.4 | Électrolyse d'eau | 26 |
| II.3.1.5 | Procédés en cours de développement | 27 |
| II.3.1.5.A | Electrolyse HT | 27 |
| II.3.1.5.B | Cycles thermodynamique | 27 |
| II.3.1.5.C | Transformation thermochimique de biomasse | 27 |
| II.3.1.5.D | Photo-électrolyse | 28 |
| II.3.1.5.E | Production par des micro-organismes | 29 |
| II.3.1.5.F | Production d'hydrogène par fermation | 29 |
| II.3.1.6 | Conservation énergétique de l'hydrogène | 31 |
| II.3.1.6.A | Moteur thermique à hydrogène | 31 |
| II.3.1.6.B | Applications aéronautiques et spatiales | 32 |
| II.4 | Piles à combustible | 32 |
| II.4.1 | Domaine d'application de la pile à combustible | 33 |
| II.4.1.A | Equipements portables | 33 |
| II.4.1.B | Transport | 33 |
| II.4.1.C | Stationnaire | 33 |
| II.5 | Dangers de l'hydrogène et sécurité | 34 |
| II.5.1 | Inflammabilité | 34 |
| II.5.2 | Explosivité | 34 |
| II.5.3 | Sécurité de stockage et du transport | 35 |

| **Chapitre III** | **Formulation mathématique** | **36** |
|---|---|---|
| III.1 | Introduction | 37 |
| III.2 | Equation de la combustion gazeuse | 37 |
| III.3 | Equation de continuité | 37 |
| III.4 | Equation de conservation de quantité de mouvement | 37 |
| III.5 | Equation de conservation de l'énergie | 38 |
| III.6 | Equation de conservation des espèces chimiques | 38 |
| III.7 | Equation d'état | 39 |
| III.8.1 | Modélisation de la réaction de la combustion | 39 |
| III.8.2 | Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente | 40 |
| III.8.3 | Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie turbulente | 40 |
| III.8.4 | Modélisation de la réaction de combustion | 40 |

| **Chapitre IV** | **Présentation des outils de simulation** | **41** |
|---|---|---|
| IV.1 | Introduction | 42 |
| IV.2 | Notions d'utilisation du logiciel *Pointwise* | 43 |
| IV.2.1 | Présentation de Pointwise | 43 |
| IV.2.2 | Description du panel Général | 43 |
| IV.2.3 | Description du panel *Menu* | 45 |

| | | |
|---|---|---|
| IV.2.4 | Description du panel *Toolbar* | 46 |
| IV.2.5 | Description du panel *Panels* | 46 |
| IV.2.6 | Description du panel *Display Window* | 47 |
| IV.2.7 | Description du panel *Messages* | 47 |
| IV.2.8 | Description du panel *Status Bar* | 48 |
| IV.3 | Exemple d'utilisation de Pointwise | 48 |
| IV.3.1 | Ouverture d'une section | 49 |
| IV.3.2 | Création des segments du domaine | 49 |
| IV.3.3 | Création du maillage des segments | 51 |
| IV.3.4 | Création de surface du domaine | 53 |
| IV.3.5 | Mise en place des conditions aux limites | 54 |
| IV.3.6 | Exportation du maillage et sauvegarde de la session | 55 |
| IV.4 | Etapes de traitement d'un cas dans FLUENT | 55 |
| IV.5 | Lancement de calcul dans FLUENT | 59 |

| | | |
|---|---|---|
| **Chapitre V** | **Résultats et discussions** | **63** |
| V.1 | Introduction | 64 |
| V.2 | Configuration et choix de modèle | 65 |
| V.3 | Test de l'effet de maillage | 65 |
| V.4 | Discussion des résultats | 67 |
| V.4.1 | Etude d'influence des conditions initiales | 67 |
| V.4.1.A | Champ de température en fonction de vitesse de $H_2$ | 67 |
| V.4.1.B | Consommation de $H_2$ en fonction de vitesse de $H_2$ | 69 |
| V.4.2.A | Champ de température en fonction de température d'entrée de $O_2$ | 70 |
| V.4.2.B | Variation de taux de réaction en fonction de température de $O_2$ | 72 |
| V.4.2.C | Formation de OH en fonction de température de $O_2$ | 72 |
| V.4.2.D | Consommation de $H_2$ | 73 |
| V.5 | Champ de température en fonction de pression opératoire | 74 |
| V.6 | Comparaison des flammes de combustion d'hydrogène avec de l'air et avec $O_2$ | 76 |
| V.7 | Influence de la configuration du bruleur sur le champ de la température | 77 |
| V.8 | Influence s de la vitesse de soufflage de l'air sur le champ de la température | 79 |
| **Conclusion Générale** | | 81 |
| **Bibliographie** | | |
| **Annexes** | | |

**Liste des figures:**


| | | |
|---|---|---|
| Figure I-1 | Triangle de feu | 05 |
| Figure I-2 | Schéma d'une flamme | 08 |
| Figure I-3 | Type des flammes | 09 |
| Figure I-4 | Différents régimes de flammes | 10 |
| Figure I-5 | Structure d'un front de flamme de prémélange laminaire | 11 |
| Figure I-6 | Structure d'une flamme de diffusion laminaire | 12 |
| Figure I-7 | Régimes de combustion turbulente prémélangée classée par Boghi et Destriau | 15 |
| Figure I-8 | Régimes de flammes de diffusion turbulente prémélangée classée par Boghi et Destriau | 17 |
| Figure II-1 | Electrolyse de l'eau | 27 |
| Figure II-2 | Electrolyse microbienne | 30 |
| Figure IV-1 | Interface de Pointwise | 44 |
| Figure IV-2 | Menu général de Pointwire | 45 |
| Figure IV-3 | Le Menu Panels de Pointwise | 46 |
| Figure IV-4 | Fenêtre principale | 47 |
| Figure IV-5 | Fenêtre de message | 47 |
| Figure IV-6 | Bar d'état pointwise | 48 |
| Figure IV-7 | Figure d'un exemple pointwise | 48 |
| Figure IV-8 | Description de la figure | 49 |
| Figure IV-9 | Géométrie du domaine | 51 |
| Figure IV-10 | Maillage du domaine | 54 |
| Figure IV-11 | Fenêtre de Fluent Luncher | 55 |
| Figure IV-12 | Fenêtre principale | 56 |
| Figure IV-13 | Menu de lancement d'un cas | 56 |
| Figure IV-14 | Redéfinition de l'échelle de la géométrie | 57 |
| Figure IV-15 | Menu de choix de turbulence | 57 |
| Figure IV-16 | Menu de paramétrage de modèle de combustion | 58 |
| Figure IV-17 | Menu d'introduction des conditions aux limites | 59 |
| Figure IV-18 | Menu de choix de méthode de résolution | 59 |
| Figure IV-19 | Menu de contrôle de solution | 60 |
| Figure IV-20 | Menu d'initialisation | 61 |
| Figure IV-21 | Menu de calcul | 62 |
| Figure IV-22 | Fenêtre de fin d'exécution | 62 |
| Figure V-1 | Schéma de chambre de combustion | 64 |
| Figure V-2 | Variation de Y+ en fonction de maillage | 66 |
| Figure V-3 | Variation de T en fonction de maillage | 66 |
| Figure V-4 | Variation de T sur l'axe central | 67 |
| Figure V-5 | Champ de température | 69 |
| Figure V-6 | Variation de consommation de H2 sur l'axe central | 69 |
| Figure V-7 | Effets de température d'entrée de O2 | 70 |

| | | |
|---|---|---|
| Figure V-8 | Champ de température influencé par la température d'entrée O2 | 71 |
| Figure V-9 | Taux de réaction sur l'axe centrale | 72 |
| Figure V-10 | Evolution de formation de OH | 73 |
| Figure V-11 | Evolution de consommation de H2 | 73 |
| Figure V-12 | Champ de température en fonction de pression | 75 |
| Figure V-13 | Variation de température en fonction de pression | 75 |
| Figure V-14 | Champ de température en fonction de comburant | 76 |
| Figure V-15 | Variation des champs de température en fonction de comburant | 77 |
| Figure V-16 | Configuration de bruleur l'air à l'axe | 77 |
| Figure V-17 | Variation de H2 et O2 | 78 |
| Figure V-18 | Champ de température pour la configuration l'air à l'axe | 79 |

## NOMENCLATURE

| Symbole | Unité | Définition |
|---|---|---|
| $\gamma$ | [--] | viscosité cinématique du milieu réactif |
| C | [--] | Variable d'avancement de la réaction |
| $c_p$ | [J/ (kg K)] | Chaleur spécifique a pression constante du mélange |
| $c_{pk}$ | [J/(kgK)] | Chaleur pression constante de l'espèce |
| $c_{pk}$ | [J/(kg K)] | Chaleur pression constante de l'espèce |
| $c_\mu$, $c_{\epsilon 1}$, $c_{\epsilon 2}$, $\sigma_k$ et $\sigma_\epsilon$ | [--] | Constantes du modèle k-ε |
| $D_K$ | [$m^2$/s] | Coefficient de diffusion de l'espèce k dans le mélange |
| $D_a$ | [--] | Nombre de Damkholer |
| $D_{inj}$ | [m] | Diamètre de l'injecteur (bruleur) |
| $f_{kf}$ | [m/ $s^2$] | Force spécifique de volume agissante sur l'espèce k dans |
| $h_{F,K}$ | [J/kg] | Enthalpie chimique spécifique de l'espèce k |
| $h_K$ | [J/kg] | Enthalpie spécifique de l'espèce k |
| $h_{S,K}$ | [J/kg] | Enthalpie sensible de l'espèce k |
| K | [$m^2/S^2$] | Energie de turbulence |
| Ka | [--] | Nombre de Karlovitz |
| L | [m] | Echelle intégrale de longueur |
| lδ | [m] | Epaisseur de la couche interne de la flamme |
| Lf | [m] | Epaisseur de la flamme laminaire |
| P | [N/$m^2$] | Pression |
| Q | [J/ ($m^3$s)] | Source de chaleur |
| R | [J/(Kg K)] | Constante universelle des gaz parfaits |
| $R_{et}$ | [--] | 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] | Vitesse de diffusion de l’espèce k 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 |

# Introduction Générale

## INTRODUCTION GENERALE

La combustion occupe de nos jours une place privilégiée pour la production d'énergie; dans les transports aériens, spatiaux, routiers ; dans la production d'électricité. Les combustibles fossiles dont les ressources sont limitées, produisent la majorité de cette énergie. Cependant, la combustion de ces hydrocarbures entraîne la production d'espèces polluantes pour l'environnement, à l'échelle locale mais aussi planétaire (destruction de la couche d'ozone par les oxydes d'azote NOx et réchauffement global par le dioxyde de carbone CO2).

De ce fait, les industriels du secteur de l'énergie cherchent à perfectionner les procédés de combustion dans le but premier de réduire leur consommation en combustible et en second plan de limiter leur production d'espèces polluantes. Ces objectifs, qui représentent des enjeux majeurs pour l'énergétique, nécessitent des recherches sur les aspects fondamentaux et technologiques.

La combustion est l'un des procédés les plus importants dans la transformation de l'énergie, elle permet de convertir l'énergie chimique contenue dans les combustibles en chaleur.

D'autre part, l'utilisation des codes numérique dans le calcul de la dynamique des fluides (CFD : ***C****omputational* ***F****luid* ***D****ynamics*) pour la simulation des phénomènes complexes comme la combustion est devenue une pratique courante au sein des communautés scientifiques. Elle permet aux développeurs d'améliorer la conception de nouveaux dispositif industriel et d'optimiser les conditions de fonctionnement de systèmes de combustion afin d'améliorer le rendement et/ou de réduire les émissions de polluant ; c'est donc pour répondre à cette demande que les outils sont développés pour prédire et étudier le comportement des systèmes industriels complexes.

Dans le passé, le concepteur d'équipements de combustion procédait par essai et erreur aussi, il se basait sur des règles empiriques mais ces bonnes vielles méthodes ne suffisent plus à améliorer le produit, c'est la raison pour laquelle a apparente la nécessité d'avoir un outil de prédiction quantitatif se fait de plus en plus sentir afin d'être complet et efficace. L'outil doit incorporer des modèles de combustion tel que prémélangé ou non-prémélangé, combustible monophasique et/ou diphasique. En plus, afin d'obtenir une bonne prédiction pour les longueurs des flammes, le transfert de chaleur mais aussi de prédire

l'émission de divers polluant et imbrulés, cet outil doit être utilisé dans une machine puissante et assez rapide.

Puisque les phénomènes de combustion sont étroitement liés aux caractéristique turbulente de l'écoulement, il faudra également améliorer le couplage turbulence-réaction au moyen de fonction de densité de probabilité (pdf : ***p**robabilitic **d**ensity **f**unction*). La méthode des volumes finis, utilisée dans notre cas, constituera la plateforme sur laquelle seront implémentés les modèles des écoulements réactifs.

L'objectif du présent travail est une simulation numérique d'une flamme de diffusion pour la combustion d'hydrogène avec de l'air ou l'oxygène pure, en utilisant une approche CFD qui est très répandue chez la communauté scientifique comme chez les industriel. On a utilisé le code FLUENT.

Dans le contexte d'étude de la combustion d'hydrogène, le paramétrage du code du calcul et le choix du maillage constitue un volet important pour avoir des résultats comparables aux expériences. Pour cela, on a adopté les hypothèses suivantes :

* modèle de combustion non prémélangé.
* modèle de simulation de la turbulence k-$\epsilon$.
*domaine d'étude bidimensionnel axisymétrique.
*modèle de maillage : structuré, non structurée et hybride.

Pour ce faire, on a adopté le plan de ce travail suivant :

Nous discuterons d'abord les propriétés et procédures de combustion et les flammes (chapitre 1), la présentation des propriétés et caractéristiques de l'hydrogène (combustible) (chapitre 2). Puis nous déduirons les équations du mouvement décrivant le processus de combustion et nous décrirons les modèles de combustion (chapitre 3). Une Présentation générale du code ANSYS- FLUENT est ensuite faite (chapitre 4). Finalement, nous décrirons et discuterons les principaux résultats des simulations dans le chapitre 5. En fin, on va donner quelques remarques de conclusion.

# CHAPITRE I

## *Généralités sur la combustion et les flammes*

## I.1 Introduction

La combustion est un phénomène important puisqu'elle est utilisée comme source d'énergie principale. Le problème majeur de ce processus est la formation de polluants (CO, composés organiques volatils (COV), oxydes d'azote (NOx), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), suie...). En effet, dans l'activité humaine, ces composés sont ceux qui prédominent dans l'environnement par les rejets de nombreux systèmes de combustion : moteurs automobiles, sidérurgie, entreprises chimiques, incendies, incinérateurs de déchets urbains...

## I.2 Définition de la combustion :

La combustion est une réaction chimique globalement et généralement fortement exothermique, autonome, susceptible de s'accélérer brutalement et d'être accompagnée d'émission de rayonnements. Elle peut être lente ou vive, turbulente, spontanée, catalytique... Elle nécessite un comburant (généralement l'air ou l'oxygène) et un combustible (tels que les composés hydrocarbonés et oxygénés).

D'une manière générale, la combustion complète d'un composé hydrocarboné produit du dioxyde de carbone ($CO_2$) et de l'eau :

$$C_mH_n+(m+n/4)\rightarrow mCO_2+n/2H_2O \qquad \text{I.1}$$

Cependant, cette réaction ne représente qu'un bilan global de la combustion. Des espèces intermédiaires de réaction sont formées à partir du combustible initial et contribuent à la production de ces produits ($CO_2$ et $H_2O$) ainsi qu'à celle de composés plus lourds lors d'une combustion incomplète.

Dans le monde moderne, la combustion est surtout utilisée pour produire de l'énergie (chaleur, électricité) mais aussi pour obtenir des détonations (explosions utilisées pour la sécurité industrielle, la propulsion hypersonique, la pyrotechnie)[1]




*Figure(I.1): Triangle du feu [2]*

### I.2 .1 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.[3]

L'interaction entre un processus chimique de combustion et la "turbulence" joue un rôle très important dans de nombreux systèmes de combustion, pour la propulsion ou la production d'énergie, comme par exemple les chambres de combustion des turboréacteurs, des chaudières ou des turbines à gaz. L'étude de ces écoulements turbulents de gaz réactifs a conduit à l'introduction de différentes grandeurs caractéristiques de ces phénomènes physiques. Ces quantités sont issues de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et de la chimie[4].

### I.3 Modes de combustion élémentaires

### I.3.1 La combustion prémélangée

C'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 contrepartie, les flammes obtenues sont souvent difficiles à maîtriser, nécessitant l'utilisation de dispositifs complexes d'accrochage de flamme. De même, la question du stockage d'un mélange air/carburant dans la

gamme d'inflammabilité est prépondérante et n'est pas envisageable dans un contexte industriel.

### I.3.2 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.3.3 La combustion partiellement prémélangée

C'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[5].

| Mode de combustion | avantages | inconvénients |
|---|---|---|
| prémélangé | Peu polluant (en régime pauvre | Instabilité de combustion, stockage du mélange |
| Non prémélangé | Stabilité de la flamme, stockage du carburant en dehors des limites d'inflammabilité | Production d'oxydes d'azote |
| Partiellement prémélangé | Peu polluant (en régime pauvre), stockage du carburant en dehors des limites d'inflammabilité | Instabilité de combustion, hétérogénies de mélange |

*Table I.1 : Avantages et inconvénients principaux des trois modes de combustions*

## I.4. Applications industrielles de la combustion turbulente

- Dans le cas des turbines aéronautiques, le carburant est, dans la plupart du temps, injecté sous forme liquide (spray). Ceci mène inévitablement à un mode de combustion de type prémélange partiel.
- Dans le cas des turbines de production d'énergie, la combustion est souvent prémélangée. A ce titre, des faibles hétérogénéités de mélange peuvent influencer fortement la performance des turbines, mettant en lumière l'importance d'un bon prémélange.
- Dans le cas des moteurs à combustion interne de type « Diesel », le combustible est souvent injecté sous forme de spray, menant à des régimes de combustion de type prémélange partiel ou combustion stratifiée. A l'inverse, dans le cas des moteurs de type HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), le mélange air-carburant est mélangé de la manière la plus homogène possible (comme dans les moteurs à essence) et est comprimé assez fortement pour atteindre le point d'auto-allumage. De simples hétérogénéités de mélange influencent alors très fortement les performances du moteur.

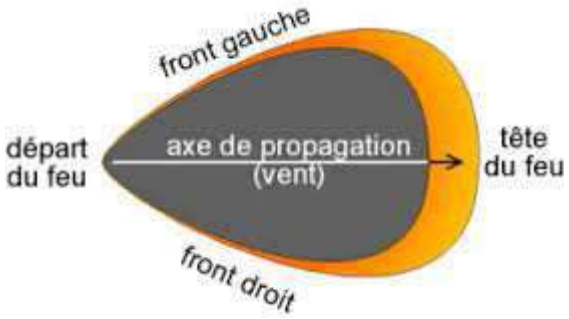
## I.5 Les Flammes :

### I.5 .1 Définition :

Physiquement, une flamme est un gaz en feu ; c'est-à-dire 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 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 ne s'entretiendra pas d'elle-même tant que carburant et comburant seront présents en quantité suffisante.




*Figure(I.2) : Schéma d'Une flamme*

### I.5.2 Bruleur d'une flamme :

Si des molécules d'oxygène$O_2$, stables à la température ordinaire, se trouvent dans le voisinage de molécules d'hydrogène constituant un mélange, à la température ordinaire, il ne se passe rien ; le mélange est stable, ou plutôt métastable. En effet, il peut facilement évoluer s'il y a quelque part un apport d'énergie suffisant pour initier la réaction. Dans ce cas, les atomes se redistribuent dans un nouvel état plus stable, constitué d'eau à haute température et de radicaux (O, OH, H) qui pourront se recombiner à plus basse température. La molécule d'eau $H_20$ est de plus basse énergie [2].

### I.5.3 Extinction d'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. L'énergie produite est émise sous forme de rayonnements, donc d'ondes électromagnétiques, et si la plupart de ces émissions se font dans l'infrarouge, certaines se font dans le spectre visible. C'est le principe de l'incandescence. La couleur de la flamme dépend de la température de celle-ci, ainsi que de sa composition [2].

### I.5.4 Classification des flammes

Selon la procédure utilisée pour introduire les réactifs dans la zone de flamme deux situations généralement rencontrées sont identifiées selon la procédure utilisée pour introduire les réactifs dans la zone de flamme :

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

b) **Flammes non-prémélangées** 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.

Elles sont schématisées sur la figure (I.3).

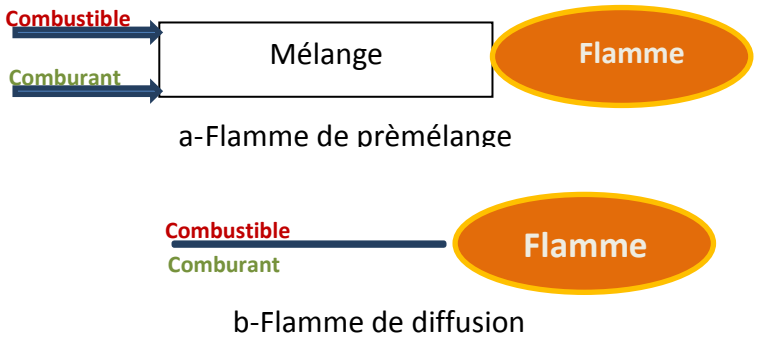



*Figure (I.3) : Types de flammes*

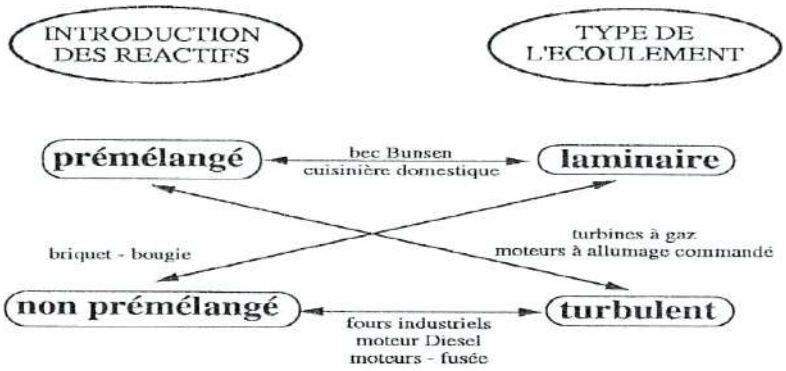



*Figure (I.4): Différents régimes de flammes*

### I.5.5 Théories sur la structure des flammes

Les flammes sont des réactions chimiques dans un écoulement en milieu gazeux, solide ou liquide ; on ne peut pas dissocier ce phénomène du transport des espèces.

En effet, la réaction globale, l'équation (I.1) montre que pour qu'il y ait une réaction, il faut d'abord que les espèces réactives (combustible et oxydant) soient en contact. La flamme (zone de réaction) est donc le résultat du transport des espèces, du transport de la chaleur et de la réaction chimique.

#### 1.5.5.1 Structure des flammes laminaires

Dans un écoulement laminaire, compte tenu des différents mécanismes qui permettent l'existence d'un écoulement réactif, il est usuel de distinguer deux types différents de flammes laminaires :

- les flammes laminaires de prémélange où le combustible et l'oxydant sont mélangés avant l'inflammation;
- les flammes laminaires de diffusion où le combustible et l'oxydant sont introduits séparément avant l'inflammation [4].

#### I.5.5.1.A Les flammes de prémélange laminaires.

La structure d'une flamme de prémélange laminaire est présentée sur la figure (I.5), l'épaisseur de la flamme$\delta_L$, se décompose en deux couches de faibles épaisseurs. D'abord, l'épaisseur de préchauffage, $\delta_p$, où dominent les phénomènes de diffusion, de convection de masse et de chaleur.

Les réactions chimiques dépendent essentiellement du combustible utilisé. Pour des molécules stables ($CH_4$ par exemple), on observe ni décomposition ni pyrolyse ce qui n'est pas le cas pour les autres hydrocarbures saturés plus lourds. Vient ensuite l'épaisseur de réaction$\delta_R$, dans laquelle ont lieu les réactions chimiques globalement exothermiques.

Dans l'épaisseur de la flamme $\delta_L$ ($\delta_L = \delta_p + \delta_R$), la température passe de la température des gaz frais $T_U$ à la température de gaz brûlés $\delta_R$), $T_B$. Le rapport de ces deux températures est généralement compris entre 5 et 7. [3]

#### I.5.5.1.B 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 de diffusion 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.

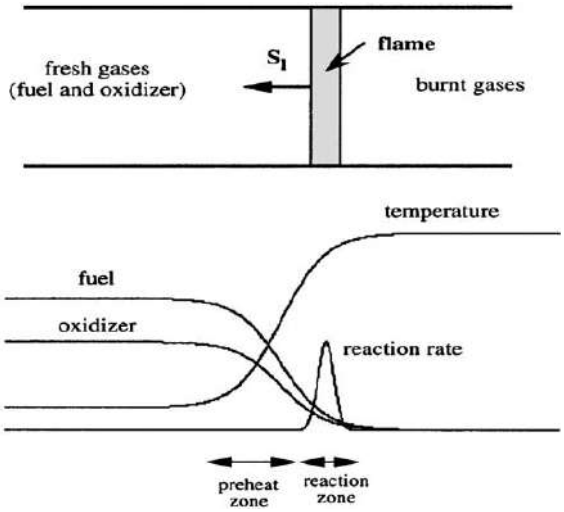



*Figure (I.5) : Structure d'un front de flamme de prémélange laminaire.*

- 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.
- 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.

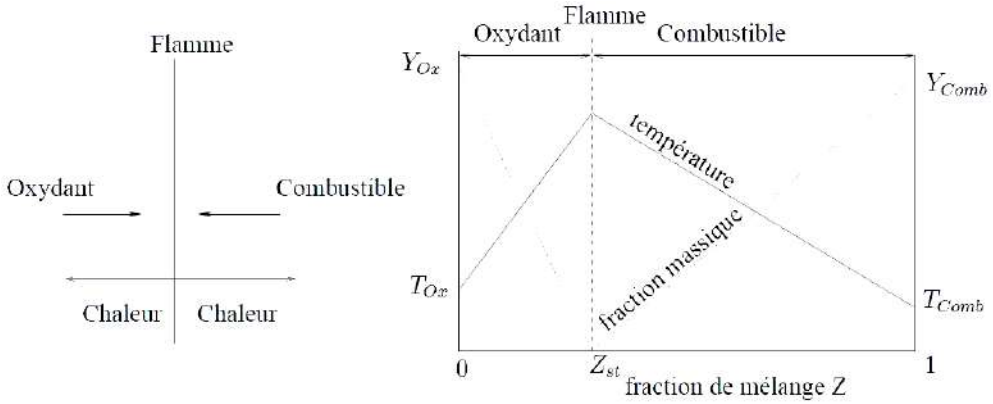



*Figure (I.6) : Structure d'une flamme de diffusion laminaire. [2]*

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).

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) [2], 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.

### 1.5.5.2- Structure des flammes turbulentes

#### I.5.5.2.A Les flammes de prémélange turbulentes

L'ajout de la turbulence modifie donc la structure du front de flamme. Cependant, cette modification dépend des propriétés de la flamme et de la turbulence. Les tentatives de classement ont donc été effectuées en fonction des temps caractéristiques de la chimie et de la turbulence. Ceux-ci visent à aider au choix d'un modèle de combustion turbulente selon les régimes considérés. Dans le cas laminaire, nous avons vu que la flamme était caractérisée par son épaisseur de flamme $\delta_L$ et sa vitesse de propagation laminaire $S_L$.

De son côté, la turbulence peut être caractérisée en fonction de ses échelles de tailles intermédiaires : les échelles intégrales, et, les tourbillons de plus petites tailles dans lesquels l'énergie turbulente est dissipée : l'échelle de Kolmogorov. Deux nombres sans dimension sont alors utilisés : les nombres de Karlovitz et le nombre de Damköhler. Le nombre de Damköhler (Da) compare le temps caractéristique de la chimie avec celui des grandes échelles de la turbulence.

$$Da=\tau_t/\tau_c=\frac{l_t/u'}{\delta_L/s_L} \qquad \text{I.11}$$

$\tau_c$ est le temps caractéristique de la chimie, et $\tau_t$ le temps caractéristique de la turbulence.

Dans une approche simplifiée de la chimie (une seule étape), le temps caractéristique associé à la chimie $\tau_t$ est celui nécessaire à la flamme pour se propager de son épaisseur caractéristique $\delta_L$ .

Le nombre de Karlovitz (Ka) compare le temps caractéristique de la chimie avec celui des petites échelles de la turbulence :

$$Ka = \tau_c/\tau_k = \frac{\delta_L}{l_k}\frac{u_k}{s_L} \approx \left(\frac{u'}{s_L}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{l_t}{\delta_L}\right)^{-\frac{1}{2}} = \left(\frac{\delta_L}{l_k}\right)^2 \qquad \text{I.2}$$

Les applications industrielles se font généralement à haut nombre de Damköhler. Ceci signifie un front de flamme est fin comparé à l'échelle et aux temps caractéristiques de la chimie intervenant dans la combustion (sauf celle des polluants, de l'oxydation du CO par exemple).

Lorsque le nombre de Damköhler est largement supérieur à 1, le front de flamme est fin, comparé aux dimensions caractéristiques des tourbillons. La structure interne de la flamme n'est pas affectée par les fluctuations. Le front de

flamme est juste déformé et plissé par la turbulence. Nous sommes en présence du régime de flammelette.

Ce régime prédomine tant que l'échelle de temps de Kolmogorov est plus grande que celle de la chimie. La zone limite est définie par le critère de Klimov-Williams : Ka = 1.

Pour des nombres de Karlovitz supérieurs à l'unité, les petites structures turbulentes sont capables d'affecter la flamme, mais elles ne sont pas forcément en mesure de perturber la zone de réaction proprement dite (zone d'épaisseur $\delta_R = 0.1\ \delta_L$).

– **Si Da < 1 et Ka > 1** : nous sommes en présence du régime parfaitement mélangé. Toutes les structures de la turbulence interagissent avec le front de flamme et perturbent la zone de réaction interne. Il s'agit du réacteur homogène. Ce régime n'est quasiment jamais rencontré dans les configurations industrielles.

– **Si Da >1 et Ka > 1**, les fluctuations de vitesse sont plus lentes que les réactions chimiques. Le taux de réaction est principalement contrôlé par le mélange turbulent. Les tourbillons de Kolmogorov peuvent pénétrer à l'intérieur du front de flamme et y causer des extinctions locales.

Le régime de flammelettes correspondant à Ka < 1 peut être divisé en deux sous régions :

– **u'/$S_L$ < 1** : **Régime de flamme plissée**. Les fluctuations de vitesses turbulentes ne sont pas suffisantes pour faire interagir deux fronts de flamme entre eux. La vitesse de propagation de flamme laminaire prédomine.

– **u'/$S_L$> 1**. Les fluctuations de vitesses turbulentes u' sont suffisamment importantes pour faire interagir les fronts de flamme. Les tourbillons de Kolmogorov ne perturbent cependant pas la structure de flamme.

Cette manière d'appréhender la combustion a été améliorée par une description plus fine de la structure de la flamme en la décomposant en deux parties d'épaisseur $\delta_R$ (zone de réaction) et $\delta_p$ (zone de préchauffage). Si la taille d'une structure turbulente est plus grande que $\delta_R$ mais inférieure à $\delta_p$, celui-ci perturbera la zone de préchauffage mais non la zone de réaction. Lorsque la taille des tourbillons de Kolmogorov est de l'ordre de grandeur de celle de l'épaisseur de réaction, on obtient une transition dans le régime de combustion. Ceci correspond à Ka =100. La structure même de la zone de réaction est modifiée.

On peut alors proposer la classification suivante [7]:

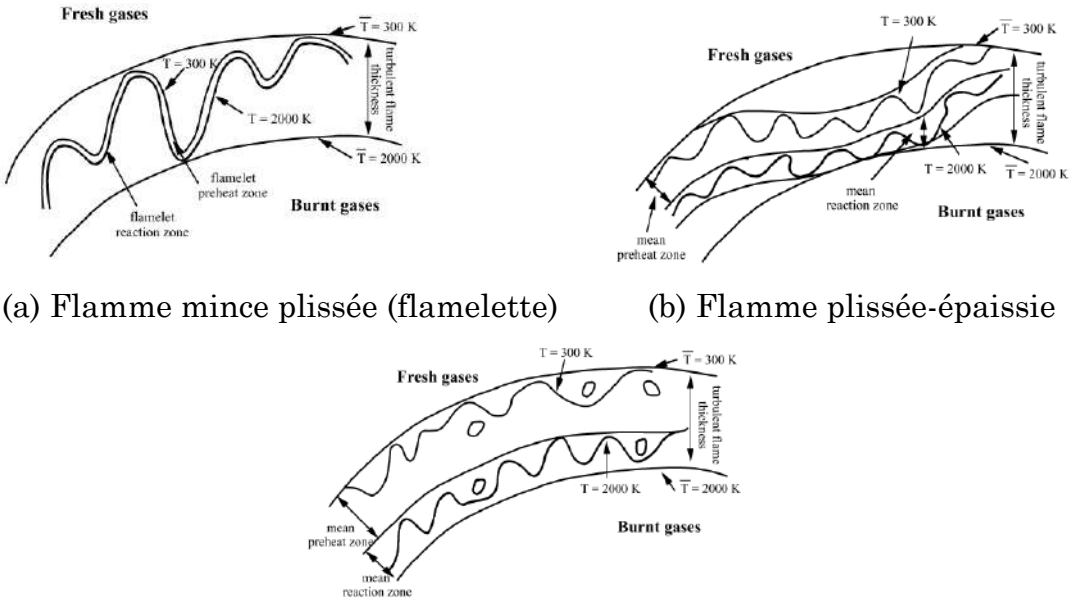
**A)** **Ka < 1 : Le régime de "flammelette".** Celui-ci peut être divisé en deux sous régimes :

–u'/$S_L$ < 1. C'est le régime de "**flamme mince**" ou de "flamme mince plissée" (Wrinkled flamelet regime).

– u'/$S_L$ > 1. C'est le régime de "**flamme plissée avec poches**" (Corrugated flames).

**B)** **1 < Ka < 100 : Le régime de flamme "plissée-épaissie"** (thickened flame regime).

**C)** **Ka > 100 : Le régime de "flamme épaissie"** ou de réacteur homogène (Well stired reactor).




(a) Flamme mince plissée (flamelette) (b) Flamme plissée-épaissie

(c) Flamme épaissie

*Figure (I.7) : Régimes de combustion turbulente prémélangée classées par Borghi et Destrieau [ ]*

### I.5.5.2.B Les flammes de diffusion turbulentes

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.

Dés ses premiers travaux, en 1940, Damkohler avait la question de la structures interne de la flamme turbulente, pour savoir si la zone de flamme n'était rien d'autre qu'une flamme laminaire, d'épaisseur classiquement très fine, mais continuellement plissée et rapidement déplacé par la turbulence de sorte qu'elle apparaissait plissée à l'œil nu. Il a été admis généralement que cette structure en « flamme plissée » était possible pour certaine condition.

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 $\tau_c$ 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 $k^{\frac{1}{2}}$ des gros tourbillons porteurs d'énergie puis $\lambda_\tau$ et $\tau_\tau$ respectivement la longueur et le temps caractéristiques de ces gros tourbillons :

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

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 $\tau_k$ et $\eta$ qui représentent respectivement les échelles de temps et de longueurs des petites structures :

$$\tau_k = \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2} \quad \text{et} \quad \eta = \frac{\nu^3}{\epsilon} \qquad \text{I.4}$$

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

$$Da = \frac{\tau_t}{\tau_c} \quad \text{et} \quad R_{et} = K^{1/3}\frac{l_t}{\nu} \qquad \text{I.5}$$

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 :

$$X = \frac{l_t}{e_l} \quad \text{et} \quad Y = \frac{K^{1/3}}{U_l} \qquad \text{I.6}$$

puis :

$$X' = R_{et} \quad \text{et} \quad Y' = Da \qquad \text{I.7}$$

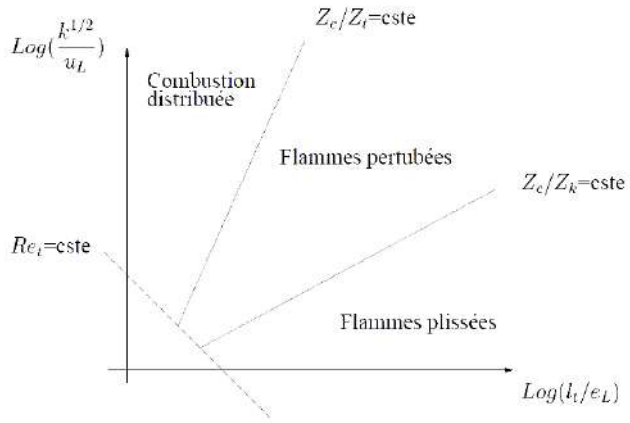



*Figure (I.8) : Régimes des flammes de diffusion turbulentes (diagramme de Barrère-Borghi) [ ]*

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

$$R_{et} = \alpha(\frac{\tau_t}{\tau_k})^2 = \text{constante} \qquad \text{I.8}$$

$$(X^2)= (\frac{\tau_t}{e_l})^2= \alpha R_{et}\frac{\tau_t}{\tau_k} \qquad (Y^2)= (\frac{k^{1/2}}{e_l})^2 = \alpha R_{et}\frac{\tau_c}{\tau_t} \qquad \text{I.9}$$

Or XY=constant ; d'où $Y=\frac{\beta}{X'}$ $\alpha$ et ß 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 $\tau_c$ 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 $\tau_x = \tau_k$ à un ordre près.

Le temps de la chimie $\tau_x$ sert de "jauge" dans le balayage du repère (X, Y). On rencontre en premier le plus petit temps de la turbulence $\tau_k$ ; 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". [2]

Puis $\tau_x$ 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:

$$\frac{\tau_c}{\tau_t}=\text{constant} \qquad \text{I.10}$$

$$(X^2)=\frac{l_t^2}{e_l}=\frac{\tau_c}{\tau_t} \qquad (Y^2)=\left(\frac{k^{1/2}}{u_l}\right)^2=\alpha R_{et}\frac{\tau_t}{\tau_c} \qquad \text{I.11}$$

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

**I.6. Conclusion**

Dans le présent travail, on s'intéresse au cas d'une flamme turbulente de diffusion. C'est une flamme plus sensible à l'étirement qu'une flamme de prémélange. Elle est plus susceptible de subir des extinctions locales.

# CHAPITRE II

## *Propriétés et caractéristiques de l'Hydrogène*

## II. 1 Aperçu historique sur la découverte et les utilisations de l'hydrogène :

La découverte de l'hydrogène remonte au XVI e siècle lorsque le philosophe et médecin suisse Paracelse se demande si « l'air » que dégage la réaction du vitriol sur le fer est bien identique à l'air que nous respirons. Au siècle suivant, Bayle isole ce gaz et au XVIII e siècle, Cavendish, reprenant les travaux de Paracelse avec différents métaux, recueille d'importantes quantités du gaz en question dans des vessies de porc et montre qu'il est de « l'air inflammable » qui brûle dans l'atmosphère en produisant de l'eau. C'est alors que Lavoisier, assisté de Laplace et de Meunier, donne une interprétation des résultats précédents grâce à la synthèse de l'eau effectuée en 1783. Il écrit dès le lendemain à l'Académie des sciences la description de l'expérience : « l'eau est composée d'air inflammable et d'air vital ». Cet « air inflammable » qui, avec l'oxygène, « l'airvital », compose l'eau, est l'hydrogène, nom signifiant : « qui produit de l'eau ». L'année suivante, les mêmes Lavoisier et Meunier présentent à l'Académie des sciences un procédé quasi industriel de production d'hydrogène en grande quantité par action de l'eau sur le « fer au rouge ».

Cavendish avait en plus mis en évidence la faible densité de l'hydrogène, résultat que retrouve le français Charles qui a l'idée d'utiliser ce gaz très léger pour les aérostats des frères de Montgolfier, expérience qu'il réalise en 1783.

En 1804, Gay Lussac et Von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume d'oxygène pour deux volumes d'hydrogène, et c'est en 1839 que Grove découvre le principe de Lapile à combustible. Puis, à la fin du XIX e siècle, Pictet et Cailletet réalisent en même temps la liquéfaction de l'oxygène. À la suite de ces travaux, Wroblewski réussit la première liquéfaction de l'hydrogène et Dewar parvient, en 1898, à récupérer ce liquide en un bain stable. Enfin, les Allemands Haber et Bosch inventent le procédé de synthèse de l'ammoniac, qui est ensuite perfectionné par Georges Claude, fondateur de la société Air Liquide. L'hydrogène devient alors une matière première de l'industrie chimique, il est aujourd'hui utilisé dans de nombreux secteurs. C'est également au début du XIX e siècle que l'hydrogène commence à jouer un rôle en tant qu'énergie lors de l'apparition de l' éclairage au gaz à Paris en 1803 suivant le procédé mis au point par Lebon, un gaz dont le combustible était pour l'essentiel l'hydrogène qui s'y trouvait en proportion de 40 à 60 % en volume. Utilisé aussi pour son pouvoir calorifique dans le « réchaud à gaz »,

c'est jusqu'au milieu du XXesiècle que ce «gaz de ville » à base d'hydrogène s'est imposé comme une des principales énergies mises à disposition du grand public. Ainsi, vers 1960, on étudie un moteur-fusée à hydrogène qui fonctionne en 1968 et est à la base de la réussite du lanceur européen de satellites Ariane utilisant dès l'origine un étage supérieur cryogénique à hydrogène et oxygène liquides. [9]

**II.2 Principales propriétés physico-chimiques de l'hydrogène**

De tous les éléments naturels, l'hydrogène est le plus léger car il possède la structure atomique la plus simple. Son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. Il tient ainsi la première place dans la classification périodique de Mendeleïev. Il est incolore, inodore et non corrosif et il présente l'avantage d'être très énergétique.

À la température ambiante, le gaz hydrogène est un mélange de 75 % d'ortho-hydrogène et de 25 % de para-hydrogène qui diffèrent par l'orientation des spins des protons qui constituent les noyaux des deux atomes de leurs molécules [17,18].

Le tableau II.1 répertorie les principales propriétés physicochimiques de l'hydrogène.

| ***Tableau II. 1*** **:** *Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène* | |
|---|---|
| Propriété | Valeur numérique |
| Masse volumique du gaz à1atm et 273 K | 0,08988 kg · Nm $^{-3}$ |
| Masse volumique de la vapeur à1atm et 20,3 K | 1,34 kg · m$^{-3}$ |
| Masse volumique du liquide à1atm et 20,3 K | 70,79 kg · m$^{-3}$ |
| Enthalpie massique inférieure ou PCI | 119 930 kJ · kg$^{-1}$ |
| Enthalpie massique supérieure ou PCS | 141 860 kJ · kg$^{-1}$ |
| Capacité thermique massique à pression constante Cp | 14 266 · KJ · kg$^{-1}$ |
| Capacité thermique massique à volume constant CV | 10 300 · KJ · kg$^{-1}$ |
| Conductivité thermique du gaz | 0,1897 · W · m$^{-1}$K$^{-1}$ |
| Enthalpie massique d'évaporation à 20,3 K | 445,4 kJ · kg$^{-1}$ |
| Enthalpie massique théorique de liquéfaction | 14 112 J · g$^{-1}$(3,92 kWh · kg$^{-1}$) |
| Électronégativité (échelle de Pauling) | 2,1 |
| Masse atomique relative | 1,0079 |
| Constante thermodynamique du gaz | 4124,5 J · kg$^{-1}$ ·K$^{-1}$ |
| Température de solidification | 14,01 K |
| Température d'ébullition (à 1 013 mbar abs.) | 20,268 K |
| Température critique | 33,30 K |
| Température d'auto-inflammation dans l'air | 858 K |
| Température de flamme dans l'air à 300 K | 2 318 K |
| Limites d'inflammabilité dans l'air | 4 à 75 % vol. |
| Limites de détonation dans l'air | 13 à 65 % vol. |
| Énergie minimale d'inflammation | 20 µ J |
| Énergie explosive théorique | 2,02 kg de TNT · m$^{-3}$ de gaz |
| Surpression de détonation (mélange stœchiométrie) | 14,7 bar$^{-1}$ |
| Coefficient de diffusion dans l'air | 0,61 cm² · s$^{-1}$ |
| Vitesse de flamme dans l'air | 260 cm · s$^{-1}$ |
| Vitesse de détonation dans l'air | 2,0 km · s$^{-1}$ |
| Mélange stœchiométrique dans l'air | 29,53 % vol. |

La consommation mondiale s'élève à 50 Mt par an et représente près de 140Mt (2 % de la consommation mondiale d'énergie).

96 % de l'hydrogène est produit à partir d'énergie fossile, dont 48 % à partir de gaz naturel, 30 % des hydrocarbures liquides, 18 du charbon. 4 % seulement est produit à partir de l'électricité.

Il s'agit presque exclusivement d'une production sur site dédiée à un usage particulier: la production d'ammoniac (51 %), le raffinage pétrolier (3 %) et le méthanol (8 %). L'hydrogène est aussi produit pour servir de combustible pour la motorisation dans le domaine aérospatial. C'est donc un produit habituel pour l'industrie pétrolière, l'industrie chimique et l'aérospatial [9].

### II.2.1 Etat naturel

Combiné dans les matières organiques0.8% en masse (15% atomiques) sur terre. Très important biologiquement

.Constituant essentiel du soleil.

.3 isotopes ${}_{1}^{1}H$

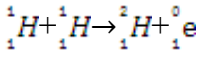
${}_{1}^{2}D$($10^{-4}$ en masse)

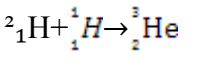
${}_{1}^{3}T$ ($10^{-18}$ en masse)

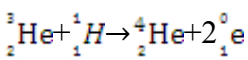
C'est l'élément dont les différences de masse relatives entre les isotopes sont les plus importantes (d'où son importance dans la conversion masse-énergie du noyau).

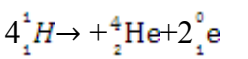
### II.2.2 l'hydrogène et l'énergie nucléaire.

D'importants travaux (recherches à l'échelon international regroupant plusieurs pays-projets de Tokamak européen ou de fusion par énergie laser aux USA )sont en cours pour mettre au point les conditions d'initiation et de contrôle de la réaction de fusion thermonucléaire des isotopes de l'hydrogène sur le modèle des réactions se produisant a la surface du soleil.









Cette réaction produit une énergie considérable $\Delta E = -6.0\ 10^{8} k.j.g^{-1}$ de réactant (27 MeV).elle nécessite d'atteindre d'abord des températures de l'ordre de $10^{9}°C$ pour communiquer aux atomes d'hydrogène la vitesse indispensable pour 'fondre' les noyaux après leur collision ($10^{6} m.s^{-1}$).

Le grand intérêt de ce type de réaction réside dans le fait que les produits résultant de la fusion nucléaire de l'hydrogène sont inoffensifs (uniquement des atomes d'hélium : $^{4}_{2}He$ stables et inertes) a la déférence du procédé de fission nucléaire de l'uranium $^{235}_{92}U$ qui produit de nombreux dérivés radioactifs très dangereux a longue période de vie.

Par ailleurs, la grande quantité d'eau présente sur terre assurerait la pérennité des ressources d'énergie,la production de cette énergie par fusion thermonucléaire de l'hydrogène consommerait annuellement $2\ 10^{-13}$% du deutérium $^{2}_{1}H$ présent dans l'eau de mer [10].

### II.3 La production de l'hydrogène

La molécule de dihydrogène n'est pas un produit naturellement disponible, bien que l'atome d'hydrogène entre dans la composition chimique de différents corps comme le méthane, l'eau, ou toute matière organique. On doit donc produire ce gaz à travers des procédés qui utilisent des sources primaires différentes, renouvelables ou non[11].

#### II.3.1 Procédés industriels

#### II.3.1.A Vaporeformage

96% de l'hydrogène utilisé industriellement est produit par vaporeformage d'hydrocarbures Le procédé de vaporeformage ou reformage à la vapeur est mis en œuvre sur des hydrocarbures légers (point d'ébullition inférieur à 200°C préalablement débarrassés de leurs impuretés (S, As, halogènes, $H_2S$). La charge peut être non seulement du gaz naturel mais aussi du méthane ou des charges plus lourdes comme le gaz de pétrole liquéfié (GPL). Le gaz naturel constitue cependant la charge de référence.

Les deux principales réactions chimiques du vaporeformage sont la production de gaz de synthèse et la conversion de CO.

Dans le cas du méthane, ces réactions sont les suivantes :

$CH_4+H_2O \rightleftarrows CO+ 3\ H_2$ II-1

$CO+H_2O \rightleftarrows CO_2+H_2$ II-2

Soit un bilan global qui peut s'écrire :

$CH_4+ 2\ H_2O \rightleftarrows CO_2+ 4\ H_2$ II-3

Ces réactions étant équilibrées, on opère généralement à des températures élevées, entre 800 et 950°C en sortie de zone réactionnelle sous une pression modérée de 1,5 à 3,0 MPa pour favoriser la production d'hydrogène. [12]

Le mélange gazeux obtenu renferme entre 70 et 75 % d'hydrogène, du monoxyde et du dioxyde de carbone, ainsi que du méthane non converti.

### II.3.1.B Oxydation partielle

À une haute température (1200 à 1500°C) et à pression élevée (2 à 9 MPa ou plus), en présence d'oxygène et d'un modérateur de température (vapeur d'eau), l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit, à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse.

En revanche, la réaction est exothermique et se déroule le plus souvent sans catalyseur. Cette réaction peut s'appliquer aux hydrocarbures (légers, lourds, asphaltes, coke de pétrole) mais aussi au charbon et à la biomasse (bois). Les réactions chimiques peuvent être schématisées dans le cas des hydrocarbures par les formules suivantes :

$CnHm+(n/2)O_2 \rightarrow nCO+(m/2)H_2$

$\Delta H=-36kJ.mol^{-1}$,pour n=1etm=4 II-4

$Nco+nH_2O \rightarrow nCO_2+nH_2$

$\Delta H=-41Kj.mol^{-1}$ pour n=1 II-5

La réaction (4) correspond à l'oxydation partielle proprement dite et est une réaction exothermique et exentropique qui porte le mélange gazeux à une température allant de 1000 à 1 400°C, moyennant un préchauffage à 300°C. C'est en fait une oxydation totale menée en défaut d'oxygène par rapport à la stoechiométrie de combustion. Elle

représente le résultat global d'un grand nombre de réactions qui conduisent à la formation de CO et d'$H_2$mais aussi de $H_2O$, C (suie) et de $CH_4$. Avant la conversion du CO, une composition type (en volume) du gaz de synthèse pour l'oxydation partielle d'un résidu sous vide est de :46 % d'$H_2$, 46 % de CO, 6 % de $CO_2$, 1 % de $CH_4$et 1 % de $N_2$.

### II.2.1.C Reformage autotherme

Il est basé sur l'association au sein d'un même réacteur d'une section d'oxydation partielle à l'oxygène pur, suivie d'une zone catalytique de vaporeformage. Sa conception permet de fournir l'enthalpie nécessaire aux réactions endothermiques du vaporeformage par les réactions exothermiques de l'oxydation partielle.

Dans ce procédé, la charge et l'oxygène sont mélangés en parallèle à de la vapeur d'eau avant d'être préchauffés. La réaction d'oxydation partielle s'effectue dans une zone de combustion homogène en entrée du réacteur et les gaz chauds produits sont ensuite dirigés vers la zone catalytique du réacteur pour la production de gaz de synthèse. Le catalyseur utilisé est généralement à base de nickel, la pression de 2 à 6 MPa et la température de 900 à 1 100°C. Le rapport $H_2$/CO « naturel » du gaz de synthèse obtenu est compris entre 2 et 2,8, mais le procédé possède la souplesse nécessaire pour ajuster ce rapport entre 1 et 3,5 selon les besoins de l'utilisateur final.

### II.3.1.D Électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste à faire traverser une eau par un courant continu pour dissocier les molécules d'eau ($H_2O$) en oxygène (O) a l'anode, borne électrique positive et en hydrogène (2H) a la cathode, borne électrique négative.

Cependant, l'eau pure est peu conductrice d'électricité et pour augmenter la conductivité électrique de l'eau, il est utilisé des électrolytes qui sont habituellement des acides, des bases ou des sels,ce qui explique pourquoi l'eau de mer est idéale pour une électrolyse.

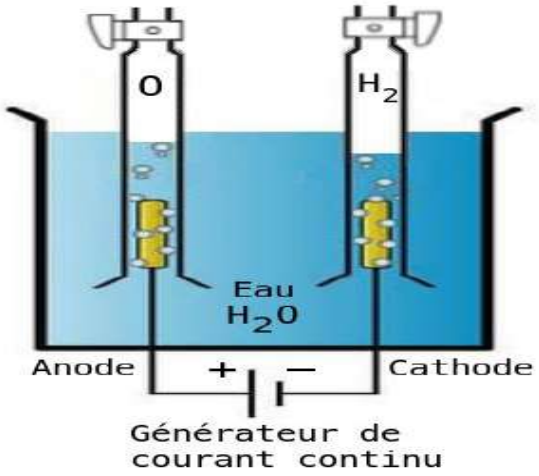



*Figure (II.1) : Électrolyse de l'eau*

En ne prenant pas en compte le système de production de l'électricité, le rendement d'une électrolyse avec un bon électrolyte est de 90 %.

### II.3.1.5 Procédés en cours de développement

#### II.3.1.5.A Électrolyse HT

Par rapport à l'électrolyse traditionnelle, l'électrolyse à haute température (EHT) présente deux avantages :

L'enthalpie libre nécessaire à la dissociation ; ici elle est sous forme d'énergie électrique.

les pertes ohmiques à l'électrolyseur, qui sont principalement liées à des phénomènes de surtension, diminuent quand la température augmente et deviennent négligeables quand la température est supérieure à 973°C [12]

#### II.3.1.5.B Cycles thermochimiques

Le processus est, à haute température, une série de réactions de combinaison avec l'eau de substances chimiques comme l'acide sulfurique et l'iode ou le chlorure de cuivre suivie de dissociations avec production d'hydrogène et d'oxygène et en fin de cycle la restitution des substances initiales [9]

#### II.3.1.5.C Transformation thermochimique de la biomasse

La biomasse, obtenue par photosynthèse de $CO_2$ et $H_2O$, capte l'énergie solaire pour produire un ensemble de molécules, cellulose, lignocellulose et lignine, de composition équivalente à $C_6H_9O_4$. La gazéification à la vapeur de cette biomasse permet de produire un gaz de synthèse composé de CO et $H_2$ qui peut ensuite être

valorisé pour produire des carburants liquides (synthèse Fischer-Tropsch) ou gazeux ($CH_4$et $H_2$).

Le procédé de transformation s'effectue en deux étapes :

– un premier traitement en l'absence d'oxygène de 500 à 600 °C : thermolyse ;

– un deuxième traitement en présence de vapeur d'eau et à haute température (900 °C) : gazéification pour produire un mélange de CO et $H_2$. Comme pour les réactions de vaporeformage, la conversion duCO en $CO_2$peut ensuite être effectuée par la réaction de Water Gas Shift pour augmenter le rendement de production en $H_2$. Lorsque l'on intègre l'étape de Water Gas Shift, la réaction globale s'écrit :$C_6H_9O_4$ +8 $H_2O \rightarrow 6\ CO_2$ +12,5 $H_2$

Sur les 12,5 molécules d'hydrogène finalement obtenues, 4,5 seulement proviennent de la biomasse et 8 sont apportées par l'eau utilisée comme réactif. Le $CO_2$ainsi libéré ne contribue pas à alimenter l'effet de serre car on peut considérer qu'il s'agit de la même quantité de $CO_2$que la photosynthèse a capté dans l'atmosphère, pour la croissance de la plante.

Les réactions thermochimiques sont globalement endothermiques et nécessitent une énergie qui peut être produite par oxydation ou combustion partielle d'une partie de la ressource pour réduire encore plus les émissions de $CO_2$(transformation auto thermique) ou en utilisant l'appoint d'une source extérieure (transformation allo thermique).

**II.3.1.5.D Photo-électrolyse**

La photo-électrolyse de l'eau est la dissociation de la molécule d'eau par électrolyse à partir d'un courant électrique produit à partir de l'énergie solaire en utilisant un photocatalyseur à semi-conducteur [9]

Des semi-conducteurs à large gap (comme $TiO_2$ et AsGa) fournissent la tension suffisante mais avec rendement de conversion faible. Une amélioration est possible par modification de la structure du semi-conducteur ou par couplage avec des structures photosensibles comme des films colorants qui absorbent une partie plus large du spectre lumineux. Le semi-conducteur doit être de plus protégé de la corrosion aqueuse par un film protecteur. Des travaux sont en cours pour optimiser la conception de systèmes opérationnels mettant en œuvre deux zones de production séparées pour la production respective d'$H_2$et $O_2$.

Divers travaux de recherche continuent pour proposer de nouveaux matériaux de photocathode ou de nouvelles solutions pour les films dopants, mais les rendements restent modérés, proches de 10 % au maximum. Un rapport de l'IEA fait la synthèse de ces travaux [12].

### II.3.1.5.E Production par des micro-organismes

Certaines algues vertes unicellulaires ou cyanobactéries peuvent générer de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire en utilisant l'eau comme donneur d'électrons et de protons, et ce, sans le dégagement parallèle de gaz à effet de serre ($CO_2$) inhérent aux autres organismes hétérotrophes. Cette photo production d'hydrogène en est encore au stade de l'expérimentation en laboratoire. Le problème majeur à résoudre, lié à la nature transitoire du phénomène en conditions naturelles, est, l'arrêt rapide du processus de dégagement de l'hydrogène. Cela est dû au fait que l'hydrogénase, l'enzyme responsable de la production d'hydrogène, est fortement sensible à l'oxygène qui se dégage en parallèle par photosynthèse lors de la biophotolyse de l'eau. L'algue verte Chlamydomonas reinhardtii a été retenue comme espèce d'étude car elle possède une hydrogénase à fer à forte activité couplée à la chaîne photosynthétique. Lorsqu'elle est placée à la lumière en conditions d'anaérobie, cette algue produit transitoirement de l'hydrogène, en utilisant l'eau comme donneur d'électrons. Pour arrêter la production parallèle d'oxygène à laquelle l'hydrogénase est très sensible, des « dérivateurs métaboliques » peuvent être envisagés. Les cellules consomment alors, par respiration, plus d'oxygène qu'elles n'en produisent et les conditions d'anaérobie sont maintenues. [12]

### II.2.1.5.F Production d'hydrogène par Fermentation

-Production d'hydrogène à partir de résidus organiques

L'entreprise HOLLANDAISE WETSUS a développé un système d'électrolyse microbienne en soumettant des bactéries et une solution de mélange organique issu d'eaux usées a une électrolyse soumis à une tension de seulement 0.3 a 0.4 volts, associée a une membrane pour produire de l'hydrogène.

L'électrolyse microbienne est 5 fois moins consommatrice d'énergie que l'électrolyse simple.

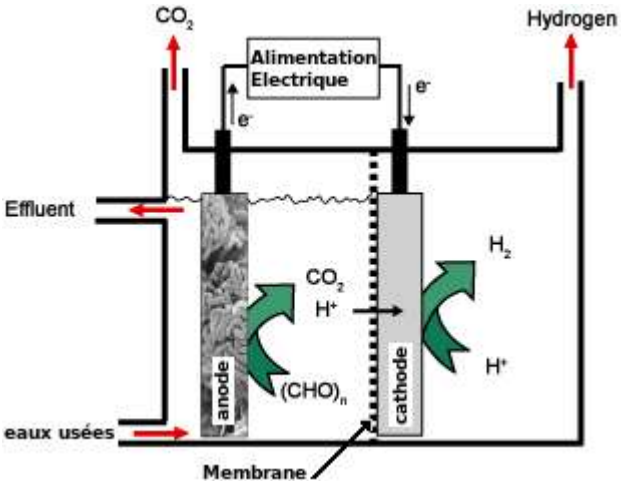



*Figure (II-2) : Electrolyse microbienne*

Dans la recherche publiée dans Proceedings of the National Academy of Sciences, Bruce Logan de l'Université AMERICAINE PENN STATE et son collègue Shaoan Cheng ont mis au point une pile a combustible microbienne en soumettant a une électrolyse un mélange de bactérie et de matière organique biodégradable pouvant provenir d'eaux usées avec de l'acide acétique (naturellement présent dans le vinaigre) pour produire de l'hydrogène. Le système d'électrolyse microbienne n'utilise qu'une très faible tension de 250 mV, démontrant ainsi une méthode bien plus énergiquement économique qu'avec une simple électrolyse de l'eau. La pile à combustible microbienne permet de dégrader la matière organique et de produire de l'hydrogène.[13]

### *Hydrogène naturel*

Depuis une vingtaine d'années, on connaît l'existence de dégagements d'hydrogène le long de chaînes volcaniques sous-marines dont l'exploitation trop onéreuse n'a jamais été envisagée. Plus récemment, des géologues russes effectuant des travaux de forage ont mesuré d'importants flux d'hydrogène émanant du sol. Leurs résultats furent confirmés par des chercheurs de l'Institut français du pétrole énergies nouvelles IFPEN, à qui il avait été fait appel. Puis en dehors des plaines de Russie, d'autres sites dans le monde ont été identifiés avec pour prolongement immédiat le développement de deux unités pilotes de captage de ces émanations en vue d'expérimenter et de mettre au point leur exploitation. L'une est au Kansas, aux

États-Unis, l'autre est au Mali au sud de Bamako. L'intérêt pourcet hydrogène naturel a été renforcé par le fait que des relevés par satellites semblent montrer non seulement qu'il existerait de tels gisements d'hydrogène en de nombreux points du globe mais aussi qu'ils seraient répartis sur tous les continents.

Le vecteur d'énergie hydrogène deviendra-t-il une énergie naturelle? Voire une énergie renouvelable s'il est prouvé que le processus de sa formation dans le manteau terrestre, ou plus en profondeur, est continu, c'est-à-dire que cet hydrogène n'est pas en quantité limitée préexistante. Il pourrait en particulier provenir d'une oxydation du fer présent dans les roches par l'oxygène de l'eau qui, d'après de récentes données, circule en grande quantité dans le manteau. De l'hydrogène naturel en abondance : voilà qui pourrait bien contribuer à relever le défi énergétique de l'avenir !

En avril 2013, la découverte a été révélée au grand public par un communiqué de presse de l'IFPEN : L'hydrogène naturel, une contribution au mix énergétique? L'information a depuis été relayée par de nombreux médias [9]

### II.3.1.6 Conversion énergétique de l'hydrogène

#### II.3.1.6.A Moteurs thermiques à hydrogène

On entend par moteurs thermiques les moteurs à combustion interne (dits communément « à explosion ») qui, suivant le cycle de Beau de Rochas-Otto ou celui de Diesel, fonctionnent à partir de la combustion d'essence, de gazole ou encore de gaz de houille, de gaz naturel Tous ces moteurs à base d'une combustion sont convertibles à l'hydrogène. Des précautions sont à prendre pour éviter un retour de flamme vers le collecteur d'admission. La perte au niveau de la puissance est de 20 à 25 % par rapport à un moteur à essence de même cylindrée, mais le rendement énergétique est équivalent. Il y a de plus nécessité de choisir des matériaux adaptés à l'hydrogène (corrosion, lubrification). De tels moteurs n'émettent pas de $CO_2$ seulement quelques oxydes d'azote, ils sont bien adaptés à des véhicules hybrides essence-hydrogène comme le sont les prototypes bi-carburants mis au point depuis 1979 par le constructeur allemand BMW. Celui-ci qui a par la suite perfectionné ses moteurs par une technique d'injection directe à haute pression de l'hydrogène a actuellement abandonné ce type de motorisation thermique à hydrogène. D'autres constructeurs comme MAN, Ford, Mazda et Quantum ont également effectué des

recherches sur ces types de moteurs thermiques à hydrogène, ont construit des prototypes de véhicules les utilisant (automobiles, utilitaires, autobus) [14].

**II.3.1.6.B Applications aéronautiques et spatiales**

Un cas particulier de moteur thermique adapté à l'hydrogène est la turbine à gaz utilisée en aéronautique : le turboréacteur. Au niveau de la chambre de combustion, il est nécessaire de prendre en compte les spécificités particulières de l'hydrogène (faible densité avec ses conséquences sur le débit volumique et la perte de charge ; faible viscosité ; fort coefficient de diffusion ; explosivité importante, etc.). L'hydrogène injecté doit être gazeux à une température supérieure à 150 K et à une pression de 3 MPa (condition indispensable pour qu'il soit en quantité suffisante), en tenant compte que cet hydrogène provient d'un réservoir où il est en phase liquide à 20 K et 0,1 MPa. La technologie est pour cela délicate au niveau pompe-échangeur de chaleur. Quant à l'architecture de l'avion, elle doit inclure le volume et les contraintes d'isolation qu'impose le réservoir d'hydrogène liquide. En raison du meilleur pouvoir combustible de l'hydrogène, la quantité nécessaire pour un même vol est seulement 30 à 35 % de celle de kérosène, mais la différence de densité des deux liquides (rapport 11,4) impose que le réservoir d'hydrogène ait un volume environ quatre fois plus grand. La solution adoptée est d'adjoindre au fuselage un réservoir cylindrique le plus long possible pour ne pas trop augmenter le maître couple c'est-à-dire la traînée aérodynamique.

L'utilisation de l'hydrogène dans le domaine spatial est probablement l'application la plus connue en particulier par les moteurs de la fusée Ariane. Dans un tel moteur-fusée, la poussée est produite par l'éjection d'un flux de gaz animé d'une très grande vitesse [14].

**II.4Piles à combustible**

Il existe un mode de combinaison de l'hydrogène à l'oxygène : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$qui est une combustion électrochimique contrôlée produisant de l'eau, de la chaleur et, ce qui est le plus intéressant, de l'électricité correspondant aux électrons libérés par la formation des ionshydrogène ($H^+$) et hydroxyle ($OH^-$) dont l'eau est constitué. Le dispositif, qui permet cette réaction, est la pile à combustible comportant essentiellement un électrolyte, milieu conducteur ionique acide ou basique, séparant une anode alimentée en hydrogène et une cathode alimentée en oxygène [14].

Le principe de la pile à combustible est donc l'inverse de celui de l'électrolyse qui, par le passage d'un courant électrique dans de l'eau, produit de l'hydrogène et de l'oxygène.

### II.4.1 Domaines d'applications de la pile à combustible

#### II.4.1.A Équipements portables

Il s'agit du téléphone mobile (puissance de l'ordre de 100 mW) et de sa version intelligente, le smartphone (iphone), également des lecteurs MP³ puis de l'ordinateur portable (puissance de l'ordre de30 W) et le dispositif plus ou moins intermédiaire le ipad. Tous, sous leur forme actuelle, sont handicapés par la faible capacité de leur batterie lithium-ion, qui assure une autonomie de quelques jours à un téléphone et de trois heures environ à un ordinateur portable.

#### II.4.1.B Transport

C'est le domaine d'application qui est à l'origine du développement de la pile à combustible à la fin du XXe siècle et en particulier de la pile PEM

-Sur route, Sur rails, Sur l'eau-En l'air

#### II.4.1.C Stationnaire

Il s'agit de la production d'électricité ou collective pour des puissances allant de 200 kW à quelques MW, ou individuelle, pour des puissances de 1 à 5 Kw Ces équipements à pile à combustible pour une utilisation courante (domestique ou industrielle) doivent être complétés par un onduleur qui transforme en courant alternatif le courant continu qu'ils délivrent [14].

## II.5Dangers de l'hydrogène et sécurité

### II.5.1Inflammabilité

La combustion de l'hydrogène exige la présence d'oxygène et d'une énergie d'inflammation. La concentration minimale d'hydrogène et d'oxygène autorisant la combustion est la limite inférieure d'inflammabilité, la concentration maximale étant, elle, la limite supérieure d'inflammabilité. La zone des concentrations intermédiaires est la plage d'inflammabilité.

### II.5.2Explosivité

Une combustion vive est une libération soudaine d'énergie entraînant un front de flamme et une onde de surpression suivant deux régimes possibles

– la déflagration : le front de flamme se propage à vitesse subsonique ; les gaz frais sont comprimés par l'expansion en volume (effet piston) avec pour conséquence une augmentation continue de la surpression ;

– la détonation : le front de flamme se propage à vitesse supersonique, les flammes accompagnent la surpression, il y a formation d'une onde de choc.

Le régime de combustion vive dépend des concentrations hydrogène/air. La déflagration se produit dans les domaines allant de 4 à 18 % et de 59 à 75 % alors que la détonation a lieu dans la plage centrale des concentrations de 18 à 59 %. Lorsque la combustion vive est amorcée, il peut y avoir passage de la déflagration à la détonation, les facteurs influant sur ce transfert étant ceux agissant sur le front de flamme tels que les turbulences créées par des obstacles, les perturbations acoustiques, les forces d'Archimède ou les gradients de pression atmosphérique. La large plage de détonation de l'hydrogène et les phénomènes de turbulence propre aux accumulations de gaz en suspension dans l'atmosphère en forme de nuages laissent prévoir que la combustion vive de l'hydrogène se fasse surtout en déflagration rapide et en détonation.

### II.5.3Sécurité du stockage et du transport

En raison du caractère inflammable et explosif de l'hydrogène décrit dans ce qui précède, la fuite est le risque à considérer en priorité. L'hydrogène étant le gaz le plus léger, autrement dit constitué de la plus petite des molécules, sa propension à fuir est importante et ce quel que soit le dispositif qui le contienne : réservoir de gaz comprimé, gazoduc, container à liquide, etc. Pour les fuites à faible débit en milieu non confiné, il se disperse immédiatement dans l'atmosphère : il n'y a pas formation de nuage. En revanche pour les fuites à grand débit en milieu confiné, la moindre fuite peut se révéler dangereuse. Ainsi, il a été prouvé que dans un garage résidentiel, de simples ouvertures basses et hautes assurant une circulation d'air permettraient la dispersion rapide de l'hydrogène issue d'une fuite de réservoir et éviterait la formation d'un nuage [14].

# CHAPITRE III

***Formulation Mathématique***

### III.1 Introduction :

Les équations qui régissent un écoulement avec réaction sont dans ce cas celles de Navier-Stokes moyennées, l'équation d'énergie, l'équation de la moyenne de la fraction du mélange etl'équation d'état du gaz. Les termes superflus issus de la prise de la moyenne seront modélisés.

### III.2 Equations de la combustion gazeuse:

Dans la combustion gazeuse les écoulements de fluide peuvent être mathématiquement décrits par l'équation da Navier-stockes. Ces équation sont généralement valides pour un mélange des gaz parfaits en équilibre thermodynamique.

Les hypothèses considérées pour la combustion turbulente non-prémélangée sont les suivantes :

- L'écoulement est tridimensionnel.

- Le fluide est compressible.

-Le régime instationnaire.

L'équation gouvernant l'écoulement du fluide s'obtient en considérant la conservation de la masse, la quantité de mouvement, l'énergie ainsi que la masse de chaque espèce chimique lorsque le fluide passe à travers un volume de control fixe. [(williams 1985), (poinsot et veynant 2001) ]

### III.3 Equations de continuité :

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

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x}\rho u_i = 0 \qquad \text{III-1}$$

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

### III.4 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 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial}(\rho u_i u_j)=\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial u_j}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u_i \overline{u_j})+F_I \qquad \text{III-2}$$

avec :

p est la pression du mélange.

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

$\mu$ est la viscosité dynamique et $\delta_{ij}$ est le symbole de Krönecer.

$F_I$ les forces de volume.

Pour les relier à l'écoulement moyen, on a recours au concept de Boussinesq qui permet de les exprimer en fonction des gradients des vitesses moyennes [15]:

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

### III.5 Equations de conservation de l'énergie

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

$$\text{Avec : } J_j = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu t}{sct}\right)\frac{\partial y_i}{\partial x_i} \qquad \text{III.5}$$

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

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

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

$k_{eff}$ Conductivité effective ($k+k_t$) ou $k_t$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.6Equations 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 :

$$\frac{\partial(\rho y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v y_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\left(\rho D_{I,m} + \frac{\mu t}{sct}\right)y_i\right) + R_I \qquad \text{III.8}$$

$Y_I$: est la fraction massique de espèce i

$Sc_t$ : Nombre de Schmidt turbulent $\frac{\mu t}{\rho Dt}$

$R_I$ : 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 La constant universelle des gaz

$M_{w,i}$ La masse molaire de l'espèce i

$P_{OP}$ La pression de référence.

### III.7 Equations d'état

Sous l'hypothèse des gaz parfait, l'équation d'état s'écrit :

$$P = \rho \cdot R \cdot \sum \frac{Y_i}{M_i} \qquad \text{III-10}$$

$$h = \sum h_i(T) \cdot Y_i \qquad \text{III.11}$$

$$h_i = \int_{T_r,f}^{T} C_{p,i}(T) \cdot Y_i \qquad \text{III.12}$$

$$C_p = C_p(T) = \sum_{i=1}^{m} C_{p,i}(T) \cdot Y_i \qquad \text{III.13}$$

$C_p$ La capacité calorifique du mélange.

$M_i$ La fraction massique de l'espèce.

### III.8.1 Modélisation de la réaction de combustion :

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 [29]. 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.8.2 Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente

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

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

**.L'énergiecinétique est donnée comme suit :**

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u) = \frac{\partial}{\partial x_j} + \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_K + G_b - \rho\varepsilon \qquad \text{III. 15}$$

Avec :

$$G_K = \overline{\rho u_i' u_j'}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \text{ et } G_b = \beta g \frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$\beta = \frac{1}{\partial}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$ ou $G_{b;}$ est l'effet de la gravité (ou poussée d'Archimède)

**.Modélisation de la viscosité turbulente :**

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

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \text{III. 16}$$

Pour la constant $c_\mu$ : $c_\mu$ =0.09

### III.8.3 Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie turbulente

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_j}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}(G_K + G_{3\epsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad \text{III. 17}$$

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 ; $\sigma_k$=1.3

### III.8.4 Modélisation de la réaction de combustion :

Plusieurs modèles de combustion existent dans la littérature. On présente ici quelques modèles qu'on a utilisés 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-prèmelangèes (ou de diffusion). Ces modèles seront donc utilisés pour la modélisation des taux de réaction.

# CHAPITRE IV

***Présentation des outils de simulation*.**

## IV.1 Introduction :

Les outils de simulation numérique occupent une place prépondérante dans la dynamique des fluides. La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation.

La modélisation et la simulation interviennent pour:

- ✓ La compréhension de la structure et des interactions à l'intérieur d'un système (déterminer le rendement, la performance…)
- ✓ L'étude du comportement du système par rapport à son environnement extérieur (consommation énergétique/cout…)
- ✓ La prédiction du comportement d'un système pour des situations extrêmes.
- ✓ La conception de nouveaux dispositifs/ composants, étude de système (composant) avant la création de prototype et mise en œuvre de procédés.
- ✓ L'optimisation des solutions lors de la conception.

La simulation ne supplante pas l'expérimentation mais la complète. Elle permet d'effectuer l'analyse du problème dans des conditions réalistes par la reproduction des tests que l'on fait en expérimentation pour mieux les comprendre et à moindre coût. Ou même, de faire d'essais pour des phénomènes extrêmes et/ou hétérodoxestels que climats extrêmes, défauts d'installations, réactions nucléaires…

Ces dernières ne peuvent être faites par l'expérimentation (raison de couts…). Ainsi, la simulation accroit le champ des tests et donne au système étudié plus de flexibilité et permettre la possibilité de faire des études paramétriques.

## IV.2. Notions d'utilisation du logiciel POINTWISE [19]:

### IV.2.1. Présentation de Pointwise :

Cette section contient une présentation succincte du logiciel Pointwise, ainsi que exemple d'utilisation permettant une première prise en main. Pointwise est un logiciel industriel permettant la construction de maillages structurés ou non, Il possède en outre de nombreuses possibilités d'extraction qui permettent l'utilisation de ses maillages par des logiciels industriels comme par exemple Fluent. Lors de la création d'une session, Pointwise crée un fichier

### IV.2.2 Description du panel général:

Le panel général de Pointwise est divisé en 6 parties (cf. figure VI-1) :

1. un panel « **Menus** » donnant accès à une liste de menus ;
2. un panel « **Toolbars** » donnant accès aux commandes le plus utilisées dans Pointwise ;
3. un panel « **Panels** » donnant la liste de toutes les entités constituant la géométrie et le maillage ;
4. un panel « **Display Window** » présentant la géométrie ;
5. un panel « **Messages** » relevant différentes informations comme les actions réalisées et leursrésultats ;
6. un panel « **Status Bar** » donnant des informations sur le maillage, notamment sa dimension (2Dou 3D) et le solveur utilisé (Fluent, Tetrex….).

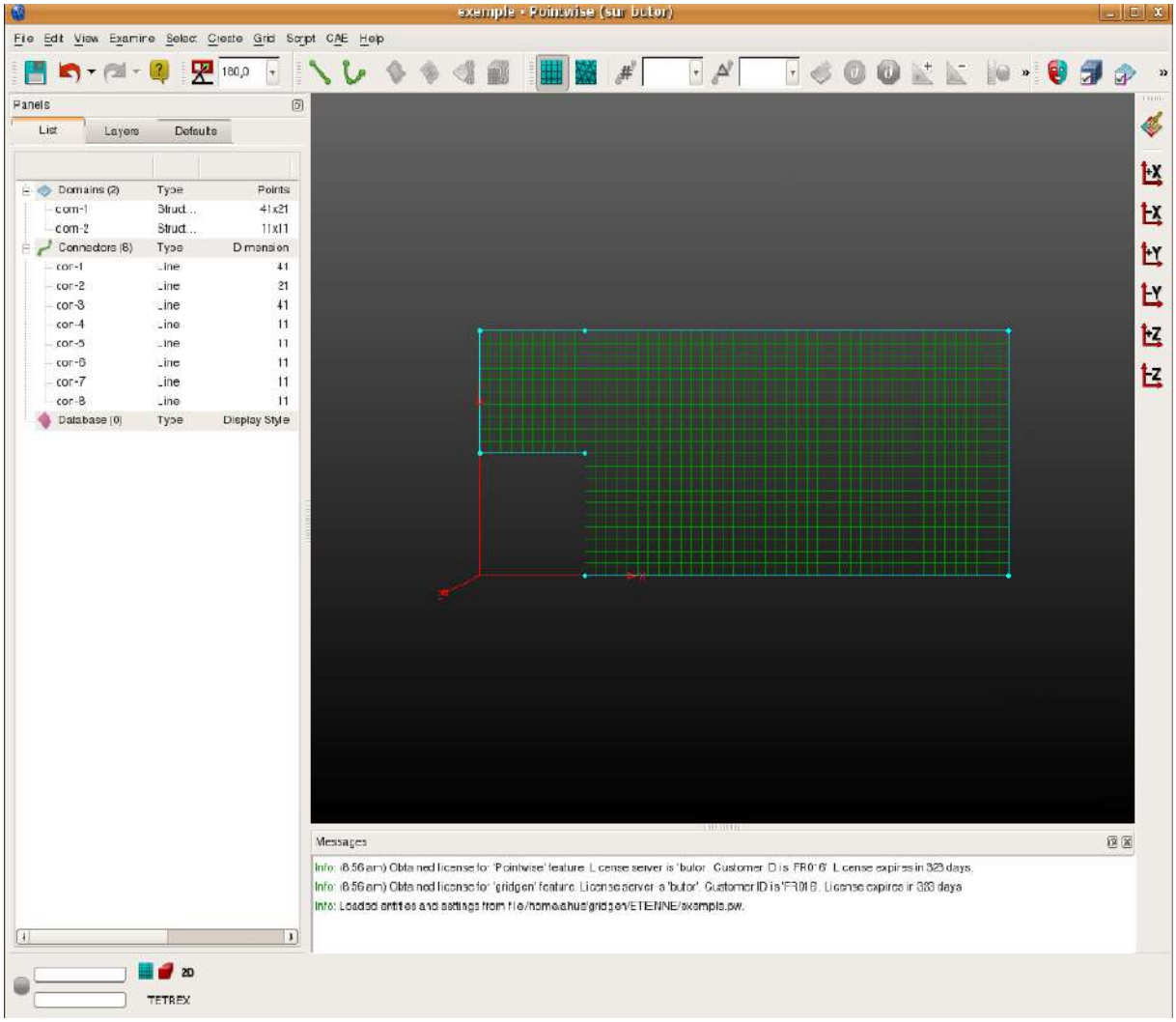



*Figure (IV-1) : Interface de Pointwise*

- Nous allons maintenant détailler l'utilisation de la souris :

*Utilisation de la souris dans les panels généraux :*

- Bouton gauche : sélection ;
- Bouton droit : pas d'action ;
- Bouton du milieu : pas d'action ;

*Utilisation de la souris dans le panel graphique :*

- Bouton gauche : sélection;
- Bouton droit : (en maintenant et déplaçant la souris) translation du repère;
- -Bouton du milieu : zoom.

### IV.2.3 Description du panel « Menus »




*Figure (IV-2) : Menu générale de Pointwise*

- ***File :*** permet d'ouvrir, de fermer, de sauvegarder des sessions, d'importer et d'exporter desfichiers. Il sert notamment lors de l'exportation de maillages pour Thétis avec les commandes (File/Export/CAE/…le détail est donné plus loin) ;
- ***Edit :*** fournit tous les outils nécessaires pour faire des modifications aux maillages ou aux entitésqui le constituent. C'est là que se trouvent aussi les commandes Undo, Redo, Cut, Copy, Paste.
- Une commande primordiale pour la suite est la commande ***Orient*** qui permet d'attribuer la mêmeorientation à tous les sous-blocs d'une géométrie,
- ***View :*** fournit des options pour changer l'affichage du projet.
- ***Examine :*** contient des commandes de diagnostic pour vérifier la qualité du maillage et déterminerdes métriques spécifiques. On peut notamment vérifier l'orthogonalité du maillage.
- ***Select :*** fournit l'accès à différents outils de sélection.
- ***Create :*** fournit toutes les possibilités de construction d'entités disponibles dans Pointwise.
- ***Grid***: fournit des outils spécifiques au maillage notamment la commande ***Dimension*** qui permetde déterminer le nombre de mailles à utiliser et la commande ***Solve***qui permettra d'améliorer laqualité du maillage, notamment son orthogonalité.
- ***CAE :*** permet de déterminer la dimension du problème (2D ou 3D), le solveur utilisé pour pouvoirexporter le maillage et d'imposer les conditions limites.
- ***Help :*** fournit l'aide de Pointwise.

### IV.2.4 Description du panel « ToolBar »



Il fournit un accès rapide aux commandes les plus utilisées de Pointwise. Ce panel peut être reconfiguré aux convenances d'utilisateur.

### IV.2.5 Description du panel « Panels »

Trois panels fournissent un accès continu aux fonctionnalisés utilisées fréquemment : ***List***, ***Layers*** et ***Defaults***.

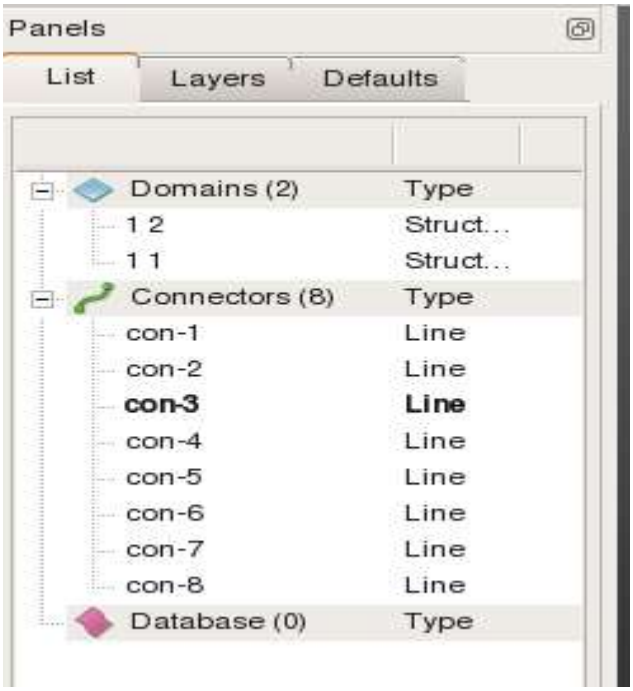



*Figure (IV-3) : Le menu Panels de Pointwise.*

- ***List :*** fournit la liste des toutes les entités. Les entités sont groupées par type.
- ***Layers :*** fournit un système de « couches » afin de jouer sur la visibilité des entités.
- ***Defaults :*** permet de déterminer certains paramètres par défaut qui seront attribués lors de la création des entités.

### IV.2.6 Description du panel « Display Window »

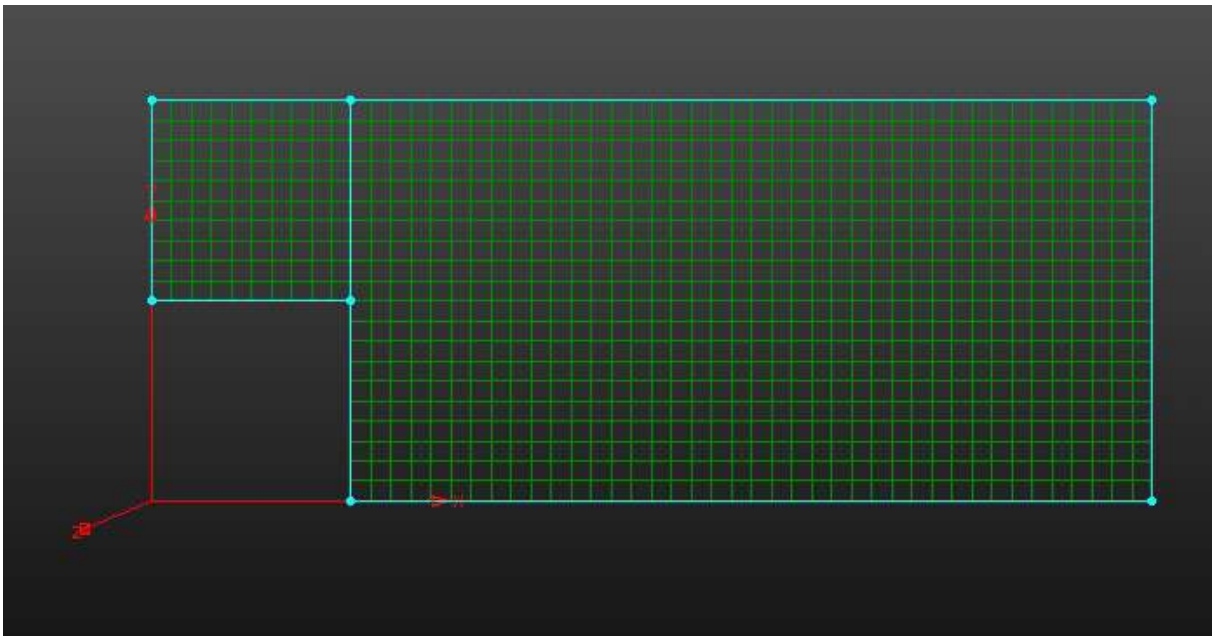
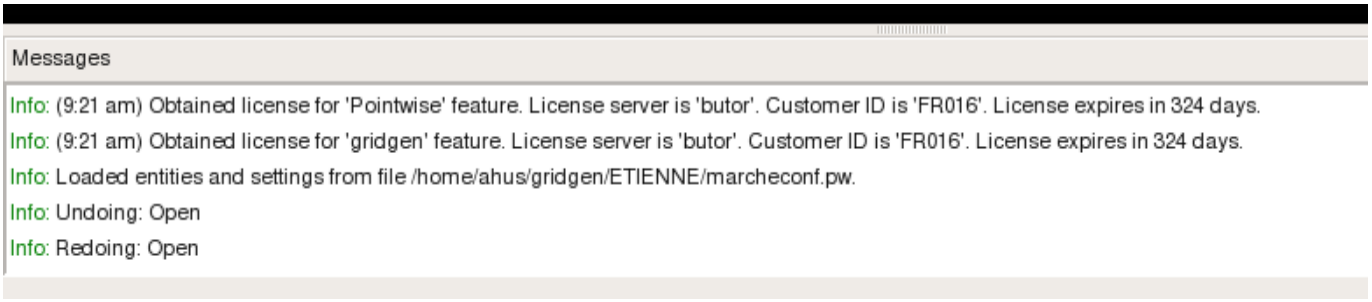


*Figure (IV-4) : Fenêtre principale de Pointwise*

La géométrie ainsi que ses changements éventuels figurent constamment dans cette fenêtre.

### IV.2.7 Description du panel « Messages»




*Figure( IV-5) : Fenêtre de messages*

Il figure par défaut au-dessous de la fenêtre principale. Il présente différentes informations comme les actions réalisées et leurs résultats.

### IV.2.8 Description du panel « Status Bar»

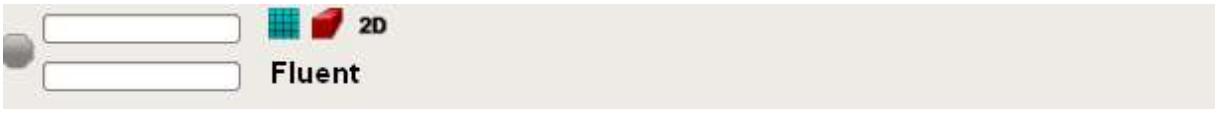



*Figure (IV-6) : bar d'état Pointwise*

Il fournit diverses informations sur le maillage, notamment la dimension (2D ou 3D), le solveur utilisé(dans l'exemple Fluent) et si le maillage est structuré ou non-structuré.

## IV.3 Exemple d'utilisation de Pointwise :

Dans cette section nous allons illustrer l'exemple suivant de Pointwise permettant une première prise en main. Il s'agit d'une géométrie bidimensionnelle pour laquelle nous allons utiliser un maillage structuré.

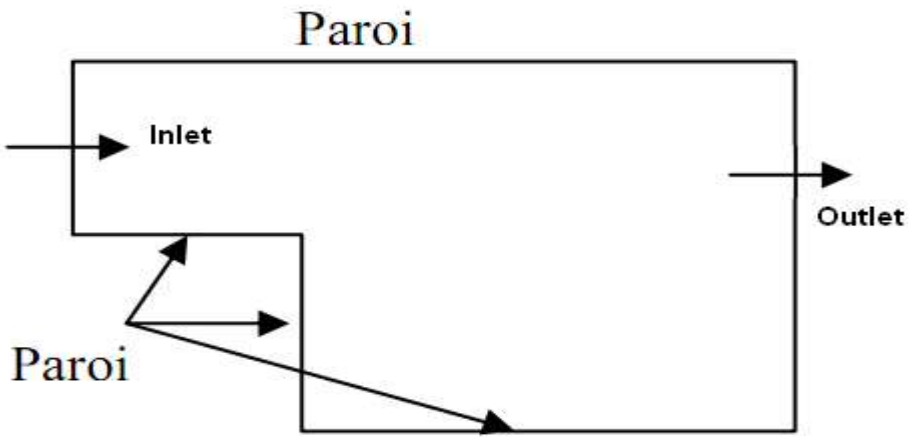



*Figure (IV-7) : Figure d'un exemple Pointwise*

La géométrie ne peut être assimilée à un rectangle, elle doit donc être divisée. Une manière de le faire est de créer un premier rectangle à gauche (qui prendra en compte la condition limite d'entrée ***inlet*** et une partie de la paroi inférieure et supérieure), et un deuxième à droite.

Les deux surfaces ainsi définies devront être maillées de façon conforme. Le second rectangle sera en plus défini à partir d'au moins 5 segments. En effet, trois segments pour les parois, un pour la condition ***Outlet*** et enfin un pour la connexion avec le premier rectangle.

On obtient alors le découpage suivant :

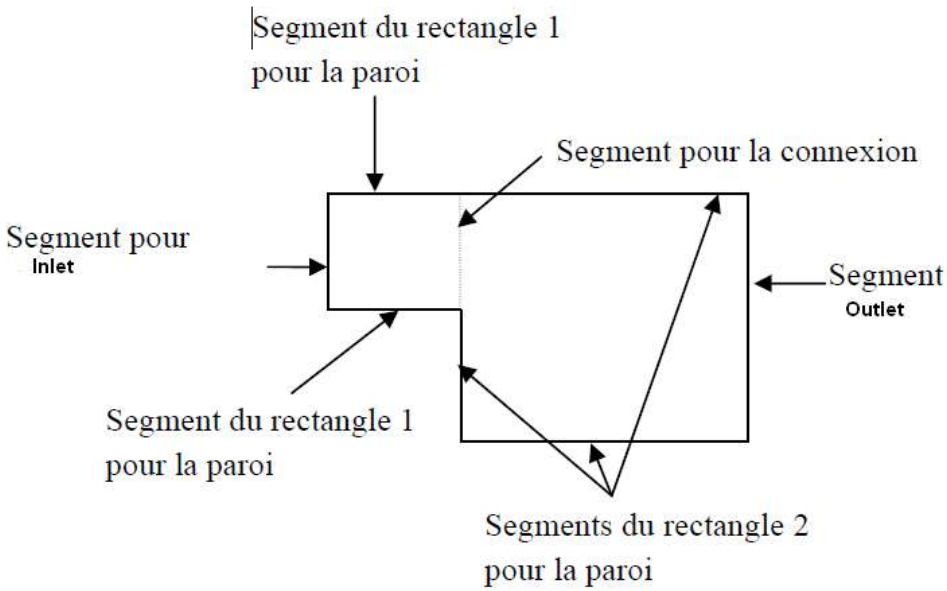



*Figure (VI-8) : Découpage de la figure*

Dans ce qui suit la description des étapes sous Pointwise:

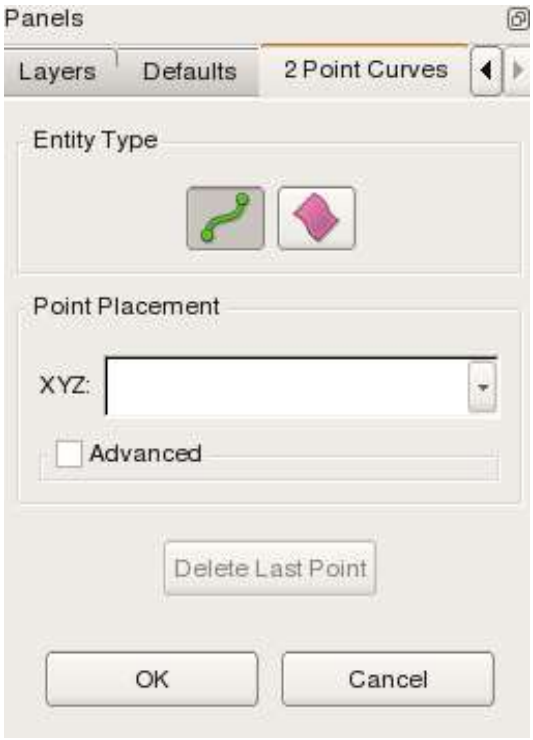
## IV.3.1Ouverture d'une session:

Après avoir lancé Pointwise, sauvegardez la session « exemple » avec ***File/Save as***. La première chose à faire est de choisir la dimension du problème (ici 2D). Ceci est fait grâce à CAE/Set Dimension/2D. Il faut ensuite choisir le solveur. Le seul solveur qui permet d'exporter un maillage à un format pouvant être relu par Thétis est le solveur FLUENT. Il faut donc le choisir avec ***CAE/Select Solver/FLUENT***.

## IV-3-2 Création des segments du domaine:

On utilise la commande ***Create/2 Point curves***. Les segments sont nommés ***connector***.

On va rentrer les deux points qui forment le premier segment. Dans la rubrique ***Entity Type***, on choisit ***Connector***.Dans la rubrique ***Point Placement***, il faut rentrer les coordonnées du premier point(0.1, 0, 0), valider en appuyant Entrée puis lescoordonnées du second point (0.5, 0, 0) et revalider. Le premier segment est créé. On peut appuyer Control+R pour ajuster automatiquement la fenêtre graphique aux dimensions de la géométrie.




***Remarque :*** même si on est en 2D, il faut remplir la coordonné Z des points.

De même, on crée :

- le segment 2 constitué des points (0.5, 0, 0) et (0.5, 0.2, 0),
- le segment 3 constitué des points (0.5, 0.2, 0) et (0.1, 0.2, 0),
- le segment 4 constitué des points (0.1, 0.2, 0) et (0, 0.2, 0),
- le segment 5 constitué des points (0, 0.2, 0) et (0, 0.1, 0),
- le segment 6 constitué des points (0, 0.1, 0) et (0.1, 0.1, 0),
- le segment 7 constitué des points (0.1, 0.1, 0) et (0.1, 0, 0),
- le segment 8 constitué des points (0.1, 0.1, 0) et (0.1, 0.2, 0).

Une fois que tous les segments sont créés on peut fermer la fenêtre en cliquant sur **OK**.

***Remarque :*** on peut aussi créer d'abord tous les points grâce à la commande Create/Points dans laquelle il faut rentrer les coordonnées des points puis tracer les segments en utilisant Create/2_Point_curves et en cliquant sur les deux points constituant un segment.

Voici ce que l'on obtient à ce stade de la construction :

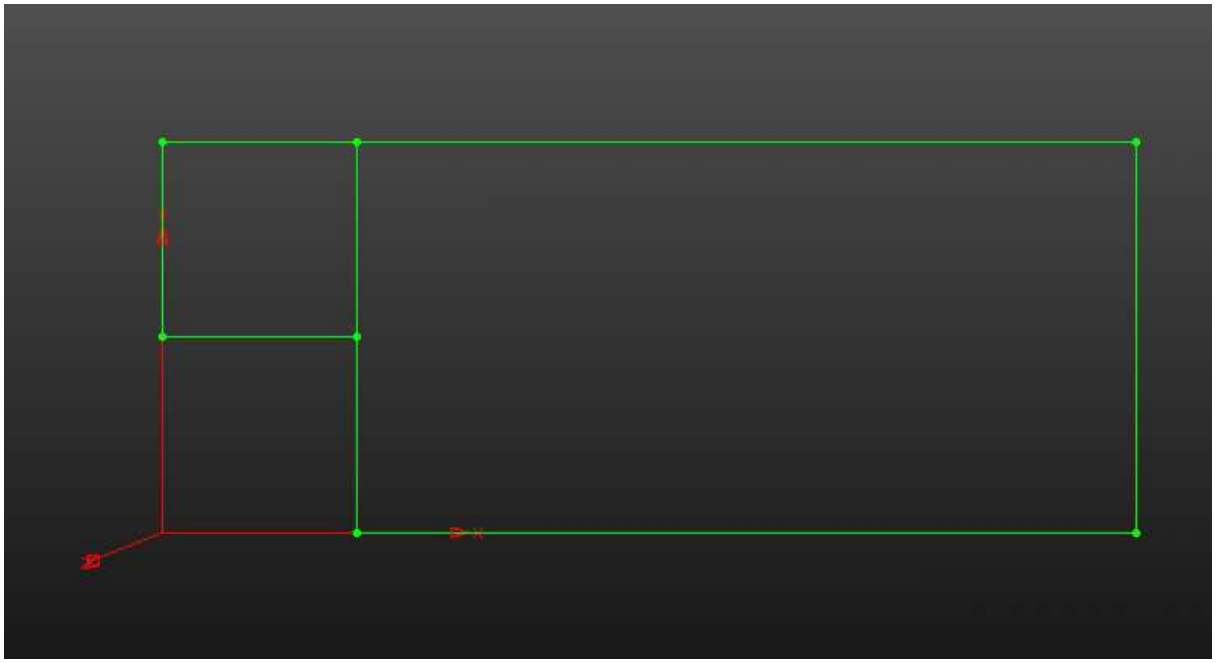
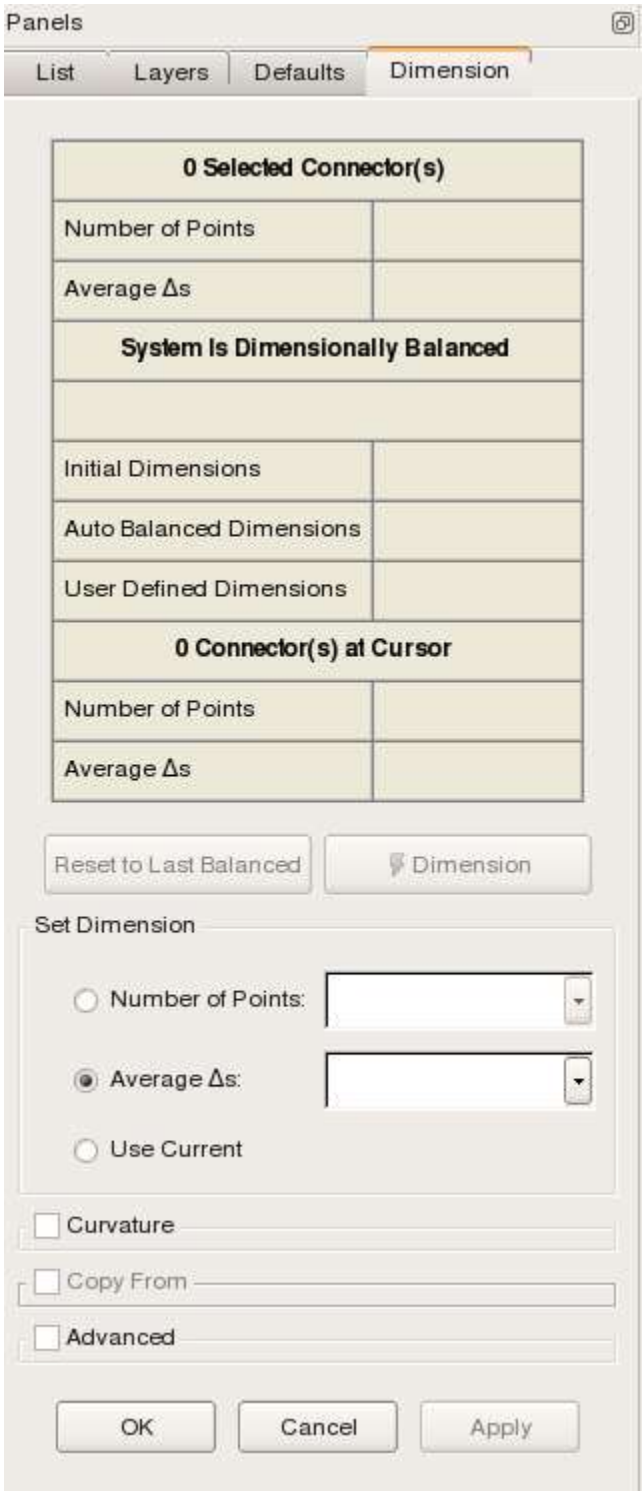


*Figure (IV-9) : Géométrie du domaine*

### IV.3.3 Création du maillage des segments:

Avant de créer les surfaces du domaine, il faut mailler les segments. Nous choisirons un pas d'espace constant égal à 0.01.On utilise la commande ***Grid/Dimension***.

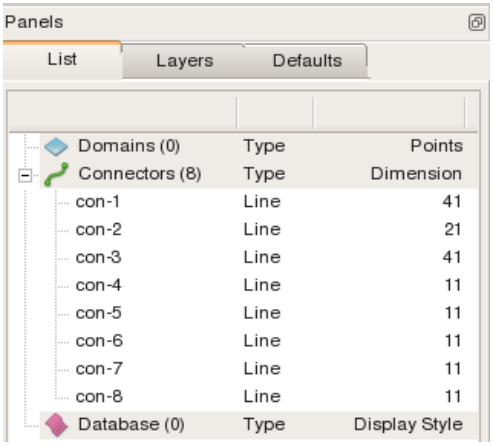



On va mailler tous les segments les uns après les autres.

Tout d'abord on sélectionne le premier segment. On peut soit donner le nombre de points en cliquant sur l'icône ***Number of Points***, soit donner le pas d'espace en cliquant sur l'icône ***AverageΔs***.

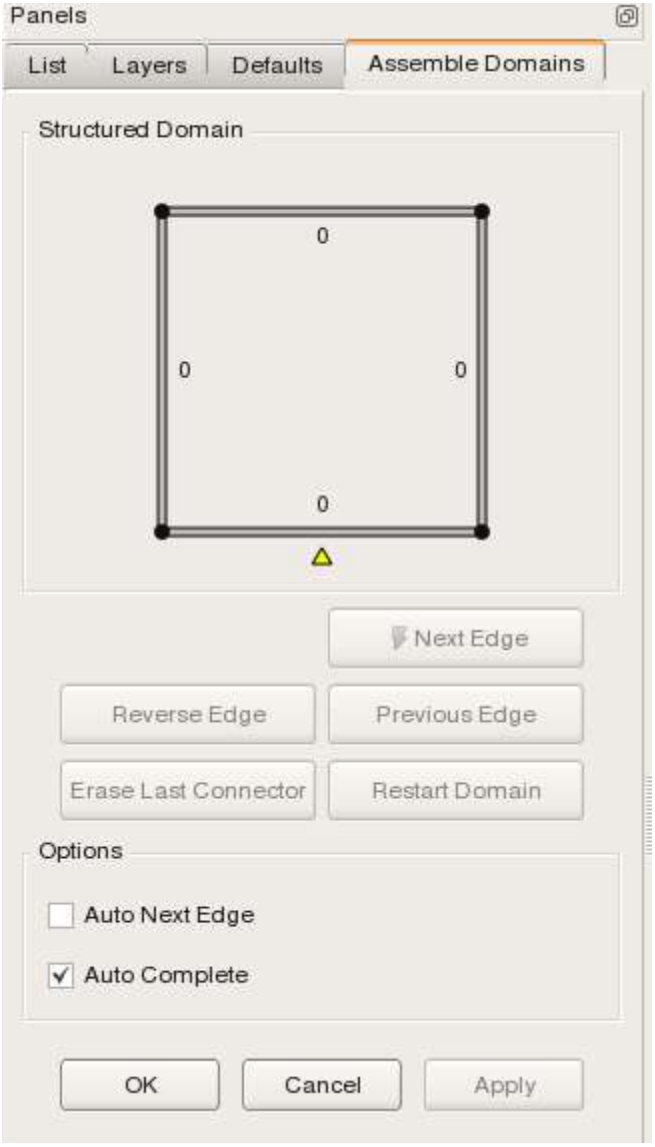
Dans notre cas, on décide de rentrer un pas d'espace égal à 0.01 dans la rubrique ***AverageΔs***. Il faut ensuite cliquer sur l'icône Dimension puis sur ***Apply***. Le segment 1 est alors maillé même si ça ne se voit pas dans la fenêtre graphique. On fait de même pour tous les autres segments. Une fois que tous les segments sont maillés, on peut fermer la fenêtre en cliquant sur **OK.**

***Remarque :*** On peut voir dans le Panel la liste des segments ainsi que combien de nœuds de maillage ils possèdent grâce à l'information contenue dans Points Dimension. Cela permet de vérifier que tous les segments sont bien maillés.



## IV.3.4 Création des surfaces du domaine:

On utilise la commande ***Create/Assemblage Special/Domain***.




Comme le domaine est structuré, il faut que qu'il possède quatre cotés.

Il faut cliquer sur le premier segment constituant le domaine, puis cliquer sur ***NextEdge***, puis sur le second segment, puis à nouveau sur ***NextEdge***, ainsi de suite. Si les options ***Auto complete*** et ***Auto NextEdge*** sont cochées, le logiciel essaie de compléter lui-même le domaine. On fait de même pour tous les domaines. Une fois que tous les domaines sont créés, on peut valider en cliquant sur ***Apply***puis fermer la fenêtre en cliquant sur ***OK.***

***Remarques :***

- Pour définir le rectangle 2, lorsqu'on sélectionne son bord gauche, il faut prendre les deux segments dans le même ***edge***.

- Dans le cas général, avant de vouloir créer un domaine, il faut s'assurer que deux segments opposé sont le même nombre de mailles. Dans le cas contraire, le domaine ne pourra être créé.

On peut voir dans le panel que deux domaines ont été créés. Par défaut les domaines sont nommés Dom-ioù i signifie qu'il s'agit du i-ème domaine.

On peut changer le nom des domaines grâce à la commande ***Attibutes*** présentes dans la barre d'outils surle côté.

Tous les domaines doivent être nommés sous la forme : « i j » où i et j désignent respectivement le bloc et le sous bloc. Par exemple, en monobloc, puisqu'il n'y a qu'un bloc et un seul sous-bloc, le domaine doit être obligatoirement appelé « 1 1 ». Dans le cas présent on a un seul bloc constitué de deux sous-blocs. Les domaines vont donc être désignés par « 1 1 » et « 1 2 » comme on peut le voir sur l'image suivante.

Voici ce que l'on obtient à ce stade de la construction :

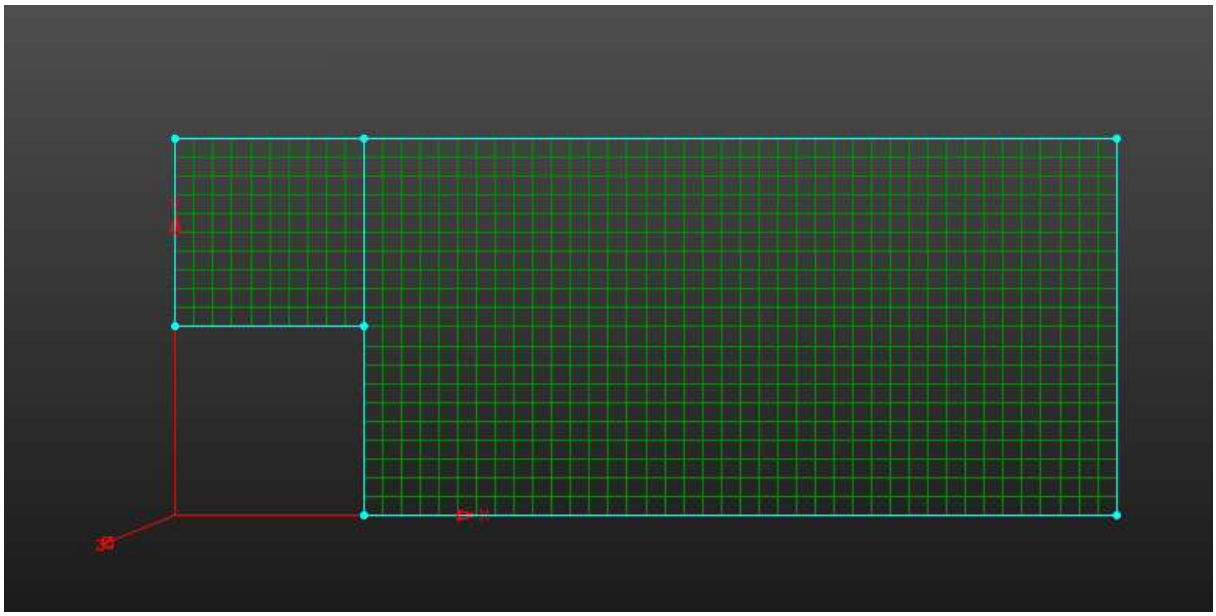


*Figure (IV-10) : Maillage du domaine*

## IV.3.5 Mise en place des conditions aux limites:

Pour affecter les conditions limite, il faut utiliser la commande ***CAE/Set Boundary Conditions***.




Le nombre 7 signifie qu'il y a 7 segments aux limites.

Pour créer une limite, on clique sur New. Cela crée une nouvelle limite. En double cliquant sur ***Name***, onpeut changer le nom de la limite. On va par exemple

l'appeler GAUCHE. Il faut ensuite cliquer sur lesegment désiré, (ici le segment gauche) puis dans le carré sous l'inscription Set. Le # correspondant à cettelimite doit alors passer de 0 à 1. On a alors :

| Sel | # | Name | Type | ID |
|---|---|---|---|---|
| ☐ | 6 | Unspecified | Unspecified | 1 |
| ☐ | 1 | GAUCHE | Unspecified | 2 |

Pour passer à la limite inférieure, on clique à nouveau sur ***New,*** puis deux fois sur ***Name*** pour l'appeler INF. Il faut ensuite sélectionner les trois segments inférieurs en cliquant dessus et gardant le bouton Control appuyé pour le sélectionner tous les 3 puis dans le carré sous l'inscription Set. Le # correspondant à cette limite doit alors passer de 0 à 3.On fait de même pour les limites DROITE et SUP. A la fin.

Une fois que toutes les conditions limites sont affectées, on peut fermer la fenêtre en cliquant sur ***Close***.

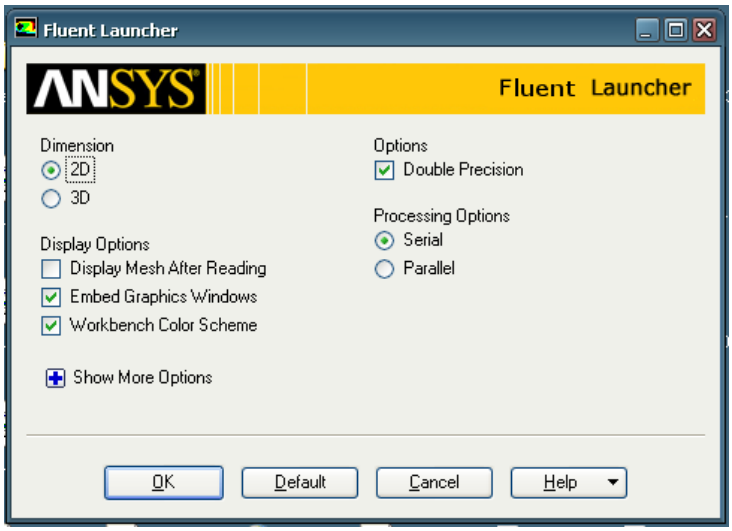
### IV.3.6 Exportation du maillage et sauvegarde de la session:

Pour sauvegarder on utilise la commande ***File/Save as***.

Pour exporter, il faut sélectionner toutes les entités puis utiliser la commande File/Export/CAE. Cela va créer un fichier « ***Nom_fichier.cas*** ».

## IV.4 Etapes de traitement d'un cas dans Fluent [17][18]:

Lancez FLUENT. Vérifiez que "double précision" est sélectionnée dans ***FLUENT Launcher***.




*Figure( IV-11) : Fenêtre de Fluent Launcher*

L'écran suivant sera la principale fenêtre de FLUENT.

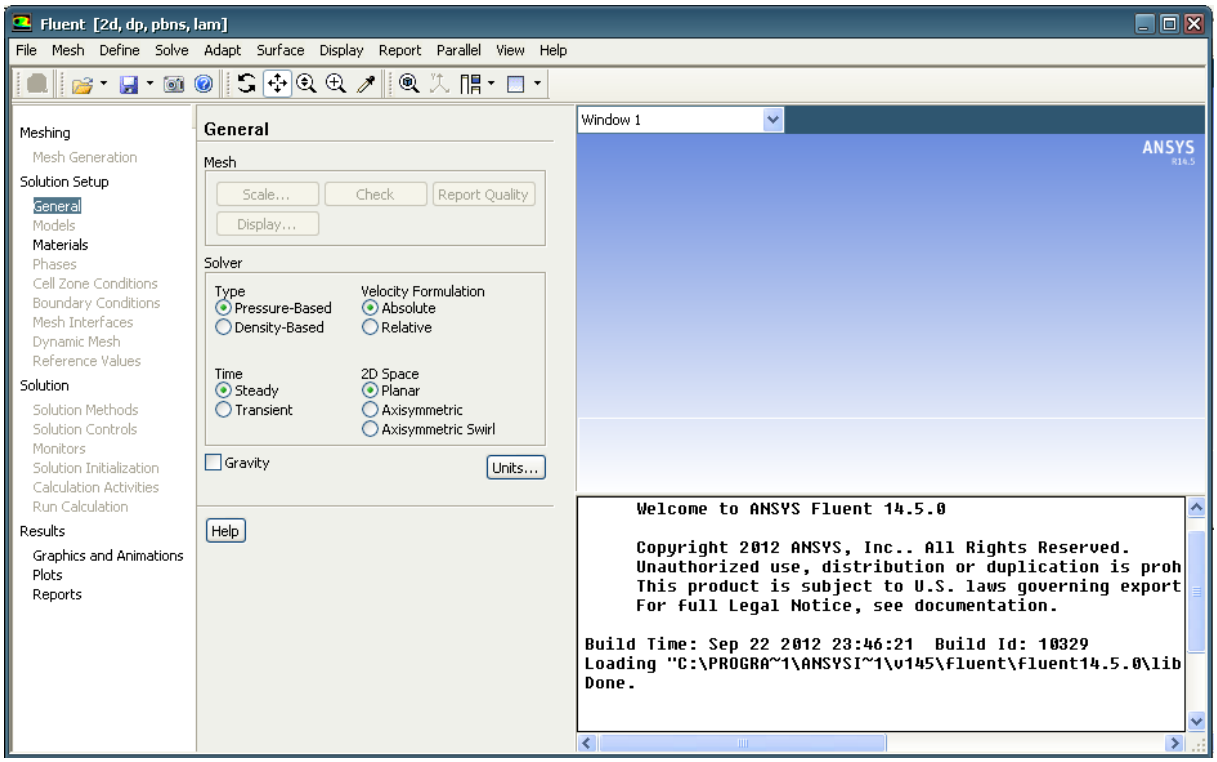



*Figure (IV-12) : Fenêtre principale de Fluent*

Pour lancer un cas de simulation, allant à ***File/Read/cas*** ou on clique directement sur l'icône comme dans la figure suivante.

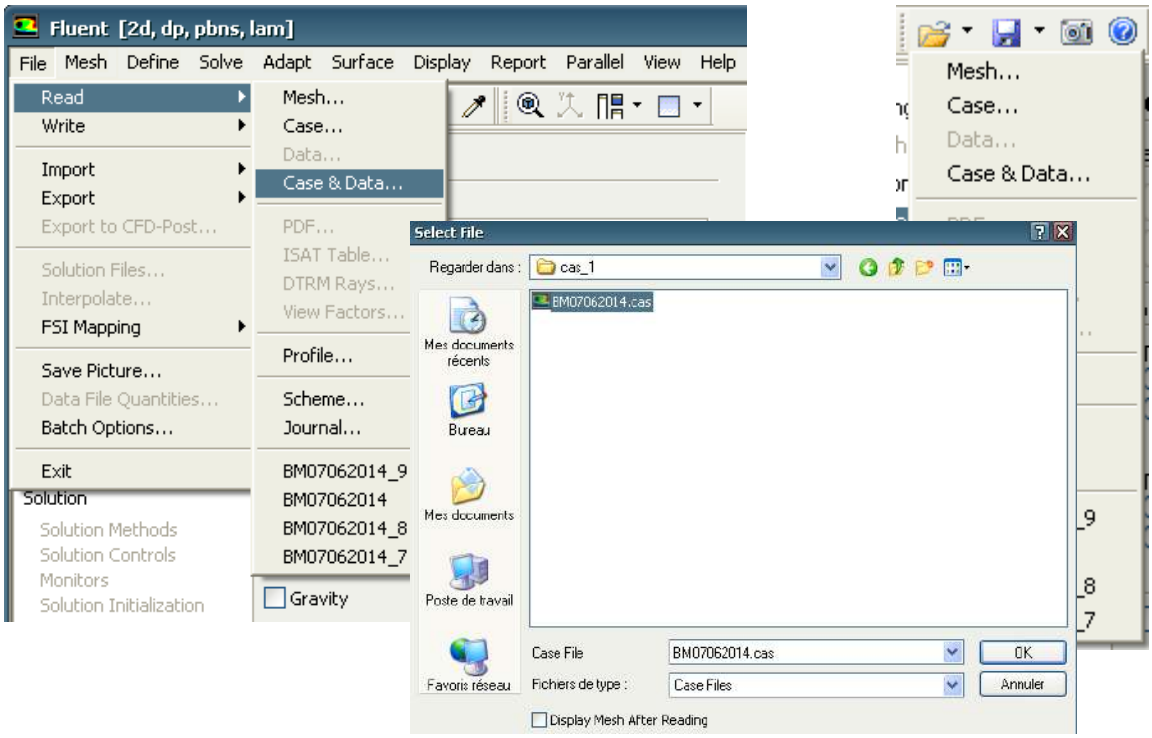
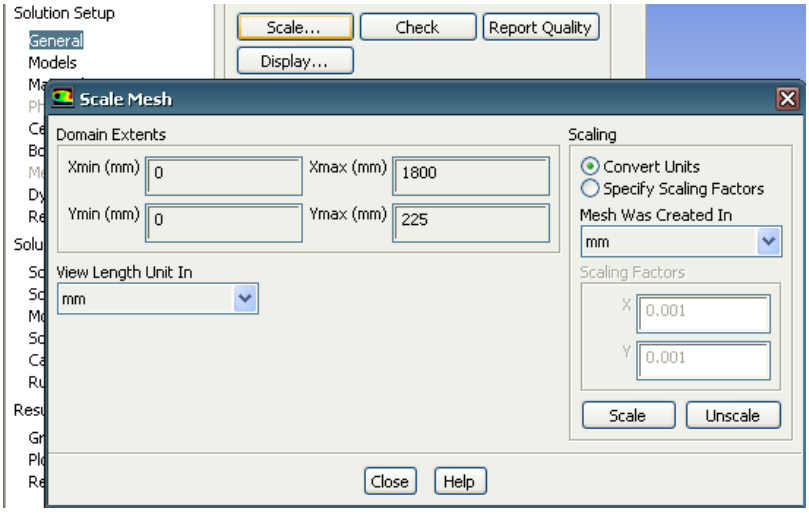


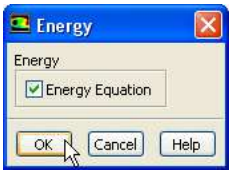

*Figure (IV-13) :Menu de lancement d'un cas Fluent*

Après lecture de cas, on doit passer au paramétrage de calcul. On commence par la redéfinition de l'échelle dans ***General/Scale***, Comme dans la figure suivante.




*Figure(IV-14) : Redéfinition de l'échelle de la géométrie*

Passant aux choix des paramètres de calcul en cliquant sur la commande ***Model***




1- Activant l'énergie en cochant sa case.

2- Choisissant le modèle de turbulence en cliquant sur ***Viscous***. Dans notre cas c'est la **K-ε.**

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

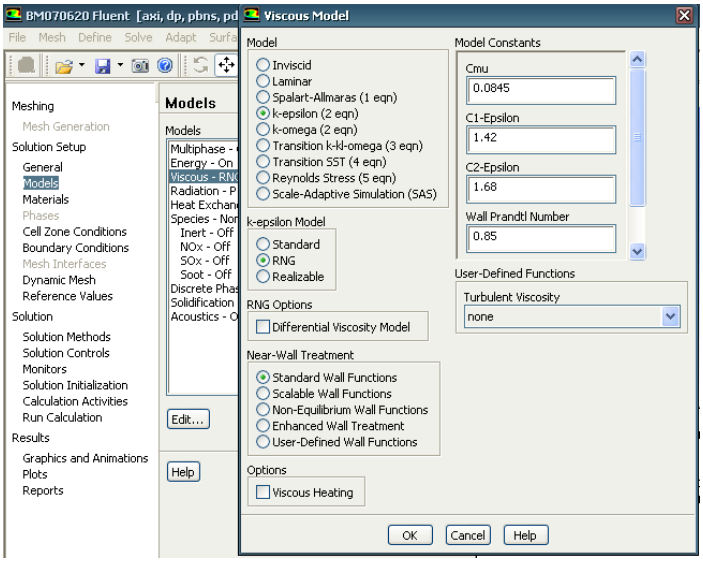



*Figure (IV-15) : Menu de choix de la turbulence*

3- Définissant le modèle de combustion, dans notre étude c'est le modèle non-prémélangé. Pour ce faire, cliquant sur ***Model/Spacies/Non-Premixed combustion***. Comme dans la figure suivante :

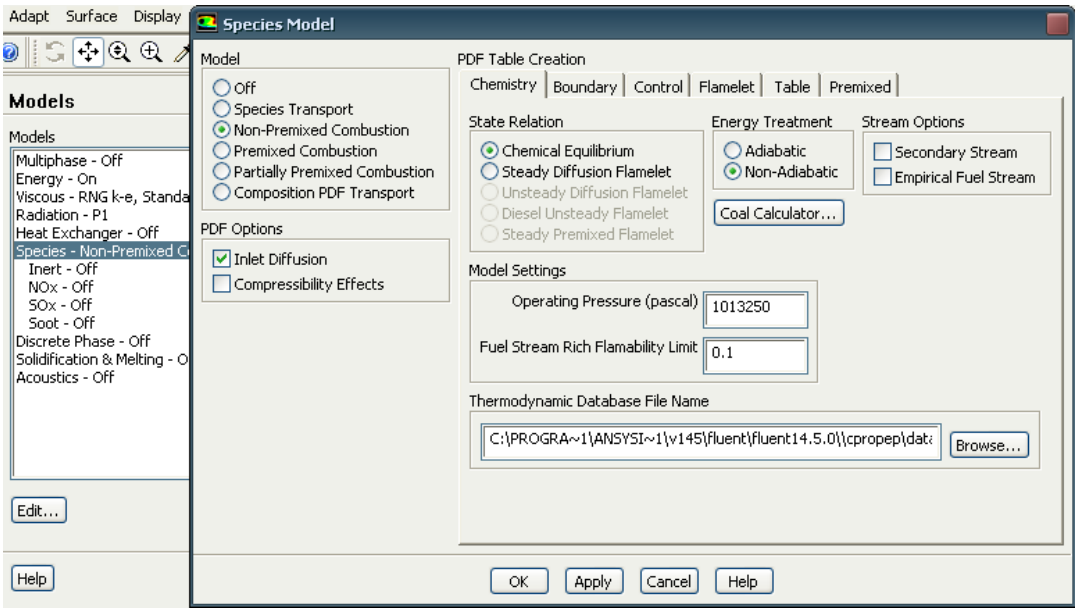


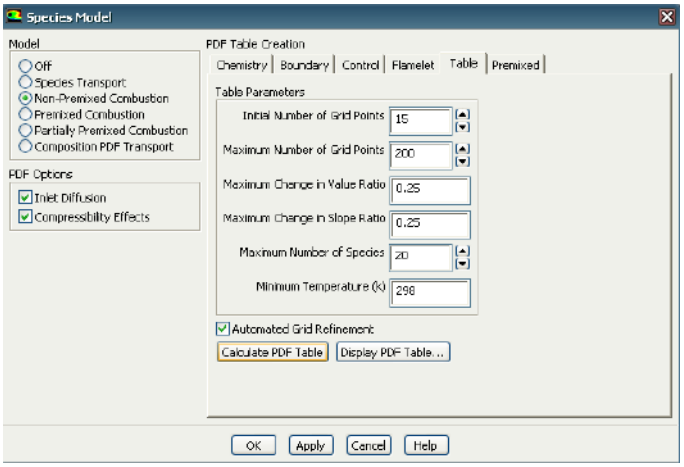

*Figure (IV-16) : Menu de paramétrage de modèle de combustion*

Dans le sous-menu ***Boundary*** définissant les espèces qui entrent dans la combustion.

| **Speices** | **fuel** | **Oxid (cas de l'air)** | **Oxid (cas Dioxygène)** |
|---|---|---|---|
| H2 | 1 | 0 | 0 |
| O2 | 0 | 0.231 | 1 |
| N2 | 0 | 0.767 | 0 |

*Table VI-1 : Espèces de combustion*

Dans le sous-menu ***Table***, figure ci-après. Une table PDF doit être créée est enregistrée cette dernière est utilisée par Fluent.

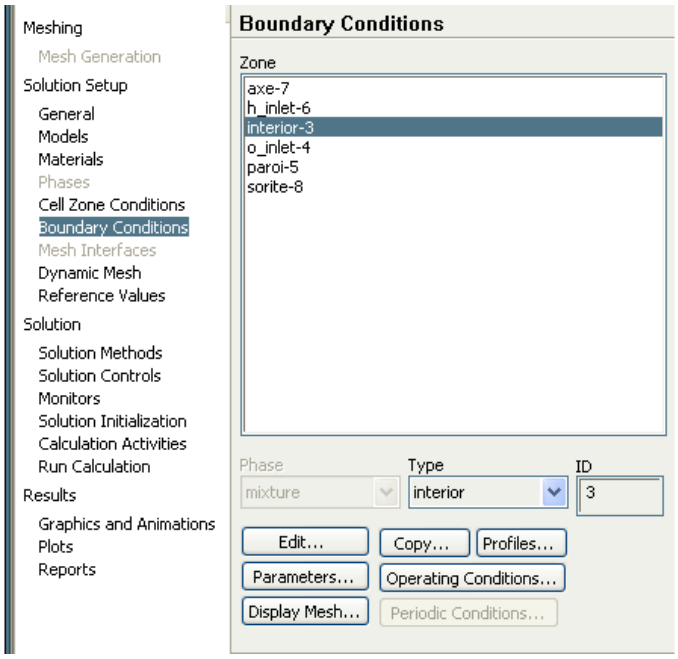


Le fichier PDF (Probability Density Function) généré par fluent, il s'agit une table qui contient une fraction massique ou molaire des espèces de combustion dans le domaine étudie.

4- Passant au définition des conditions aux limites. Cliquant sur la commande ***Boundary Conditions***. Mais, avant ça, il est recommandé de choisir d'abord la valeur de la pression de référence ***Operating conditions***.

En effet, Fluent effectue tous les calculs, avec une pression appelée gauge pressure et ce afin d'éviter les erreurs d'ordre numérique lors du calcul pour des écoulements à faible nombre de mach. La relation liant la pression absolue à la ***gauge pressure.***

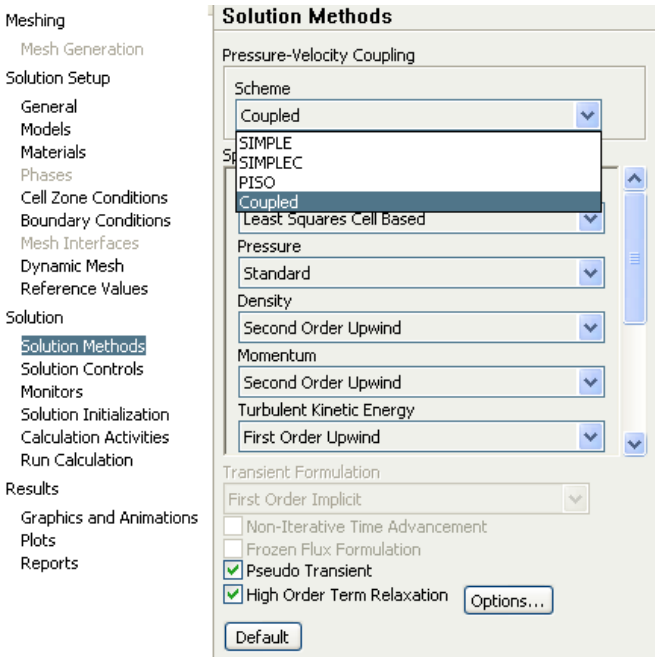
En suite il faut fixé les conditions aux limites.




*Figure( IV-17) : Menu d'introduction des conditions aux limites*

## IV.5 Lancement de calcul dans Fluent :

Avant de lancer le calcul, nous avons la possibilité de modifier quelques paramètres qui sont prédéfini, cela, pour avoir une convergence plus rapide.




*Figure( IV-18) : Menu de choix de méthode de résolution*

On peut aussi controler la solution en intervenant sur le menu suivant :

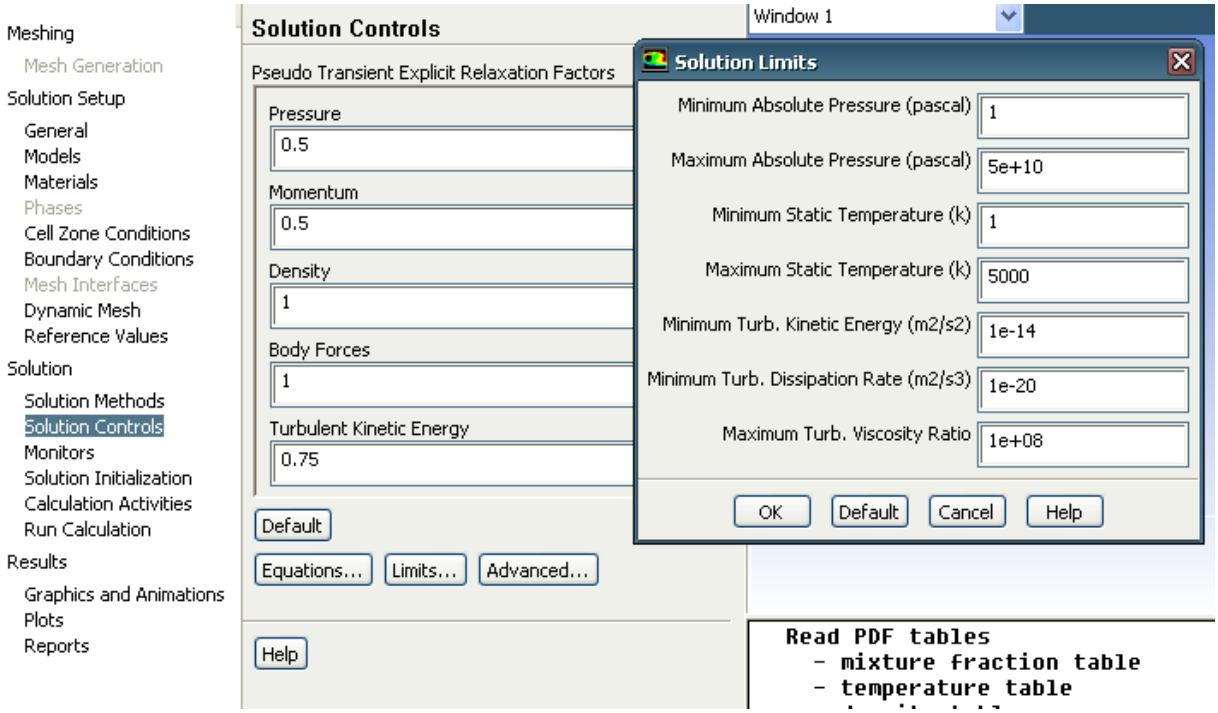



*Figure (IV-19) : Menu de contrôle de solution*

En passe en suite à l'initialisation des paramêtres, on a deux principeaux choix.

- Intialisation hybride.
- Initialisation Standard.

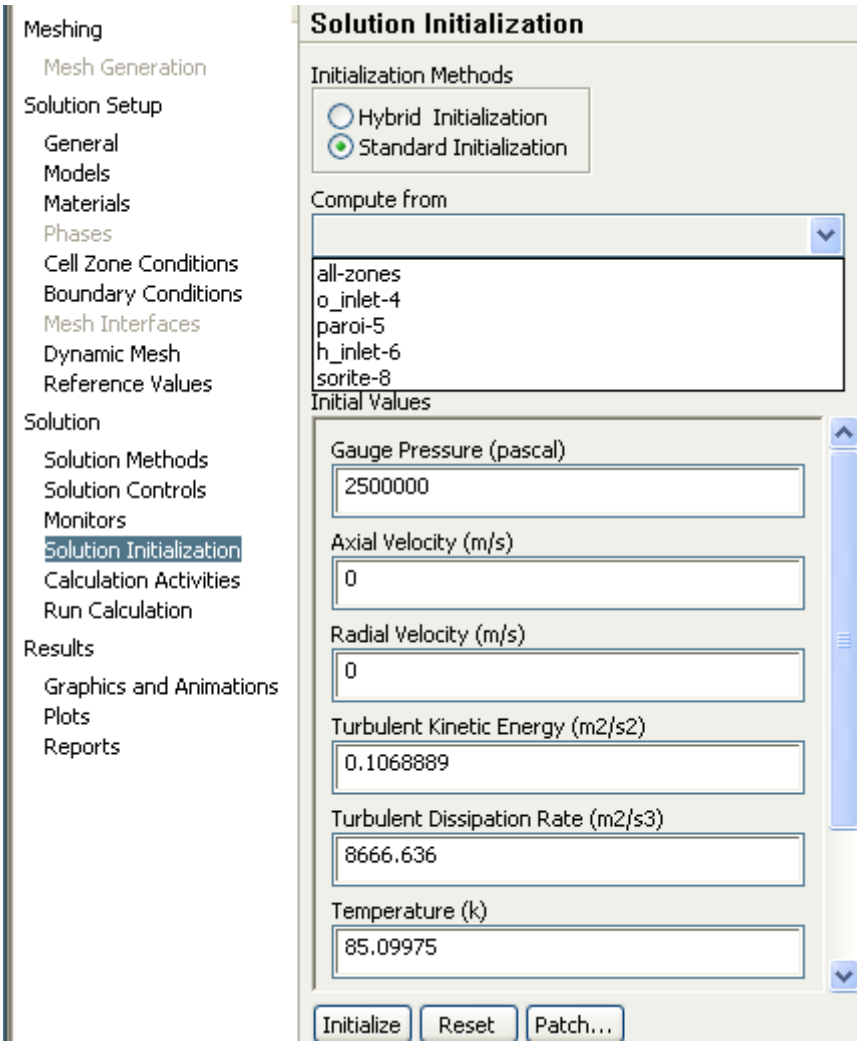
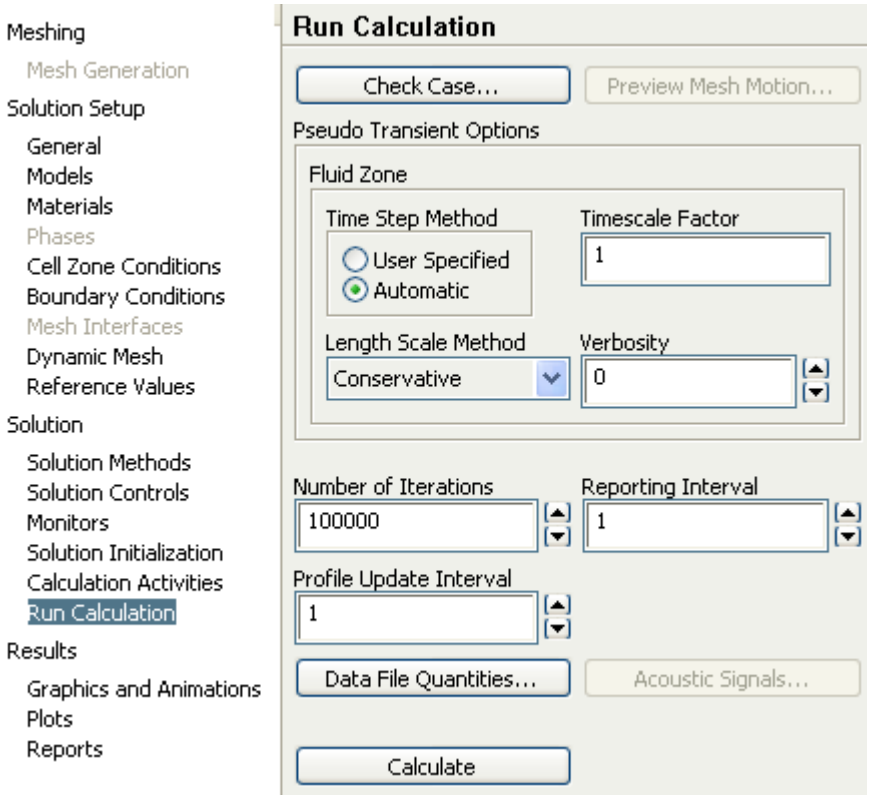



*Figure (IV-20) : Menu d'initialisation*

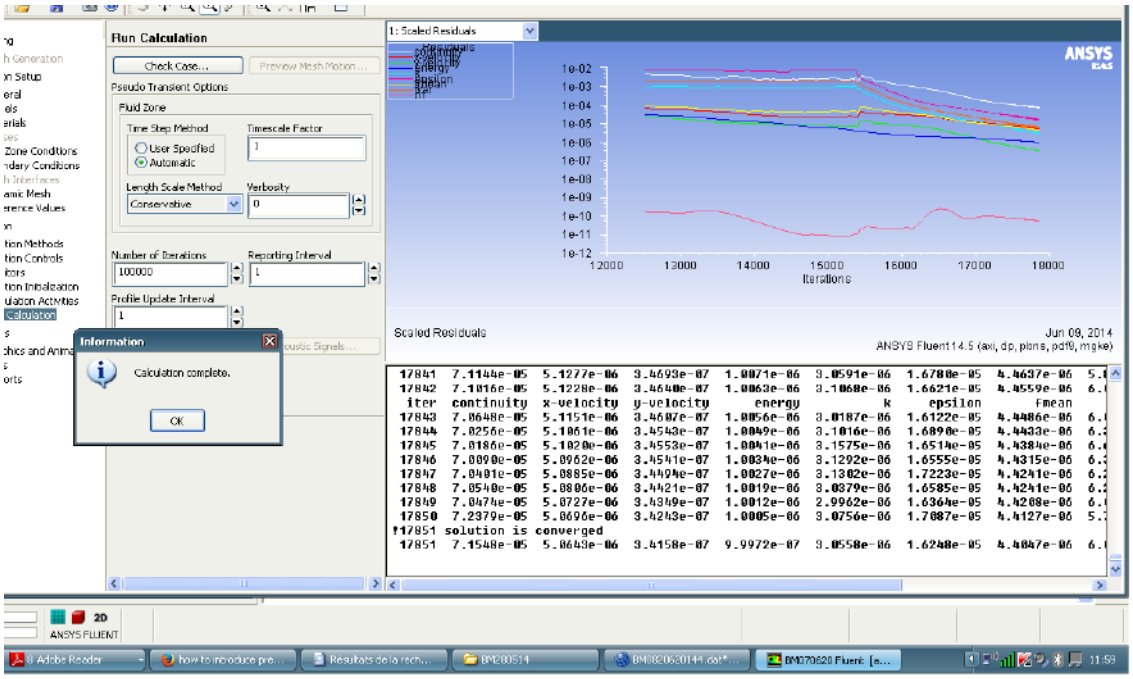
Dans le cas d'initialisation standard, on a le choix, en peut initialisé toutes les zones comme en peut initialisé une seule zone.

En suite en cliquant sur la commande ***Run Calculation*** pour executer le calcul. Dans cette étape on doit spécifier le nombre d'itérations.( cf. figure ci-après).




*Figure( IV-21) : Menu de calcul*

A la fin de calcul on obtient la fenêtre suivante :




*Figure(IV-22) : Fenêtre de fin d'exécution*

# CHAPITRE V

*Résultats et discussions*

## V.1 Introduction :

Dans cette partie nous proposons de valider la méthode de volumes finis pour le cas type d'écoulements turbulents réactifs que nous serons amenés à traiter en l'occurrence, un écoulement à deux jets coaxiaux dans un bruleur axisymétrique.

L'écoulement de deux jets coaxiaux en atmosphère confinée est une représentation idéalisée d'une flamme de diffusion dans un bruleur axisymétrique. Les jets ont des vitesses d'injection différentes et leur mélange est critique pour l'efficacité du bruleur. La couche de cisaillement générée par la différence des vitesses des jets jumelés à la turbulence de l'écoulement contribuent à intensifier l'inter-diffusion du combustible et du comburant. Ceci conduit à une augmentation considérable de la surface de contact entre les réactifs, favorisant ainsi l'inter-diffusion moléculaire qui est la condition de la réaction.

La figure (V.1) représente la géométrie utilisée de deux jets coaxiaux isothermes. L'oxygène est injecté à travers deuxconduites annulaire et centrale à respectivement u, = 1m/s pour le comburant et u=296m/s pour le combustible qui est $H_2$dansune enceinte axisymétrique de diamètre D=500 mm.

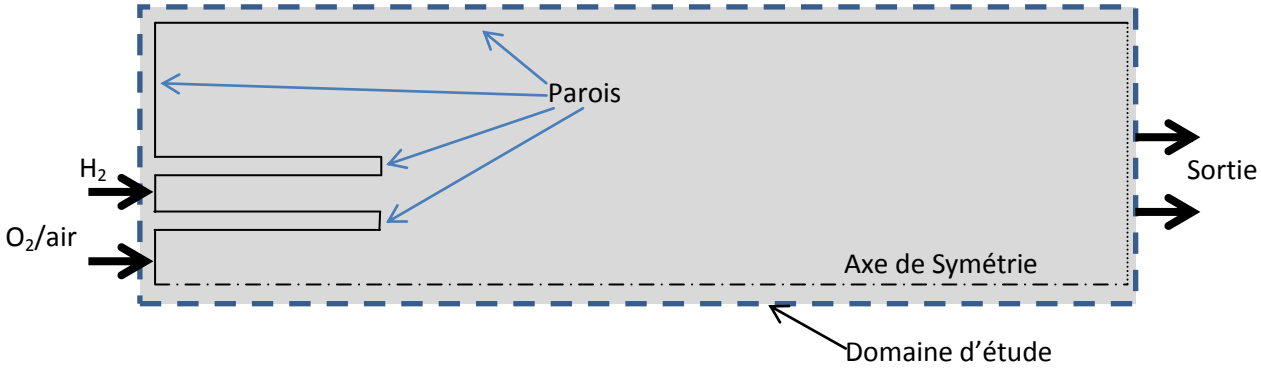



*Figure (V-1) : Schéma de la chambre de combustion*

## V.2 Configuration et choix de modèles :

Dans cette étude, nous avons testé plusieurs cas de figure tel que, la combustion de l'hydrogène avec de l'air ou avec l'oxygène à des différentes pressions et températures comme on a testé aussi plusieurs types de chambre de combustion.

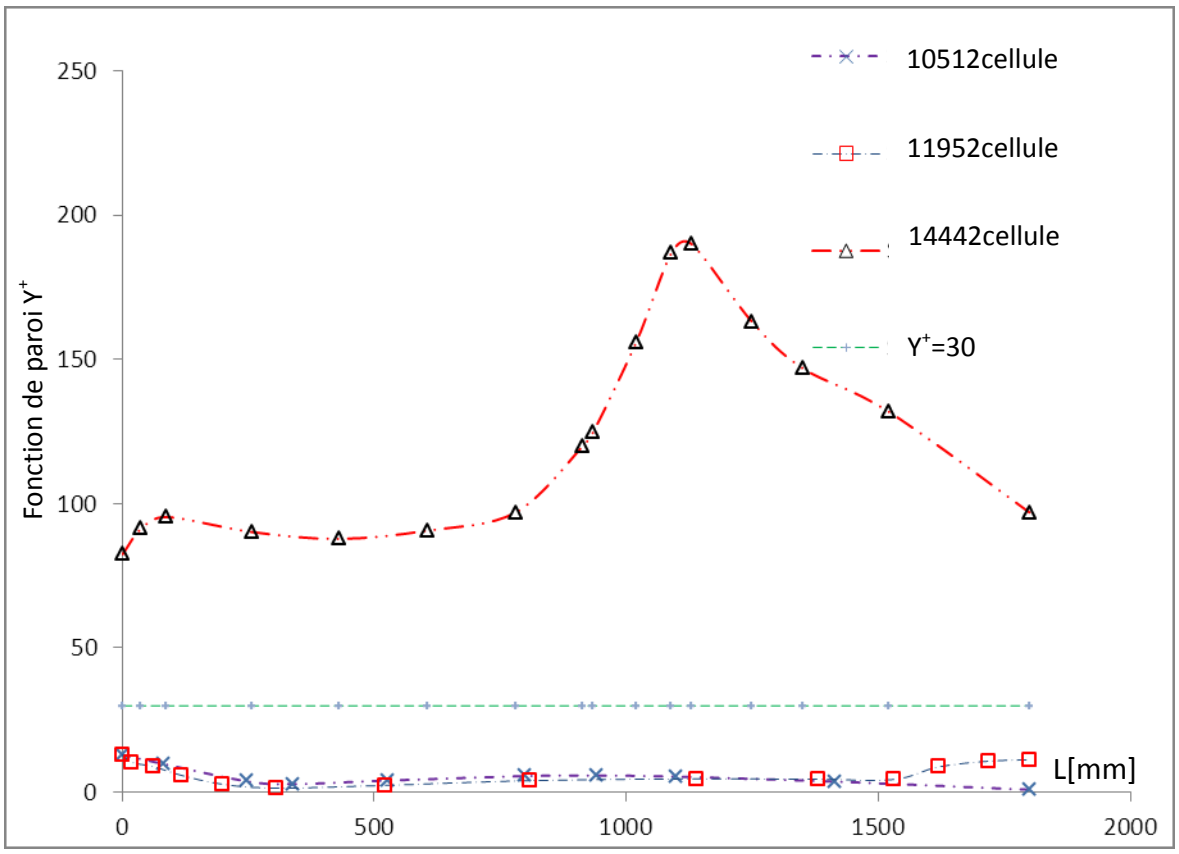
## V.3 Test de l'effet de maillage :

La majorité du temps passé sur un projet de simulation numérique de dynamique des fluides (CFD) est généralement consacrée à générer avec succès un maillage de la géométrie de domaine, qui permet à un compromis entre la précision souhaitée et le coût de la solution. Ce processus coûteux en temps est considéré comme un goulot d'étranglement dans le processus d'analyse.

Le mode opératoire préféré pour la détermination du maillage le plus précis est de réaliser des séries de tests sur différentes tailles et configurations maille jusqu'à la solution numérique converge, dans ce qu'on appelle le test d'indépendance de la grille. Évidemment, cela nécessite beaucoup de temps et d'effort de calcul. Les écoulements turbulents sont sensiblement affectés par la présence de murs, où les régions de viscosité touchés ont des gradients dans les variables de la solution.Il a été proposé par Gerasimov dans son séminaire intitulé par ***Modeling Turbulent Flows using Fluent from ANSYS,*** où il a recommandé une stratégie de calcul de y+ près de parois. Ceci aide à choisir le traitement le plus approprié proche à cette dernière et le modèle de turbulence correspondant sur la base de y+[21].

Afin de voir l'effet de maillage sur les différents paramètres, nous avons utilisé un maillage structuré. On a testé trois maillages : 10512, 11952 et 14442cellules. Pour chaque maillage, nous avons tracé les graphes de $Y^+$ près de la paroi et les variations de température statique. La figure (V-2) illustre les variations de $Y^+$ pour chaque maillage. Pour le maillage à14442 nœuds, $Y^+ > 30$, pour les deux autres maillages Y+ ne dépasse pas 13. Par la suite, nous avons adopté le maillage à **14442 cellules**.

La figure (V-3) présente les variations de la température en fonction des différents maillages.




*Figure( V-2) : Variation de Y⁺en fonction de maillage*

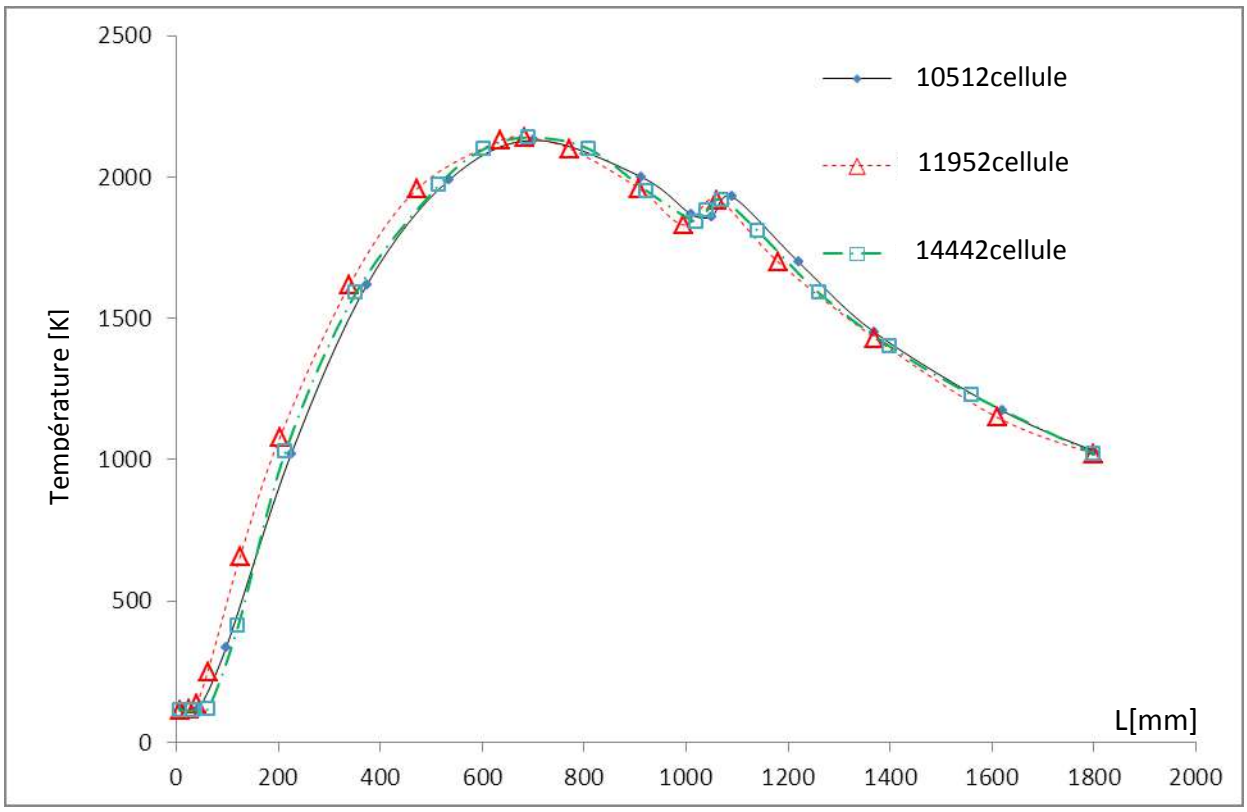



*Figure (V-3) : Variation de T en fonction du maillage*

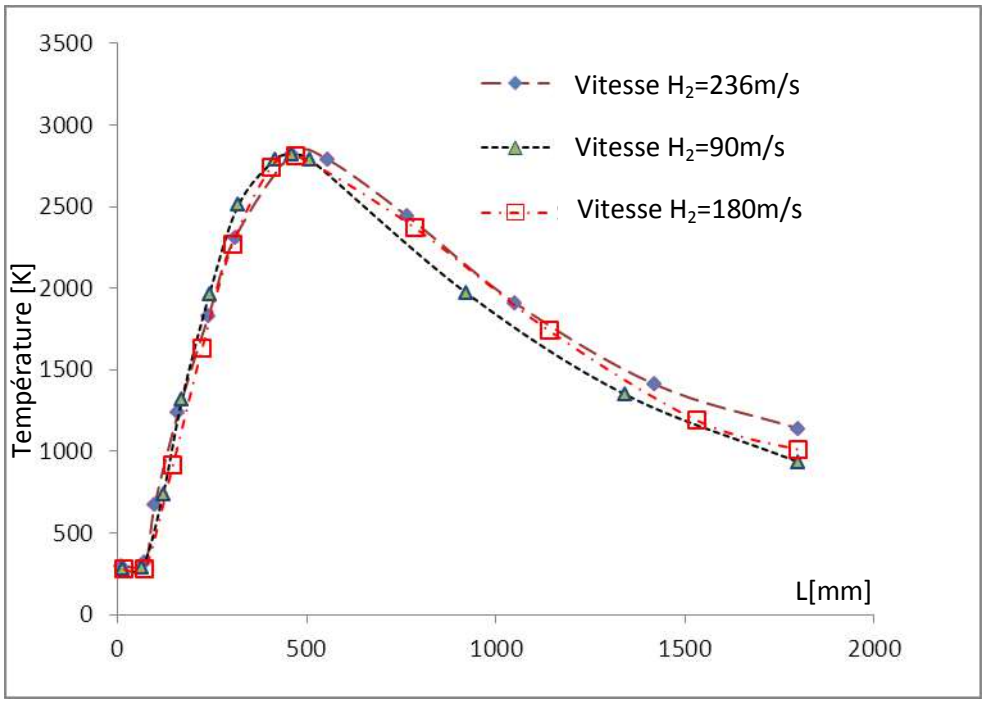
## V.4 Discussions des résultats:

### V.4.1 Etudes d'influence des conditions initiales:

### V.4.1.A Champs de température en fonction de vitesse de $H_2$ :

| Variable | Désignation | Valeur |
|---|---|---|
| Comburant | Oxygène | Température=85K<br>Pression=101325Pa |
| Fuel | Hydrogène | Température=287K<br>Pression=101325Pa |
| Espèces PDF: $H_2$, $O_2$, $H_2O$, OH, $H_2O_2$, H; $O_3$, $HO_2$, O. | Couplage vitesse-pression | Simple |
| | Pression | Standard |
| | Modèle de turbulence | RNG K-ε |

Les vitesses d'entrée du fuel sont respectivement $VH_2$=236m/s et $VH_2$=90m/s, ensuite nous allons tracer les graphs pour les deux vitesses. Le graph dans la figure (V-4) montre que la température augmente en fonction de la vitesse d'entrée de $H_2$. Aussi, la longueur de flamme est influencée par la variation de vitesse.

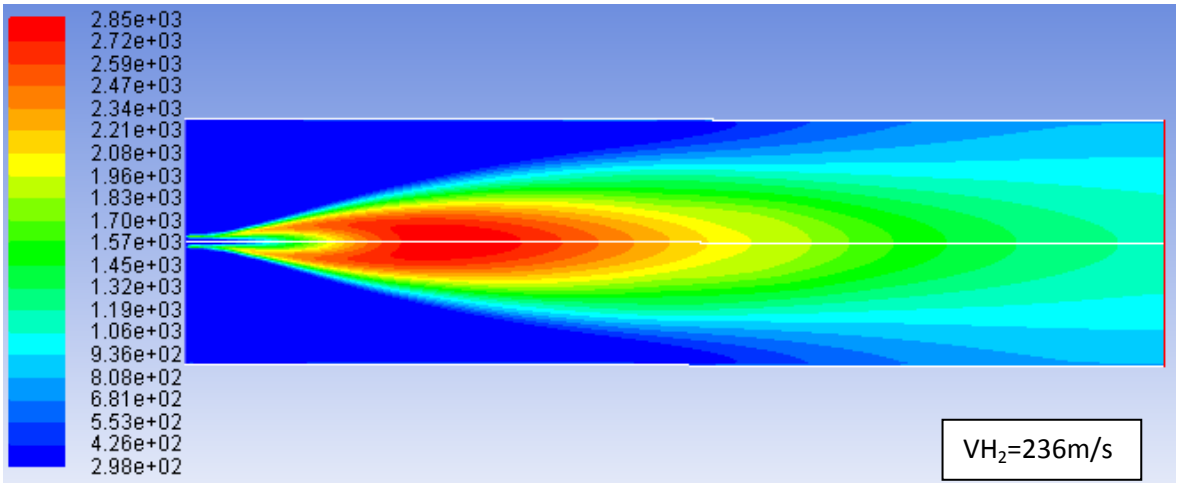


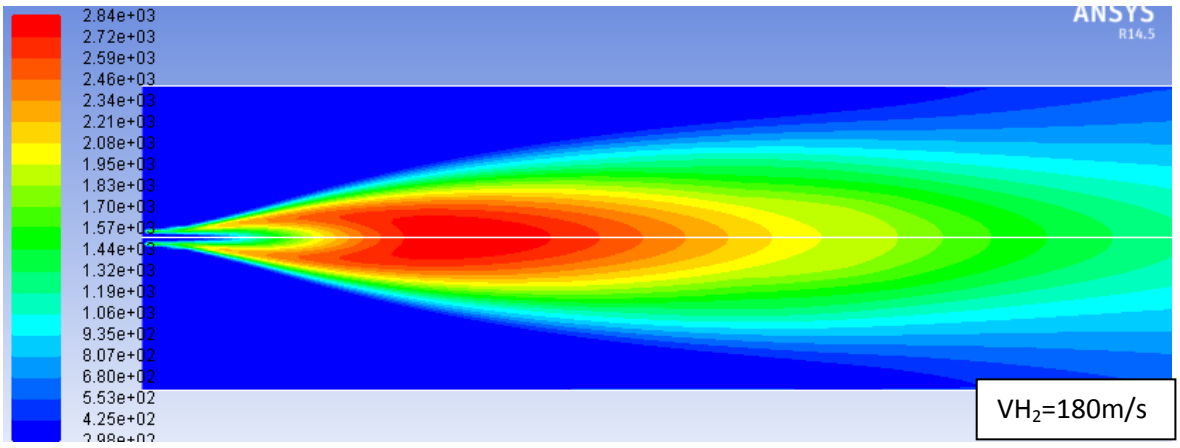

*Figure(V-4): variation de la T sur l'axe central*

Pour les deux cas, on constate qu'après 10mm de la sortie des injecteurs, il y a une variation très rapide de la température. Les valeurs maximales enregistrées est 2848,123K dans x=480mm pour $VH_2$=236m/s. Pour la même valeur de x, la température enregistrée pour $VH_2$=90m/s est de 2839.509K.

On remarque aussi, que : la courbe pour $VH_2$=236m/s est située au-dessus de celle de $VH_2$=90m/s, cela veut dire que le volume de flamme pour $VH_2$=236m/s est légèrement grand par rapport à celui pour $VH_2$=90m/s. Les deux graphes se rapprochent l'un de autre jusqu'à x=250mm, le point d'intersection.

Dans ce point, le volume des deux flammes est le même. Au-delà de ce point, le graphe de $VH_2$=90m/s est au-dessus ; son volume de flamme est légèrement grand par rapport à celui de$VH_2$=236m/s mais, au-delà de x=480mm, la flamme de $VH_2$=236m/s est plus importante. Les figures ci-après (V.5) illustrent les formes de flammes pour les deux cas.



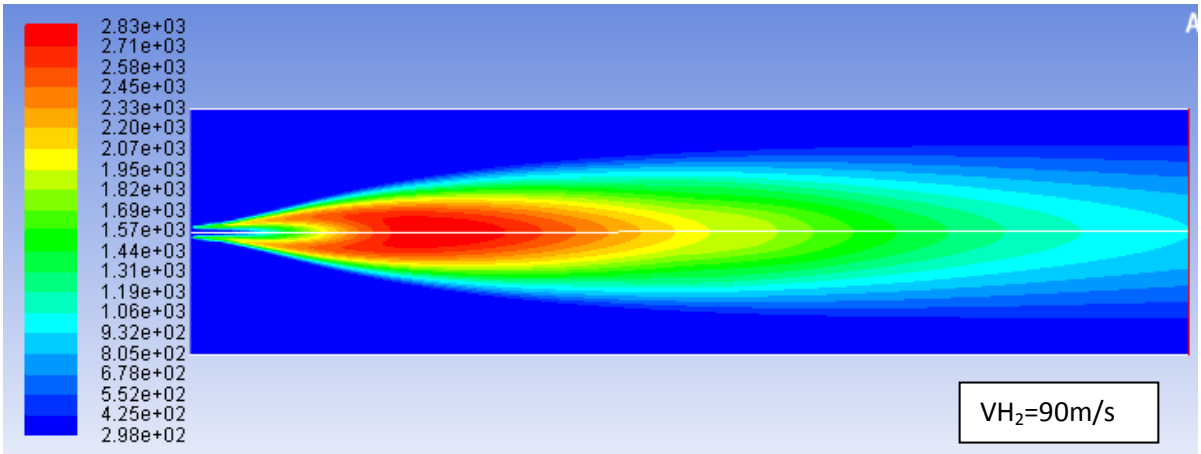



*Figure (V-5) : Champs de la Température*

## V.4.1.B Consommation de $H_2$ en fonction de vitesse de $H_2$ :

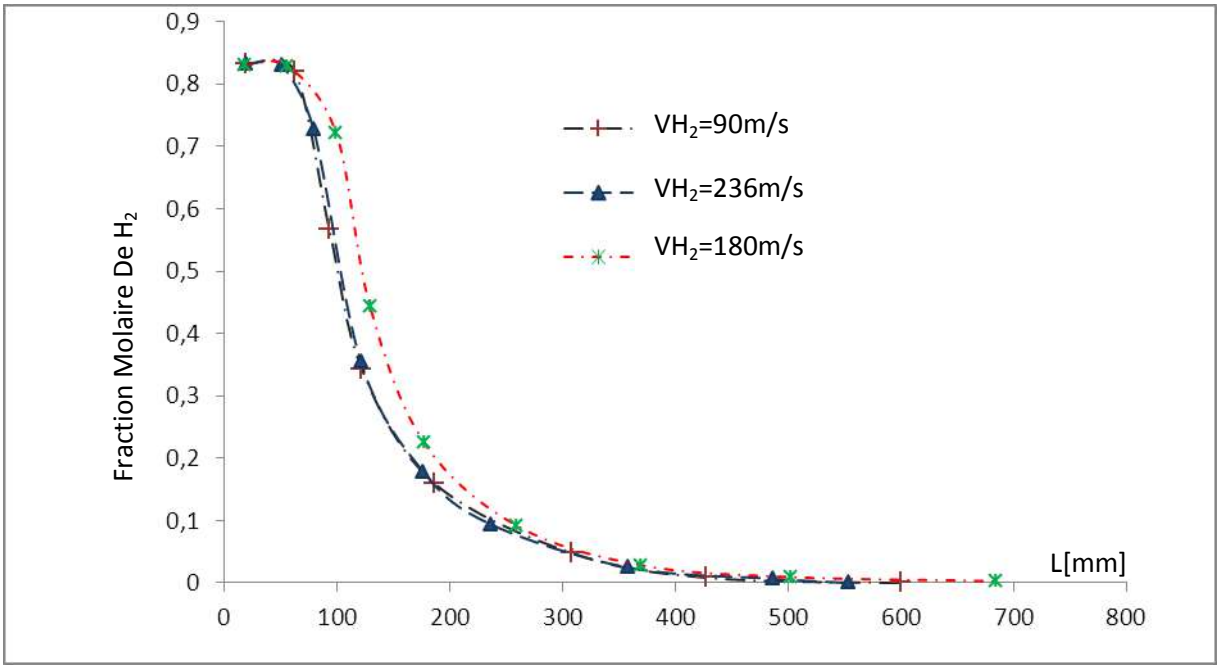



*Figure (V-6) : variation de la consommation de $H_2$ sur l'axe central*

En examinant les deux courbes de la figure (V-6), on constate que la vitesse de consommation de l'hydrogène est très rapide pour les deux cas. L'hydrogène disparait complètement au-delà de x=600mm. On note que le graphe de $VH_2$=90m/s est relativement aigu ceci explique que la flamme s'accroche plus proche des injecteurs par rapport au cas où $VH_2$=236m/s (soufflage de la flamme).

## V.4.2.A Champs de température en fonction de température d'entrée de $O_2$ :

| Variable | Désignation | Valeur |
|---|---|---|
| Comburant | Oxygène | vitesse=1m/s<br>Pression=101325Pa |
| Fuel | Hydrogène | Vitesse=236m/s<br>Pression=101325Pa |
| | Couplage vitesse-pression | Simple |
| | Pression | Standard |
| | Modèle de turbulence | RNG K-ε |

Lestempératures d'entrée de l'oxygène sont respectivement $TO_2$=85K et $TO_2$=300K.La figure (V-7) montre que l'effet de la température d'entrée de l'oxygène est négligeable malgré que la variation de cette température soit importante.

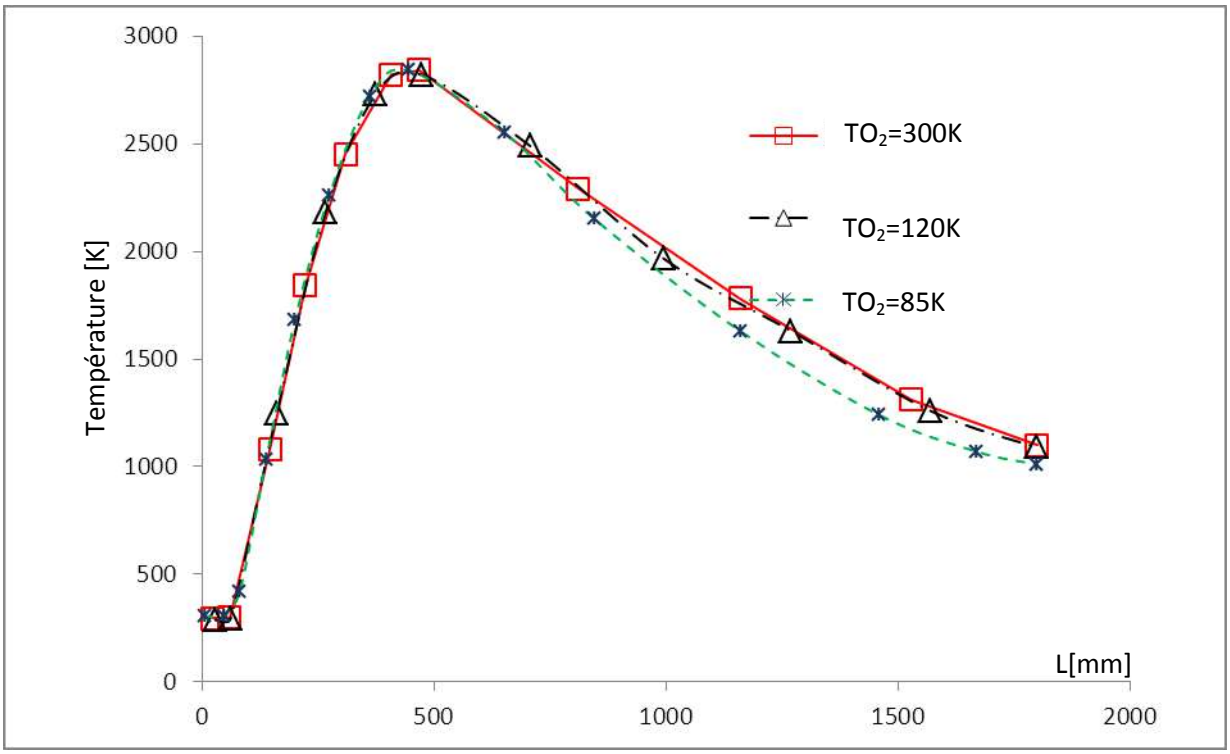



*Figure (V-7) : Effet de la température d'entrée de $O_2$*

Par visualisation des champs de température de combustion (figure (V-8)) pour les deux cas, on constate que les formes des températures sont les mêmes. Mais à la sortie du bruleur, la température de sortie pour $TO_2$=85K est plus importante que celle de $TO_2$=236K. Idem pour la température maximale.

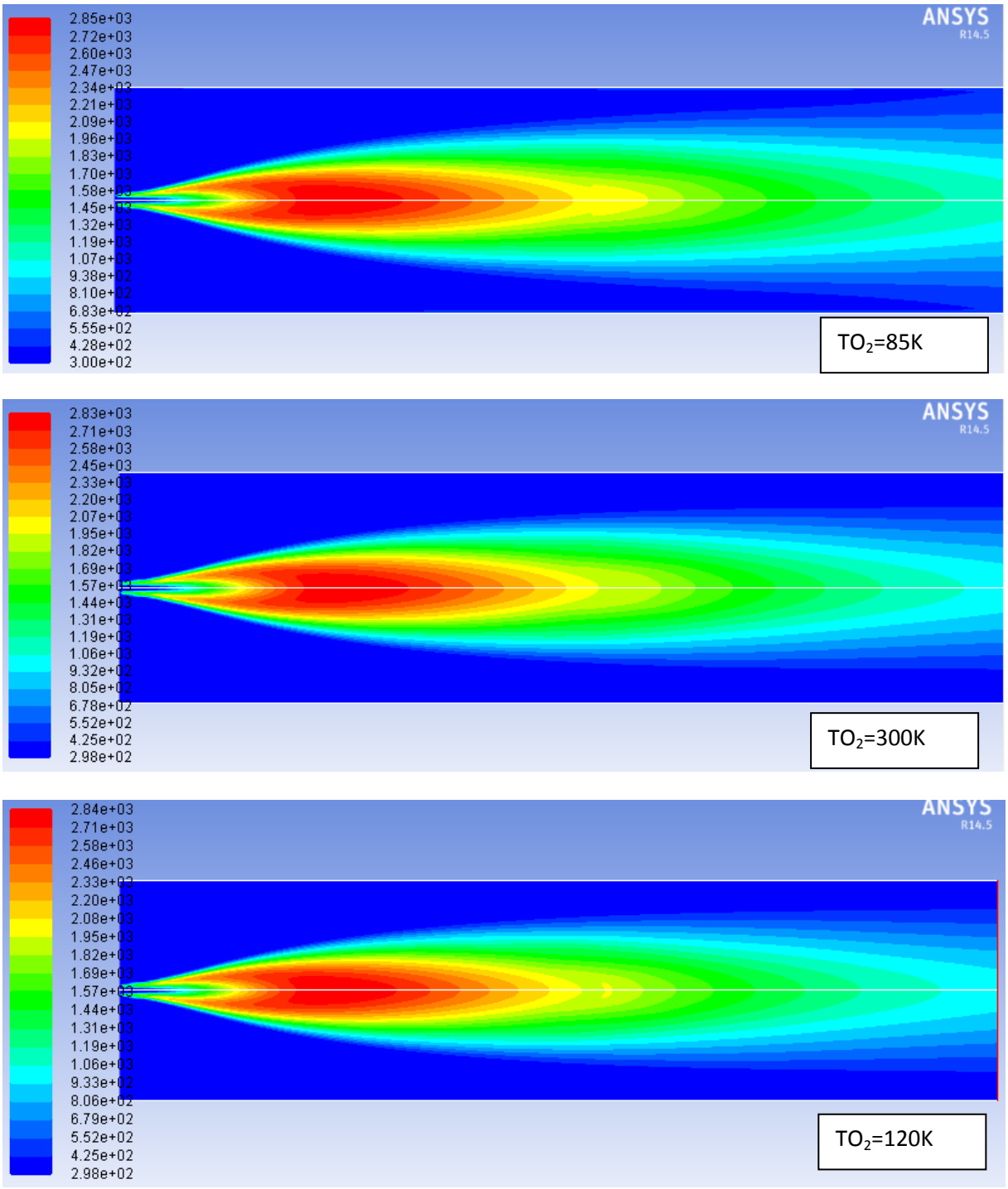
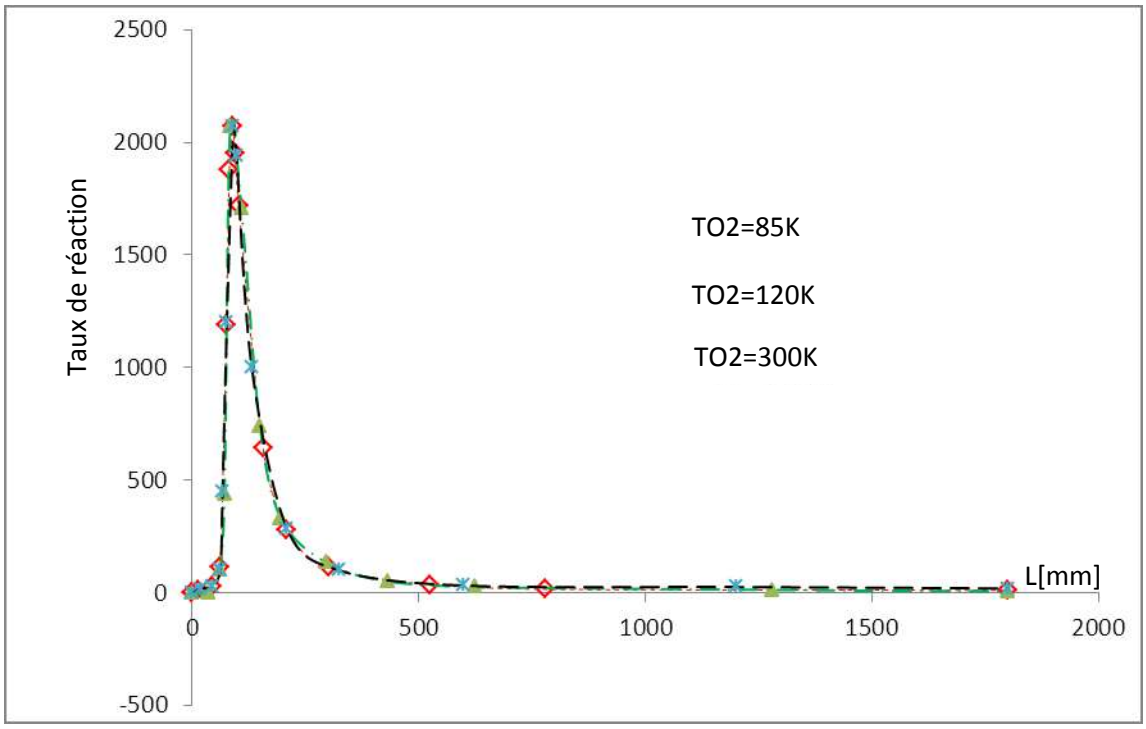



*Figure (V-8) : Champs de température influencé par la température d'entrée de $O_2$*

### V.4.2.B Variation du taux de réaction en fonction de la température de $O_2$ :

La figure (V.9) illustre le taux de réaction en fonction de la température de l'oxygène. Les graphes sont tracés respectivement pour les températures de 85K, 120K et 300K.

En examinant les graphes,on constate que la variation du taux de réaction est négligeable malgré que les variations en températures est importantes.




*Figure( V-9) : Taux de réaction sur l'axe central*

### V.4.2.C Formation de OH en fonction de la température de $O_2$ :

La figure (V-10) illustre la variation de la masse molaire de OH qui traduit la formation de ce dernier. On remarque que pour la température de l'oxygène de 120K, la formation de OH est plus importante comme elle est dans une position d'abscisse plus avancée par rapport aux températures de 85k et 300K.

On peut dire alors quela température 120K pour l'oxygène sont des conditions idéales pour une intense combustion.

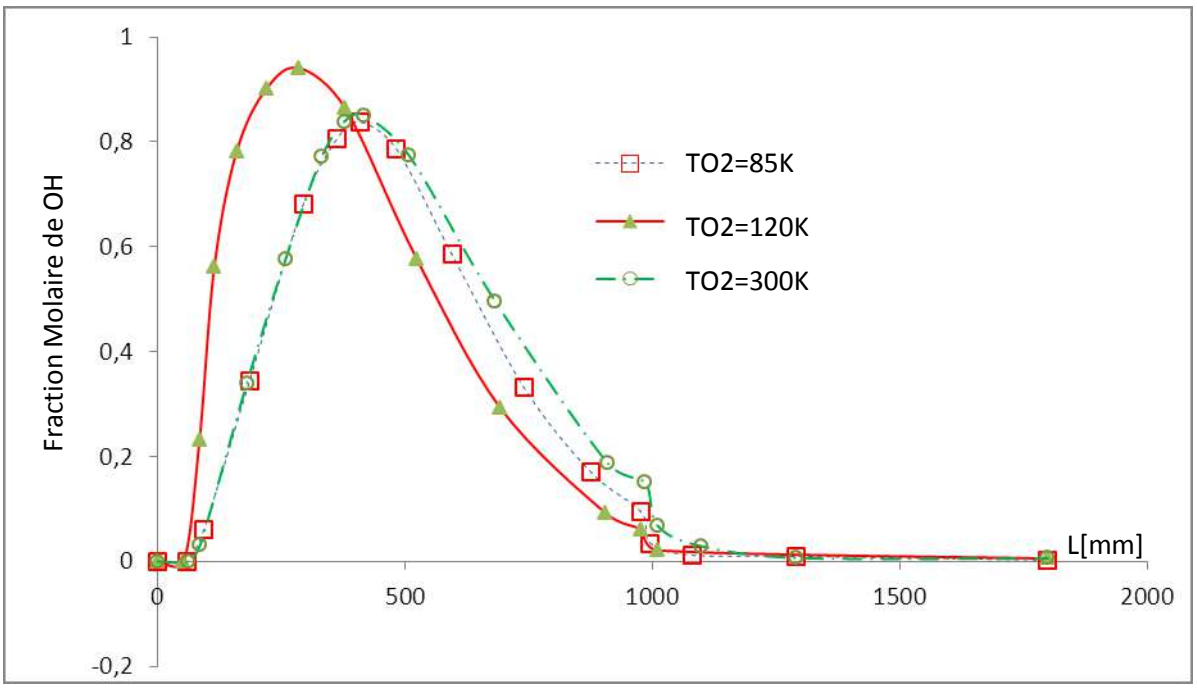



*Figure (V-10) : Evolution de la formation de OH*

## V.4.2.D Consommation de $H_2$ :

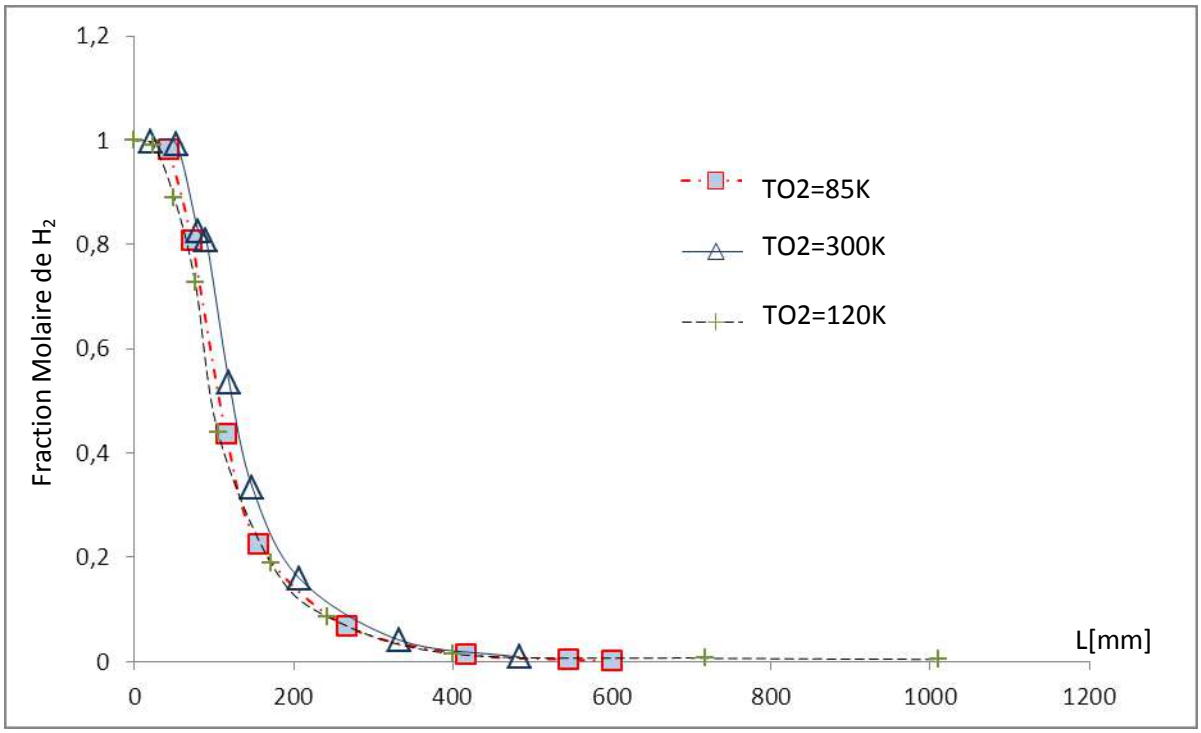



*Figure (V-11) : Evolution de consommation de $H_2$*

D'après les graphes de la figure (V-11), la consommation de $H_2$ n'est pas influencée par la température d'entrée de l'oxygène mais on constate que pour le cas de $TO_2$=300K est consommé tout avant x=600mm par rapport à $TO_2$=85, au-delà de x=600mm il y a plus d'hydrogène.

## V.5 Champs de température en fonction de pression opératoire:

| Variable | Désignation | Valeur |
|---|---|---|
| Comburant | Oxygène | vitesse=1m/s<br>Température=85K |
| Fuel | Hydrogène | Vitesse=236m/s<br>Température=287K |
| | Couplage vitesse-pression | Simple |
| | Pression | Standard |
| | Modèle de turbulence | RNG K-ε |

En examinant les deux champs de températures pour les deux cas. On constate que pour P=6013250Pa, la flamme est divisée en deux, une petite partie qui est juste après la sortie des injecteurs et qui est plus chaude. Une deuxième partie qui vient après. Pour le cas de P=1013250Pa, la flamme est éloigné des injecteurs et même le cœur de flamme est décalé vers le sens positif des x par rapport au premier cas.

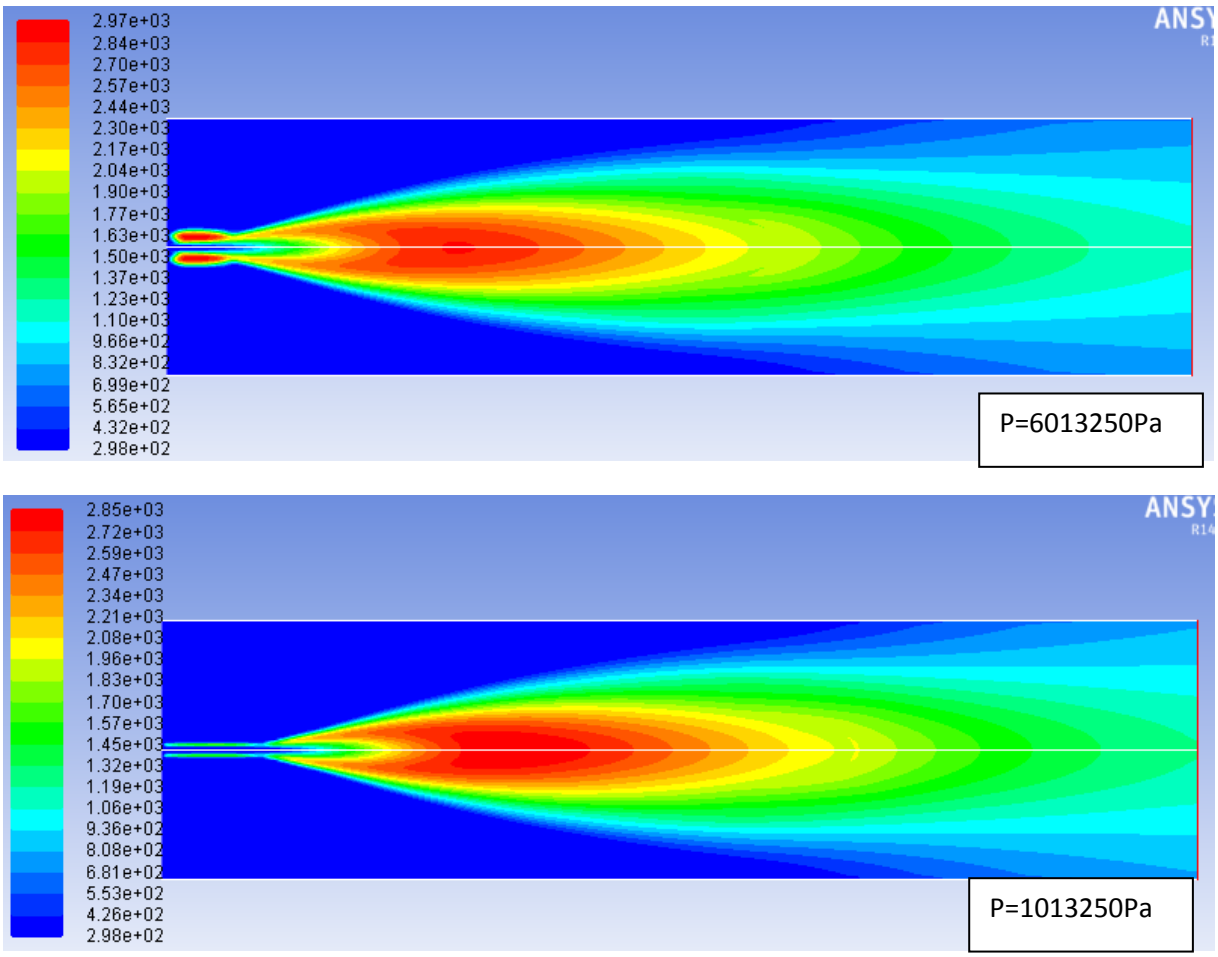



*Figure (V-12) : Champ de température en fonction de pression*

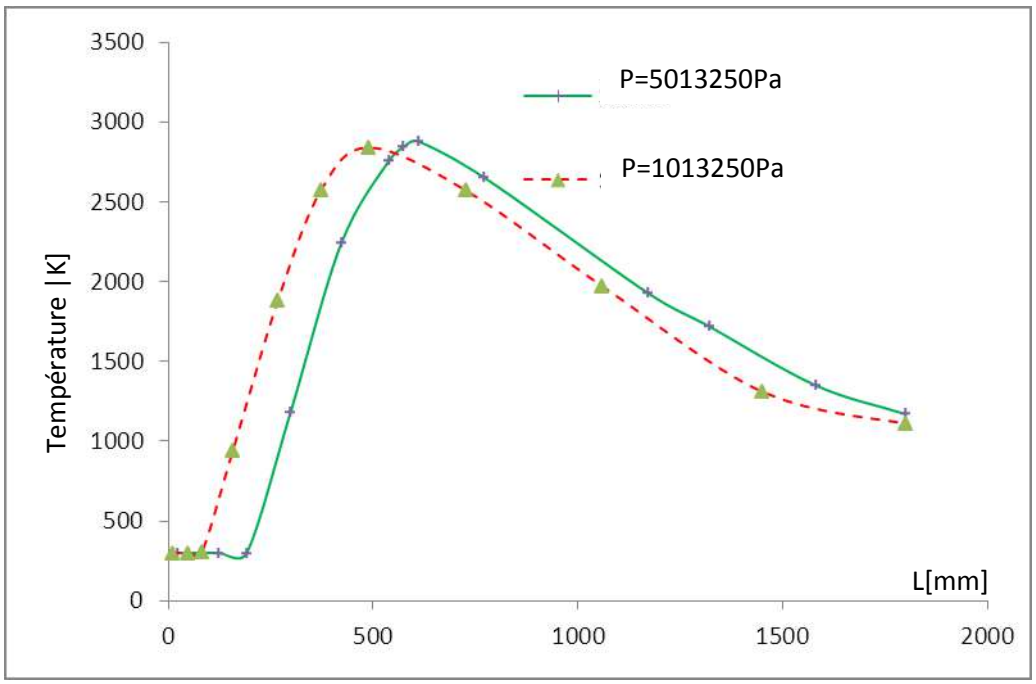



*Figure (V-13) : variation de la température en fonction de pression*

## V.6 Comparaison des flammes de combustion d'hydrogène avec de l'air et avec $O_2$:

Dans ce qui suit, une présentation des cas précédents mais le comburant est l'air

| Variable | Désignation | Valeur |
|---|---|---|
| Comburant | Oxygène | Température=85K<br>Pression=101325Pa |
| Fuel | Hydrogène | Température=287K<br>Pression=101325Pa |
| Espèces PDF: $H_2$, $O_2$, $H_2O$, OH, $H_2O_2$, H; $O_3$, $HO_2$, O, HONO, $N_2$ | Couplage vitesse-pression | Simple |
| | Pression | Standard |
| | Modèle de turbulence | RNG K-ε |

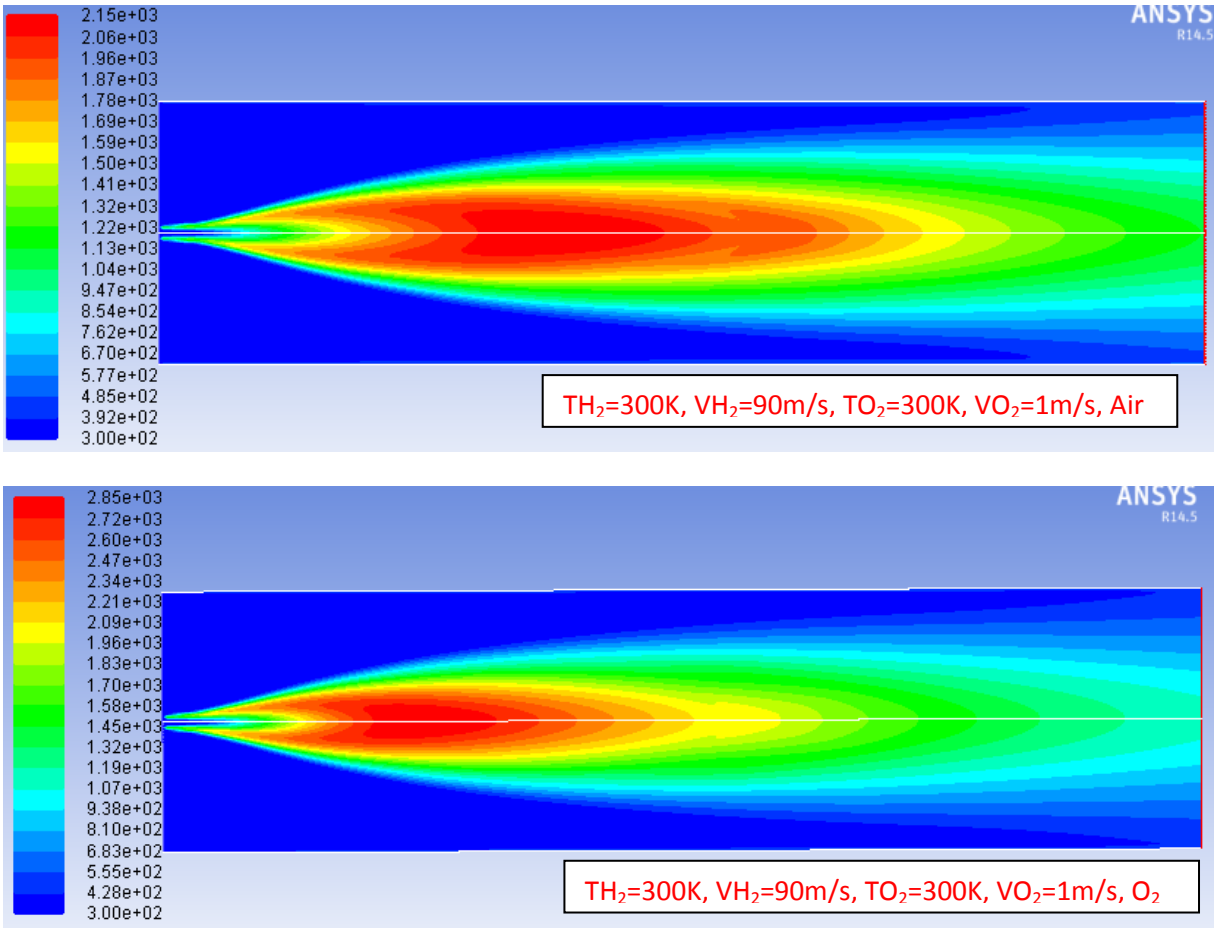



*Figure (V-14) : Champ de température en fonction de comburant*

Par visualisation des champs des flammes dans la figure (V-14), on remarque que pour l'air, la flamme est plus grande que celle de l'oxygène mais la

température maximale est plus importante dans la combustion en oxygène par rapport à celle de l'air cas il y a une différence de 70K.

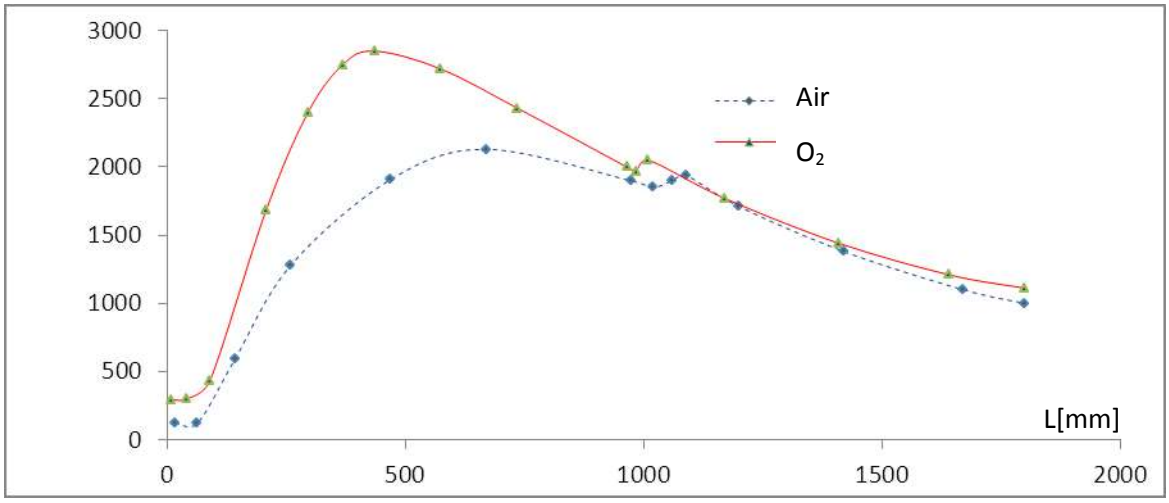



*Figure (V-15) : variation des champs de température en fonction de comburant*

## V.7 Influence de la configuration du bruleur sur le champ de la température :

Dans le cas suivant nous allons mettre le comburant dans l'injecteur axial et l'hydrogène dans l'injecteur annulaire, le comburant utilisé dans ce cas est l'air. La figure (V-16) illustre la configuration utilisée. La forme de flamme est la suivante dans la figure (V-14).

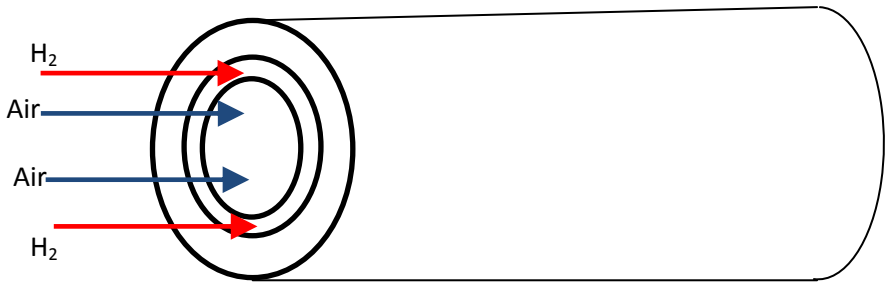



*Figure (V-16) : configuration de bruleur l'air à l'axe*

Les graphs de la figure (V-15) indiquent que la consommation de l'oxygène de l'air est assez rapide. On constate que juste après la sortie de l'injecteur de l'air (x=10mm) à x~47mm la fraction molaire de l'oxygène reste constante. Brusquement cette fraction passe de 0.233 à 0 pour une distance de l'ordre de

3mm. C'est la raison pour laquelle le front de flamme se trouve au voisinage de x=50mm.

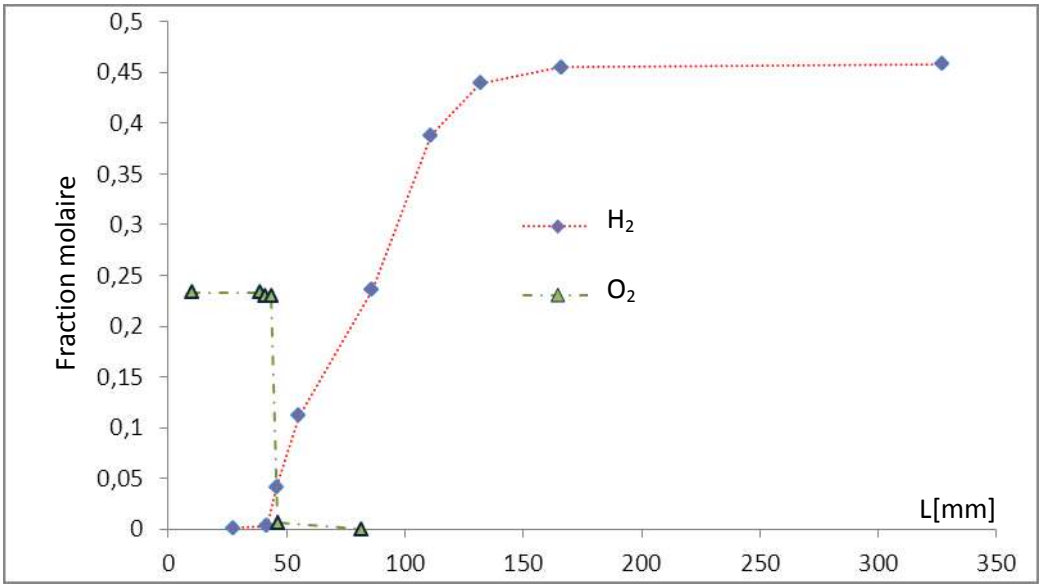



*Figure (V-17) : variation de $H_2$ et $O_2$*

## V.8 1Influence de la vitesse de soufflage d'air sur le champs de la température :

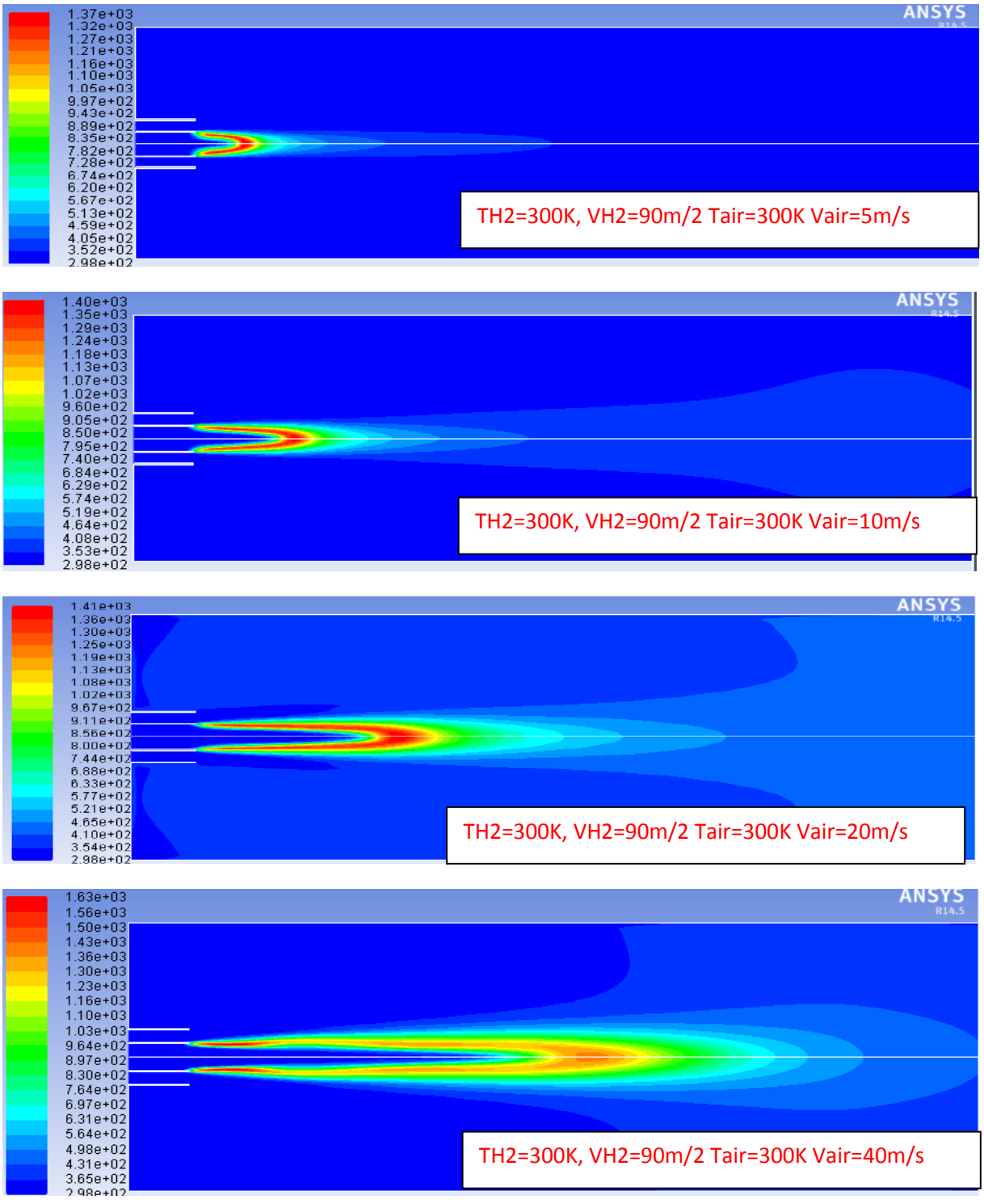



*Figure (V-18): champs de T pour la configuration de bruleur l'air à l'axe*

Examinant la figure (V-18), on constate que plus la vitesse de soufflages de l'air augmente, l'éloignement du cœur de flamme est devenu plus important. Aussi on a enregistré une température maximale de l'ordre de 1630K pour une vitesse d'air de 40m/s, 1410K pour une vitesse de 20m/s et 1370K pour une vitesse de 5m/s.

# Conclusion Générale

La compréhension du comportement des écoulements réactifs on particulier les flammes turbulents, est un enjeu très essentiel dans l'industrie d'aujourd'hui.

L'objectif de la recherche dans le domaine des flammes, c'est de concevoir des systèmes énergétiques qui rependent aux exigences économiques mais qui doivent soumis aux contraintes environnementales. Le but, des systèmes qui consomme moins d'énergie et qui donnent plus de rendement, sans nuire l'environnement.

Le présent travail fait l'objet d'une étude paramétrique pour la combustion d'hydrogène, sont but est de prédire le comportent de la flamme de ce dernier. Pour se faire, on a choisi l'axe de la simulation numérique, dont on a utilisé un solver qui est très répondu chez les scientifiques comme chez les industriels. Il s'agit de ANSYS Fluent. Le problème traité est pour un phénomène aero-thermochimique, le modèle de la turbulence est le K-ε, pour celui de la combustion est non-pré-mélangée.

Les cas traités dans cette étude sont :

1- Flamme de diffusion pour la combustion d'hydrogène avec l'oxygène dont, l'hydrogène dans l'injecteur axial, l'oxygène dans l'injecteur annulaire.
2- Comparaison de la flamme dans le cas 1 avec la flamme de diffusion pour la combustion d'hydrogène avec de l'air en garde la configuration du cas précèdent.
3- Une illustration du comportement de la flamme deuxième cas sauf qu'on change la géométrie et la configuration.

L'étude paramétrique a menée à voir l'influence des conditions initiales sur le structure de la flamme pour le cas 1.

Dans la comparaison entre la combustion d'hydrogène avec de l'oxygène et celle avec de l'air. On a remarqué que la flamme dans la combustion en oxygène plus chaude pour la flamme de la combustion en air.

Dans le troisième cas, on a met l'air dans l'injecteur axial et l'hydrogène dans l'injecteur annulaire, en variant la vitesse d'injection de

l'air. On constate que la tête de flamme s'éloigne de la sortie de l'injecteur axiale sans qu'elle le quitte.

Par ailleurs, on a remarqué que l'augmentation de la vitesse d'injection de l'hydrogène 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 de la vitesse de combustible.

On remarque 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 la distance de coincement de la flamme en question. La longueur de la flamme diminue avec l'augmentation de la température d'entrée.

En outre, en a trouvé des difficultés pour faire plus de simulations surtout pour le troisième cas cela dû au temps de calcul nécessaire et qui est souvent éminent pour la convergence pour chaque cas de simulation, aussi, nous avons affronté beaucoup de cas qui divergent surtout pour les cas de teste de maillage et le choix de la méthode de résolution.

Afin d'améliorer ce travail, on propose d'étudier des cas plus simples et connus afin de bien maitriser l'outil de simulation surtout en matière de méthodes de résolution et des modèles quoi que ce soit, de turbulence et/ou de combustion.

## Bibliographie


[1] : *Véronique DIAS Véronique, Jacques Vandooren* ; ***Chimie de la combustion Flamme à base d'hydrocarbures*** p1,2 – 2004.

[2] : *Clothide Hoffmann* ; ***Des flammes sur le plateau*** Realisation lumière, Dossier technique -1970.

[3] : *Noui Samira* ; thèse de magister ***: Etude Numérique de la combustion des gaz dans un four de cimenterie***, Université de -2006.

[4] : *Mouangue Ruben Martin* ; thèse de doctorat : ***Contribution à la modélisation de la combustion turbulente non-prémélangée avec prise en compte de l'auto-allumage*** p10 –2011.

[5]*Guillaume Albouze* ; thèse de doctorat : ***Simulation aux grandes échelles des écoulements réactifs non-prémélangé***, Université de Toulouse -2009.

[6] : *Aman Satija, Rajat D. Singh, Sameer V. Naik,1 and Robert P. Lucht:* ***Investigation of Non-Premixed Opposed Flow H2/Air Laminar Flames using Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS),*** School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA –May 2013.

[7] : *Joseph Burguburu* ; thèse de doctorat : ***Etude expérimentale de la stabilité d'une flamme dans une chambre de combustion aéronautique par recirculation de gaz brulé et par ajout d'hydrogène***. P29.30.31.33.34 -2012.

[8] : *F. TABET-HELAL*, B. SARH, I. GÖKALP and A. MENOU ;* ***Comparative Study of Turbulence Modelling in Hydrogen Nonpremixed Turbulent Flame,*** Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs, 1C avenue de la recherche scientifique 45071 Orléans Cedex 2.

[9] : *Moussa Dicko, Farida Darkrim-Lamari et Pierre Malbrunot :* ***Combustible Hydrogène*** *Production p3.* -2013.

[10]: *A. Kalatrabi*; ***L'hydrogène naturel***. Eldorado énergétique. Science et avenir n°795 – mai2013.

[11]: *Christophe BOYER*; ***Hydrogène*** p9 -2012.

[12]: *Farida Darkrim-lamari, Pierre Malbrnot*; ***Combustible hydrogen utilization***.

[13]: *Lamy C. et Leger J. M.* : ***Les piles à combustible***, Journal de physique IV CI, Supplémentaire au journal de physique III, vol. 4. –Janvier 1994.

[14] : *T. Alleau* ; ***Photoélectrolyse de l'eau***. Mémento de l'hydrogène, Fiche 3.2.3, AFH2 -2007.

[15] : *H. Nouri, F. Ravelet* ; ***Tutorièl intoductif à la simulation numérique des écoulements***, cours Paris, France -2012.

[16] : *Kazui Fukumoto and Yoshifumi Ogami*; ***Simulation of H2-Air Non-Premixed Flame Using Combustion Simulation Technique to Reduce Chemical Mechanisms,*** Ritsumeikan University, 1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga. Japan. -2012.
[17]: *Gabriel Weecel* ; ***Fluent tutorials;*** -March2009.
[18]: ***Tutorial 14. Using the Non-Premixed Combustion Model,*** Fluent 13.0 - 2011.
[19]: ***Pointwise Tutorial Workbook,*** Pointwise Inc. -2009.
[20]: *Benarous Abdallah, Liazid Abdelkrim ,Mokhtar Didouche Abdelkader1, Karmed Djamel,* ***Analyse et Simulation d'un Ecoulement Réactif Turbulent par le Modèle LW-P***, 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique -2010.
[21] : *Salim .M. Salim, and S.C. Cheah :* ***Wall y+ Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows,*** Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009 Vol II. IMECS 2009, March 18 - 20, 2009, Hong Kong.