الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'étude

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Mécanique

Option : Energétique et thermique des systèmes

THEME

Etude de la structure d'une flamme d'un syngas en utilisant le code COMSOL Multiphysics

Préparé et présenté par :

- ✓ BENATALLAH Ryad Karim
- ✓ TLEMSANI Mohamed

Proposé et dirigé par :

Dr. ALLICHE Mounir

Dr.REBHI Ridha

Année Universitaire : 2016-2017

Remerciements

*On tient tout d'abord à remercier « **Dieu, Allah** » le Tout Puissant.*

*Les plus sincères remerciements vont également à notre encadreur Dr. **Alliche Mounir** pour la qualité de son encadrement et ses encouragements qui ont été indispensables pour garder le moral dans les moments les plus compliqués, pour ses brillantes intuitions et pour l'optimisme qu'il a su me transmettre.*

On souhaite également remercier les membres du jury qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps à notre mémoire.

Merci à nos collègues et amis avec lesquels on a beaucoup partagé, en particulier.

Un grand merci à toute la famille, et surtout à notre parents, notre frères et à notre sœurs, merci pour votre soutien inconditionnel.

Dédicace

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

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

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

BENATALLAH Riadh Karim.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A la mémoire de mon père

A ma mère,

A mes frères et sœurs,

et toute la famille,

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans ce travail.

TLEMSANI Mohamed.

Résumé :

Ce travail présente une étude numérique d'une flamme turbulente non pré-mélangée dans un Brûleur à jet rond. L'écoulement considéré comme un jet rond turbulent d'un mélange combustible (Gaz de synthèse) carbon monoxide ,hydrogen , nitrogen / air. Cet écoulement est caractérisé par son aspect turbulent qui est représenté par un modèle de turbulencede type **RANS (modèle K-ω)**. La combustion est modélisée par le modèle **PDF** (probability density function). L'interaction chimie-turbulence est mise en évidence. L'outil informatique utilisé dans cette étude est le code de calcul **«COMSOL Multiphysiques».**

Une étude paramétrique a été menée. On a examiné, principalement, l'effet des conditions initiales sur la structure de la flamme ; en occurrence : la vitesse d'injection du syngas, la vitesse d'injection de l'air et la température d'entrée.Les résultats de simulation obtenus sous forme de l'évolution axiale et radiale de la température , la pression , la vitesse et les masses fraction des espèces CO,O2,CO2,H2,H2O,N2).

Mots clés : Combustion - Flamme non-prémélangée–CFD–Ecoulement turbulent réactif.

Abstract :

This work presents a numerical study of a non-premixed turbulent flame at round jet burner. The flow is considered as turbulent round jet of a combustible mixture (syngas)carbon monoxide,hydrogen , nitrogen / air (syngas). This flow is characterized by turbulence model type**RANS** and turbulence model combustion by the **K-ω** model. The model **PDF** (probability density function) represents the chemistry turbulence interaction. The computer tool used in this study is the calculation code "**COMSOL Multiphysiques**."

A parametric study was conducted. Were examined mainly, the effect of initial conditions on the flame structure; in this case: the injection rate of syngas, the air injection speed and the inlet temperature.

The simulation results obtained in the form of axial and radial changes (temperature and pressure and velocitiy and mass fraction of species CO,O2,CO2,H2,H2O,N2).

Keywords: Combustion - non-premixed flame - CFD - Turbulent reactive.

الملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة عددية للهب مضطر ب غير ممزوج في موقد ذو حاقن محوري بحيث يكون التدفق المضطرب خليط من غاز أحادي أكسيد الكربون وغاز الهدروجين و غاز النتروجين والهواء، يتميز هذا التدفق بتأثير مختلف المعاملات العنصرية للحقن مثل نوع نموذج الاضطراب **RANS** ونموذج الاضطراب**K-ω** والنموذج **PDF** يمثل التفاعل الكيميائي للاضطراب وذلك باستخدام البرنامج العددي**"COMSOL Multiphysiques"**

نقوم في هذه الدراسة بفحص تأثير الشروط الابتدائية على بنية اللهب حيث نغير كل من سرعة حقن الهواء وسرعة حقن الخليط ودرجة حرارة الدخول.

نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها أفقيا و عموديا تكون على شكل تغيرات لكل من درجة الحرارة والضغط والسرعة والكتل الجزئية للأنواع التالية (CO, O2, CO2, H2, H2O, N2)
الكلمات المفتاحية :الاحتراق -اللهب الغير ممزوج CFD-السيلان المضطرب المتفاعل.

Sommaire

Introduction Générale : ……..01

Chapitre I : Généralités sur les syngas

I.1 Introduction :……..03

I.2 Définition d'un syngas :……..03

I.3 Bref historique des syngas :……03

I.4 Présentation du syngas : ……..04

I.4.1 Production du gaz de synthèse :……...04

I.4.2 Avantages des gaz de synthèse :……..05

I.4.3 Défis des gaz de synthèse :……06

I.4.4Qualité du gaz combustible :……..…06

I.4.5Concept :……..…06

I.4.6Compétence :……..…07

I.5 Gazéification :……...07

I.5.1 Définition et catégories :……...07

I.5.2 Fonctionnement technique ou scientifique :……..……08

I.5.3 Les différents procédés de gazéification :……..……10

I.5.4 Enjeux par rapport à l'énergie :……..…...12

I.5.5 Acteurs majeurs :……...…13

I.5.6 Unités de mesure et chiffres clés :……..……14

I.5.7 Passé et présent :……..…...14

I.5.8 Futur :……..….....15

Chapitre II : Généralités sur la combustion et les flammes

II.1 Introduction :……..16

II.2 Définition de la combustion :……16

II.3.1 La combustion pré-mélangée :……....17

II.3.2 La combustion non pré-mélangée :……....18

II.3.3 La combustion partiellement pré-mélangée :……...18

II.4 La combustion turbulente :……....19

II.4.1 La combustion turbulente non pré-mélangée (diffusion) :……...19

II.5 Applications industrielles de la combustion turbulente :……...19

II.6 Les trois catégories de la combustion :……....19

II.7 Généralités sur les flammes :…….……20

II.7.1 Types des flammes :……20
II.7.2 Régime de propagation des flammes :……21
II.7.3 Instabilité des flammes :……22

Chapitre III : Présentation du code COMSOL Multiphysiques

III.1 Introduction :……24
III.2 Définition du COMSOL Multiphysiques :……24
III.2.1Présentation de l'interface :……24
III.2.2Choix des modules :……25
III.2.3Régimes transitoire, stationnaire, fréquentiel et cyclique :……25
III.2.4 Géométrie :……26
III.2.5 Physique :……27
III.2.6 Multiphysics :……27
III.2.7 Maillage :……27
III.2.8 Paramètres :……28
III.2.9 Calcul :……29
III.2.10Visualisation et Post-traitement des Résultats : ……29
III.2.11 Affichage et export des résultats :……30
III.3 Combustion de gaz de synthèse dans un brûleur à jet rond :……31
III.3.1 Introduction :……31
III.3.2 Définition du modèle :……31
III.3.3 RÉACTION TURBULENTE :……32
III.3.5 CHALEUR DE RÉACTION :……33
III.3.6 CAPACITÉ THERMIQUE :……34
III.4 Instruction de modélisation :……35

Chapitre IV :Résultats et discussions

IV.1 Introduction :……66
IV.2 Modélisation d'un brûleur à jet rond:……66
IV.2.1 Configuration expérimentale numérique :……66
IV.2.2 Propriétés des mélanges :……67
IV.3 Solution :……68
IV.4 Résultats et discussion :……68
IV.4.1 Effet de la vitesse d'entrée de Coflow :……72
IV.4.1.a Champ de la fraction massique de CO2 :……73
IV.4.1.b Champ de pression:……77
IV.4.2 Effet de la température d'entrée de Coflow :……81

IV.4.2.a Champ de la pression :……...……..…..82
IV.4.2.b Champ de vitesse:……..……86
IV.4.3 Effet de la vitesse d'entrée sur la flamme :…….90
IV.4.3.a Champ de la fraction massique de H2:……...……...……...91
IV.4.3.b Champ de la température :……...…….95

Conclusion Générale :…….99

Références Bibliographiques :…….101

Liste des figures

FigureI.1 : Schéma de production de gaz de synthèse…….....05
FigureI.2 : Schéma de résidus de carbone……....…….....09
FigureI.3 : Schéma de gazogéne à co-courant (lit fixe)…….....10
FigureI.4 : Schéma de gazogéne à contre-courant (lit fixe)……...….11
FigureI.4 : Schéma de gazogéne à lit fixefluidisé……...…12
Figure II.1 : lesdifférents types de combustion et régimes d'écoulement ……..……...16
Figure II.2 : Triangle du feu……17
Figure II.3 : Schémas d'une flamme de prémélange (a) et flamme de diffusion (b)…….20
Figure II.4 : Représentation schématique d'une onde de déflagration se déplaçant dans un tube. L'onde de combustion porte les gaz d'un état initial à un état fin……...…...21
Figure II.5 : Représentation Schématique de la détonation…….……22
Figure III.1 : Capture d'écran de l'interface du logiciel COMSOL Multiphysics…….…..25
Figure III.2 : Capture d'écran de la Géométrie du logiciel COMSOL Multiphysics…….....26
Figure III.3 : capture d'écran de Maillage du logiciel COMSOL Multiphysics…….....28
Figure III.4 : capture d'écran des Paramètres du logiciel COMSOL Multiphysics……...…29
Figure III.5 : capture d'écran de Calcul du logiciel COMSOL Multiphysics……..…….29
Figure III.6 : capture d'écran de Visualisation et Post-traitement des Résultats du logiciel COMSOL Multiphysics……..……..…..30
Figure III.7 : capture d'écran des Résultats du logiciel COMSOL Multiphysics……...…31
Figure IV.1 : brûleur à jet rond……...….66
Figure IV.2 : Cut Line 2D 1……67
Figure IV.3 : Cut Line 2D 2……...…..67
Figure IV.4 : Cut Line 2D 3……...….67
Figure IV.5 : L'amplitude de vitesse et les trajets d'écoulement (lignes de courant) du jet de réaction……..……..68
Figure IV.6 : Température de jet affichée à l'aide d'un ensemble de données revu…….…..69
Figure IV.7 : fraction de masse de CO2 dans le réacteur……...…...70
Figure IV.8 : Température du jet le long de la ligne médiane (à gauche), et radialement à deux positions différentes en aval de la sortie du tuyau (à droite)……..71
Figure IV.9 : Vitesse axiale à deux positions différentes en aval de la sortie du tuyau. Les résultats des modèles sont tracés à l'aide de lignes……..71

Figure IV.10: Fractions massiques des espèces sur la ligne médiane du jet. Les résultats des modèles sont tracés à l'aide de lignes, tandis que les résultats expérimentaux sont indiqués en utilisant des symboles……...72
Figure IV.11 : Champ de la fraction massique de CO2avec la variation de la vitesse de coflow……..73
Figure IV.12 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la concentration de CO2 avec la variation de lavitesse de coflow…….……..……..74
Figure IV.13 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la concentration de CO2 avec la variation de lavitesse de coflow……...……..75
Figure IV.13 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la concentration de CO2 avec la variation de lavitesse de coflow……..76
Figure IV.14 : Champ de pressionavec la variation de la vitesse de coflow……...…77
Figure IV.15 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la pressionavec la variation de la vitesse de coflow……...…..78
Figure IV.16 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la pressionavec la variation de la vitesse de coflow……...…..79
Figure IV.17 : Evolution axiale Cut Line 2D 3 de la pressionavec la variation de la vitesse de coflow……..80
Figure IV.18 : Champ de pressionavec la variation de la température d'entrée……..82
Figure IV.19 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la pressionavec la variation de la température d'entrée……83
Figure IV.20 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la pressionavec la variation de la température d'entrée……84
Figure IV.21 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la pressionavec la variation de la température d'entrée……85
Figure IV.22 : Champ de vitesseavec la variation de la température d'entrée…….86
Figure IV.23 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la vitesseavec la variation de la température d'entrée……87
Figure IV.24 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la vitesseavec la variation de la température d'entrée……88
Figure IV.25 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la vitesseavec la variation de la température d'entrée……89

Figure IV.26: Champ de la fraction massique de H2avec la variation de la vitesse d'entrée du jet……91
Figure IV.27 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la fraction massique H2 avec la variation de la vitesse d'entrée du jet……92
Figure IV.28 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la fraction massique H2 avec la variation de la vitesse d'entrée du jet……93
Figure IV.29 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la fraction massique H2 avec la variation de la vitesse d'entrée du jet……94
Figure IV.30 : Champ de la températureavec la variation de la vitesse d'entrée du jet……..95
Figure IV.31 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la température avec la variation de la vitesse d'entrée du jet……..96
Figure IV.32 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la température avec la variation de la vitesse d'entrée du jet……..……97
Figure IV.33 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la température avec la variation de la vitesse d'entrée du jet……..……98

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Composition du gaz de synthèse…….……...04

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients principaux des trois modes de combustions…...18

Tableau III.1 : enthalpie des espèces de formation et capacité calorifique……..34

Tableau III.2 : Tableau des variables……..47

Nomenclatures

C	Variable d'avancement de la réaction	[--]
Cp	Chaleur spécifique à pression constante du mélange	[J/ (kg K)]
Cpk	Chaleur spécifique à pression constante de l'espèce k	[J/ (kg K)]
$c\mu$,1,$c\varepsilon$2,σket $\sigma\varepsilon$	Constantes du modèle k-ε	[--]
D_K	Coefficient de diffusion de l'espèce k dans le mélange	[m^2/s]
Da	Nombre de Damkhöler	[--]
Di	Diamètre de l'injecteur (brûleur)	[m]
h_k	Enthalpie spécifique de l'espèce k	[J/kg]
hs, $_k$	Enthalpie sensible de l'espèce k	[J/kg]
k	Energie de turbulence	[m^2/s^2]
Ka	Nombre de Karlovitz	[--]
L	Echelle intégrale de longueur	[m]
l_δ	Epaisseur de la couche interne de la flamme	[m]
l_f	Epaisseur de la flamme laminaire	[m]
l_{fspa}	Epaisseur de la flamme laminaire (Spalding)	[m]
L_{fzel}	Epaisseur de la flamme laminaire (Zeldovitch)	[m]
P	Pression	[N/m^2]
Q	Source de chaleur	[J/ (m^3s)]
R	Constante universelle des gaz parfaits	J/ (Kg K)]
Re_t	Nombre de Reynolds de la turbulence	[--]
S	Rapport stœchiométrique	[--]
S_L	Vitesse de la flamme laminaire	[m/s]
Sc	Nombre de Schmidt	[--]
T	Température	[K]

T	Température maximale (adiabatique) de la flamme laminaire	[K]
t_η	Echelle de temps de Kolmogorov	[s]
u_i	Vitesse dans la direction i	[m/s]
u_η	Vitesse de retournement du tourbillon de Kolmogorov	[m/s]
u_i'	Fluctuation de vitesse dans la direction i	[m/s]
$V_{k,i}$	Vitesse de diffusion de l'espèce k dans la direction i	[m/s]
M_k	Masse molaire de l'espèce k	[mole/kg]
W_k	Fraction massique de l'espèce k	[--]
Z	Fraction de mélange	[--]

Introduction générale

Les processus de combustion trouvent une importante étendue pratique dans la vie quotidienne et ainsi que dans les procédés industriels. En effet, d'après Chrys (2000) et Européens Commission (2005), un pourcentage de 79 % des besoins mondiaux en énergie (fours, moteurs automobiles ou aéronautiques et turbines à gaz) proviennent de la combustion. [1]

Cependant, et malgré cette importance, les principaux processus de la combustion et leurs interactions ne sont pas encore complètement maîtrisés.

En outre, les carburants généralement utilisés dans l'industrie sont les hydrocarbures et le charbon. Ces derniers sont des ressources épuisables, d'où la nécessité d'une combustion plus économique.

D'autre part, les émissions polluantes issues de la combustion posent encore une menace sérieuse sur le plan planétaire (environnement).

Dans ce sens, il est nécessaire d'optimiser les paramètres des modes opératoires et géométriques des processus de combustion, afin de réduire au minimum les risques environnementaux, tels que :

- l'émission de polluants nocifs à l'être humain (HC, NOx et CO).
- l'effet de serre provoqué par l'émission de CO2

Dans la majeure partie des cas, les systèmes industriels, impliquant des phénomènes de combustion, sont basés sur la combustion turbulente d'un carburant qui est stocké sous forme liquide puis injecté soit dans une chambre de pré-vaporisation, soit directement dans la chambre de combustion.

Dans la littérature, les systèmes de combustion sont classés selon la méthode d'injection du comburant et du combustible en deux types : non prémélangé et prémélangé.

Dans le présent travail, on s'intéresse à l'étude d'une flamme non prémélangée (ou de diffusion), qui a toujours une température maximale proche ou égale à la température adiabatique de l'écoulement et qu'on ne peut pas contrôler.

Cet avantage permet d'une part de diminuer la température à laquelle seront soumises les parois des chambres de combustion et d'autre part de contrôler efficacement les émissions nocives. De plus, des références bibliographiques ont montré que les flammes de diffusion sont plus sensibles aux perturbations et peuvent êtres soufflées ou éteintes.

L'objectif principal du présent travail est la simulation numérique de la structure d'une flamme d'un gaz de synthèse (syngas) non pré-mélangé, en utilisant le code **COMSOL**

MULTIPHYSICS. Un couplage Combustion-Turbulence-Ecoulement sera pris en compte. Lors de cette simulation, on a utilisé :

- Modèle de turbulence **k-ε.**
- Modèle de combustion non pré-mélangé **EDM** : **E**ddy **D**issipation **M**odel

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

Nous discuterons d'abord la Définition la Production et les avantages de syngas, la Définition et Fonctionnement technique de Gazéification (chapitre 1), les propriétés et procédures de combustion et les propriétés des flammes (chapitre 2). Puis, une Présentation générale du code COMSOL Multiphysiques sera faite au chapitre 3. Finalement, nous décrirons et discuterons les principaux résultats obtenus à partir des différentes simulations réalisées (chapitre 4). En fin, on va donner quelques remarques de conclusion.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYNGAS.

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va décrire le gaz de synthèse et comment pouvons-nous le produire.

I.2 Définition d'un syngas :

Les « syngas » également appelés gaz de synthèse, gaz synthétique, gaz de ville, gaz de houille ou gaz de gazogène, peuvent être produits à partir de différentes matières contenant du carbone. Elles incluent notamment la biomasse (gaz de bois), les matières plastiques, le charbon, les déchets ménagers ou matières similaires **[1].**

I.3 Bref historique des syngas :

La production à l'échelle industrielle de gaz à partir de matières premières carbonées est relativement ancienne**,** et a longtemps essentiellement reposé sur l'utilisation du charbon comme matière première. Elle est devenue un procédé commercial au début du XIXe siècle, avec notamment la création en 1812 de la première compagnie de distribution de gaz pour l'éclairage urbain, la « Gas Light and Coke Company of London »**.**

Le grand nombre de dénominations utilisées pour désigner cet ancêtre du gaz de synthèse actuel reflète la grande variété des méthodes de fabrication et des matières premières utilisées pour le produire. La plus connue de ces appellations est sans doute le terme gaz de ville, qui désignait autrefois principalement le gaz issu de la pyrolyse de la houille (également appelé gaz de houille). A l'origine, le gaz issu de la gazéification du charbon était principalement utilisé pour l'éclairage et la cuisson, où il restait très attractif devant ses principaux concurrents, le charbon et la bougie **[2].**

Les premiers gazogènes ont vu le jour au XIXème siècle, avec la production de "gaz de ville" utilisé pour l'éclairage urbain à partir de charbon minéral. Il faut attendre jusqu'au 1921 pour voir apparaître le premier gazogène au bois développé par le français Georges Imbert. En 1923, il réussit à adapter un gazogène à bois sur un véhicule. Durant la seconde guerre mondiale, alors que la pénurie de pétrole frappe l'Europe, les voitures et camions à gazogène seront développées à plusieurs centaines de milliers d'exemplaires principalement en France et en Allemagne. Il s'agit alors de gazogènes de petite taille avec des rendements aléatoires. L'engouement pour les voitures à gazogène s'estompe avec le retour du pétrole abondant et bon marché. En Europe, il faudra attendre la prise de conscience des enjeux liés au changement climatique pour voir réapparaître l'intérêt pour la filière gazéification.

L'Asie constitue également un territoire de développement de la gazéification, avec plus de 100000 voitures à gazogène en circulation durant la seconde guerre mondiale **[3].**

I.4 Présentation du syngas :

Le terme de gaz de synthèse, ou de syngas, désigne le produit issu des procédés de gazéification. Sa composition varie sensiblement suivant le type de matière première utilisée et le procédé de gazéification choisi, ce choix se faisant principalement en fonction de l'utilisation industrielle future à laquelle le syngas est destiné. Le syngas est généralement constitué en majorité de CO et de H_2, mais peut également contenir du dioxyde de carbone CO_2, du méthane CH_4 ou encore de la vapeur d'eau H_2O comme l'indique le tableau I.1 ci-dessous.

Les matières premières utilisées sont également très diverses. Elles vont du gaz naturel, principalement composé de méthane CH_4, au charbon, en passant par les hydrocarbures plus ou moins lourds comme le pétrole. Certains résidus des raffineries pétrolières, tels que le coke de pétrole, peuvent également être utilisés pour produire du syngas **[4]**.S'y ajoutent également un grand nombre de déchets organiques et de biomasse (bois, végétaux, plumes animales..).

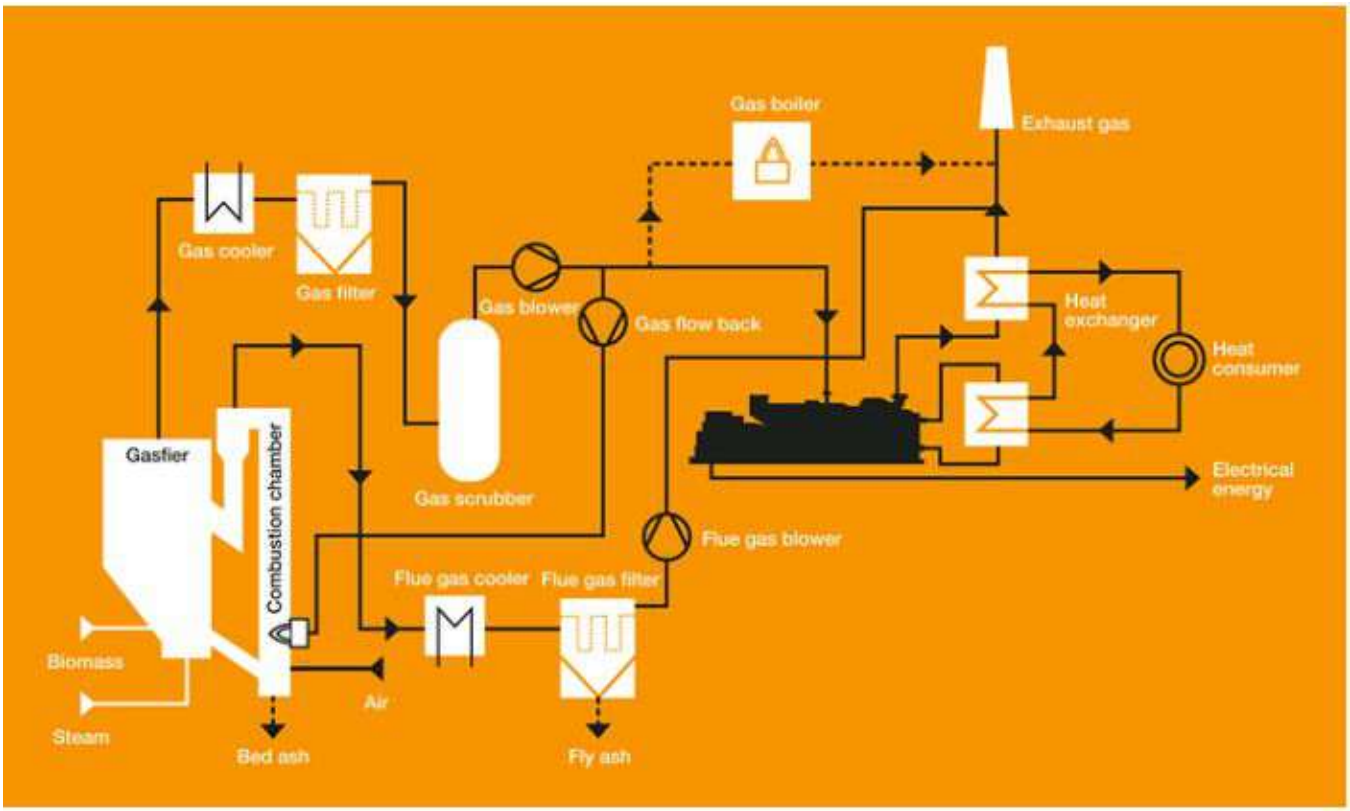
Substance	Composition (%)
H_2	20-40
CO	35-40
CO_2	25-35
CH_4	0-15
N_2	2-5

Tableau I.1 : Composition du gaz de synthèse.

I.4.1 Production du gaz de synthèse :

Les gaz de synthèse sont créés par la gazéification comme l'indique figure 1.1 ou la pyrolyse des matériaux carbonés. La gazéification implique de soumettre ces matières à de hautes températures, en présence contrôlée d'oxygène et avec seulement une combustion limitée pour fournir de l'énergie thermique pour alimenter la réaction**.** La gazéification peut se produire dans des cuves d'origine industrielle, ou peut être effectuée par la gazéification souterraine (UCG). Tandis que le combustible alimentant le gazogène est d'origine biologique récente, tel que les déchets de bois ou organique, le gaz produit par le gazogène est considéré comme renouvelable, de même que

l'énergie produite par sa combustion. Lorsque le combustible alimentant le gazogène est un flux de déchets, sa conversion en énergie par ce procédé a l'avantage combiné de la conversion de ces déchets en produits utiles.



FigureI.1 : Schéma de production de gaz de synthése [**1**]**.**

I.4.2 Avantages des gaz de synthèse :

- Production d'énergie renouvelable
- Conversion des déchets problématiques en combustibles utiles
- Production économique d'énergie sur le site et réduction des pertes de transmission
- Réduction des frais énergétiques et meilleure prévisibilité et stabilité
- Faible pression gazeuse requis
- Élimination alternative d'un gaz problématique tout en l'employant simultanément comme source d'énergie renouvelable
- Produit de remplacement des carburants traditionnels
- Avantages environnementaux par la réduction des gaz à effet de serre

I.4.3 Défis des gaz de synthèse :

La composition des gaz de synthèse dépend fortement des matières insérées dans le gazogène. Plusieurs composants des gaz de synthèse présentent des difficultés qui doivent être abordées au début, notamment les goudrons, niveaux d'hydrogène et d'humidité. L'hydrogène gazeux est bien plus rapide à brûler que le méthane, qui est la source d'énergie classique pour les moteurs à gaz. Dans des circonstances normales, une combustion plus rapide dans les cylindres de moteur entraînerait potentiellement un allumage par point chaud, une détonation et un retour de flamme du moteur. Afin de faire face à ce défi, le moteur bénéfice de nombreuses modifications techniques et le rendement du moteur est réduit de 50 à 70 % de son rendement normal à gaz naturel. Par exemple : un moteur à 1063 kW fonctionnant au gaz naturel est comparable à un moteur à 730 kW fonctionnant au gaz de synthèse.

I.4.4 Qualité du gaz combustible :

Une large gamme d'hydrogène gazeux peut être utilisée dans les moteurs à gaz. Toutefois, comme pour tous les combustibles de moteurs, il existe des limites spécifiques aux différents composants du gaz combustible utilisé. Les contaminants dans les gaz de synthèse, notamment le goudron et l'humidité, sont un défi technique essentiel à l'utilisation des gaz de synthèse. Pour plus d'informations, veuillez demander les instructions techniques des gaz spéciaux pour connaître la qualité des gaz combustibles.

I.4.5 Concept :

La variété des compositions, ainsi que les valeurs calorifiques et le comportement de la combustion des gaz dans les procédés de gaz synthétiques, exercent une pression accrue sur la conception du moteur. Clarke Energy fournit des moteurs à gaz GE's Jenbacher spécialement modifiés qui font une utilisation efficace de ces gaz pour la production combinée de chaleur et d'électricité. Les fonctionnalités spéciales de ces moteurs peuvent inclure des pare-flammes pour la prévention des retours de flamme, des mélangeurs spéciaux afin d'améliorer le mélange et être plus résistant aux impuretés. De manière générale, la composition stable du gaz de bois lui confère un avantage en tant que combustible de moteur. Le contenu à forte teneur en hydrogène de certains gaz de synthèse signifie cependant que le procédé de combustion est très rapide, ce qui augmente le risque d'allumage par point chaud, de détonation ou de retour de flamme du moteur. Afin d'éviter ce risque, GE a créé un système de contrôle du moteur permettant d'alimenter le moteur GE's Jenbacher avec un mélange très pauvre et, en même temps, de réagir très rapidement aux variations

de charge du moteur. Certains gaz de synthèse ont un contenu à forte teneur en monoxyde de carbone, qui a une faible vitesse de combustion et est très dangereux. GE a développé le système spécifique de combustion de moteur à gaz qui permet de brûler le gaz de manière efficace et fiable. Par ailleurs, Clarke Energy et GE ensemble de technologies de la sécurité qui permet de gérer stablement les gaz dangereux tels que le monoxyde de carbone. Les gaz de synthèse peuvent être utilisés pour créer de l'eau chaude, de la vapeur et de l'électricité. L'eau chaude et les gaz d'échappement des moteurs sont alimentés dans les chaudières. La vapeur résultante peut être utilisée avec d'autres procédés industriels localisés. L'électricité produite par les moteurs à gaz GE peut être utilisée sur le site ou vendue au réseau public. Les rendements électriques de gaz de synthèse peuvent atteindre 37 % ou plus avec les moteurs à gaz Jenbacher

I.4.6 Compétence :

Clarke Energy bénéficie d'une expérience complète en termes de technologie des moteurs à gaz et dispose d'une grande base de connaissances pour la gestion des gaz difficiles tels que les gaz de synthèse. Environ 30 moteurs à gaz GE's Jenbacher fonctionnent actuellement au gaz de coke ou gaz de convertisseur LD. Mettant en relief l'expertise technique de GE, ces unités ont récemment atteint un total combiné de plus de 1 million d'heures de fonctionnement. De plus, en utilisant ces gaz d'échappement "gratuits" plutôt que les gaz naturels pour la production d'énergie, les sites équipés de la technologie GE's Jenbacher ont permis d'atteindre des économies en CO_2 d'environ 2 millions de tonnes depuis leur mise en service. Si vous souhaitez discuter de la manière dont Clarke Energy peut vous aider à développer votre projet à gaz de décharge, veuillez contacter votre bureau local **[5]**.

I.5 Gazéification :

I.5.1 Définition et catégories :

La « gazéification » désigne une transformation thermochimique consistant à décomposer par la chaleur un solide combustible carboné (charbon, biomasse) en présence d'un réactif gazeux (gaz carbonique, vapeur d'eau puis oxygène/air) dans le but d'obtenir un mélange gazeux combustible. La réaction de gazéification se passe dans des conditions de température très élevées (plus de 1 000 °C). Le gaz de synthèse obtenu à la fin, appelé « syngas » (pour « synthetic gas »), est un mélange de deux gaz combustibles : le monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H_2).

Ce syngas est utilisé principalement :

- comme source de production de chaleur ;
- comme source de production d'électricité par l'action du gaz sur des turbines ;
- comme source de production d'hydrogène, de méthanol et de méthane par traitement chimique ;
- comme source de production de carburant de synthèse par le procédé Fischer-Tropsch.

I.5.2 Fonctionnement technique ou scientifique :

Pour parvenir à la production du syngas, plusieurs réactions préalables sont nécessaires. L'ensemble de ce processus est appelé gazéification. Il nécessite, à partir d'une matière organique, d'obtenir au préalable dans le réacteur de la vapeur d'eau (H_2O), du carbone (C) et de produire une chaleur suffisante pour la réaction finale de gazéification. Quatre étapes successives, fortement couplées, sont nécessaires, la troisième produisant la chaleur requise par les trois autres.

1ère étape : séchage de la matière pour produire de la vapeur d'eau :

Cette étape se déroule à des températures comprises entre 100°C et 160°C. Sous l'effet de la chaleur, l'eau contenue dans la matière organique s'évapore.

Le combustible carboné résultant est sec et de différentes natures (charbon, biomasse, etc.). Dans le cas de produits non homogènes, une phase préalable (tri, broyage) est nécessaire avant d'introduire cet intrant dans le gazéifieur.

2e étape : pyrolyse des intrants pour obtenir du coke (résidus de carbone) et des gaz de pyrolyse :

Cette étape sans oxygène (anaérobie) se déroule à des températures situées entre 120 °C et 600 °C. Elle est dite « autothermique » car elle ne produit ni ne consomme d'énergie. En augmentant progressivement la température en l'absence d'oxygène, la matière séchée se décompose et les atomes de carbone s'associent entre eux. Il se forme alors :

- du carbone réducteur presque pur (coke ou résidus de carbone) ;
- un mélange de gaz oxydants non-condensables composés majoritairement d'oxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (CH_4) appelés « gaz de pyrolyse » ;

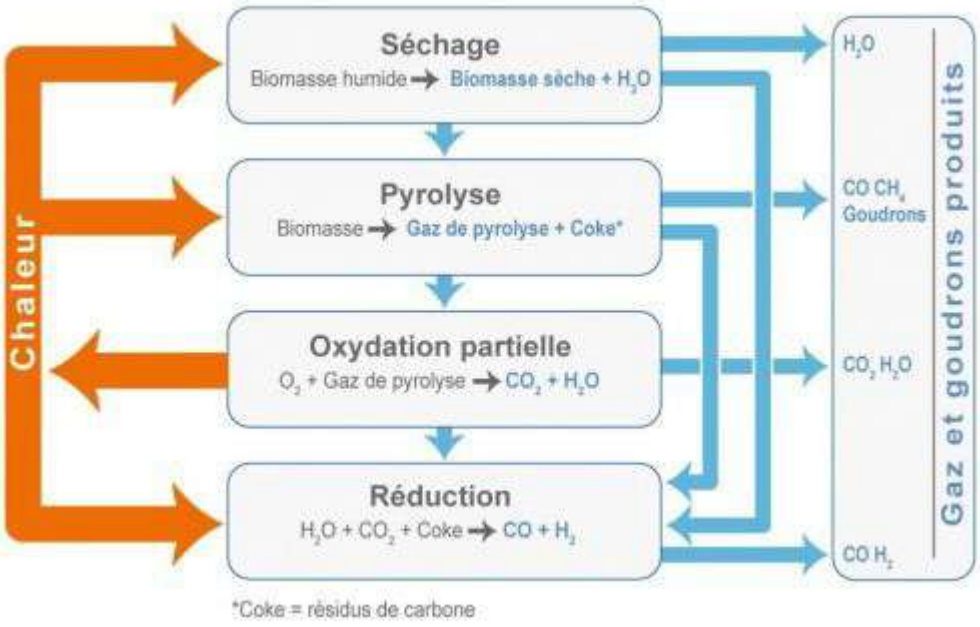
- des goudrons et des matières volatiles condensables issues de vapeurs de composés organiques (acides acétiques, aldéhydes).

3e étape : oxydation des gaz de pyrolyse pour générer une chaleur suffisante à la gazéification:

Cette étape se déroule **en présence d'oxygène** à des températures comprises entre 1 200°C et 1 500°C. Les matières volatiles issues de la pyrolyse s'oxydent. Cette combustion dégage la chaleur nécessaire aux deux étapes précédentes et à l'étape suivante de la gazéification. Elle nécessite un fort apport en oxygène.

4e étape : la réduction ou « gazéification » du carbone pour produire le syngas :

Cette étape se déroule à des températures comprises entre 800 °C et 1200° C. **En l'absence d'oxygène**, le coke obtenu lors de la phase de pyrolyse réduit la vapeur d'eau et le gaz carbonique obtenus dans l'étape précédente respectivement en hydrogène et en oxyde de carbone pour former du syngas, combustible mélangeant en proportions variables CO et H_2.

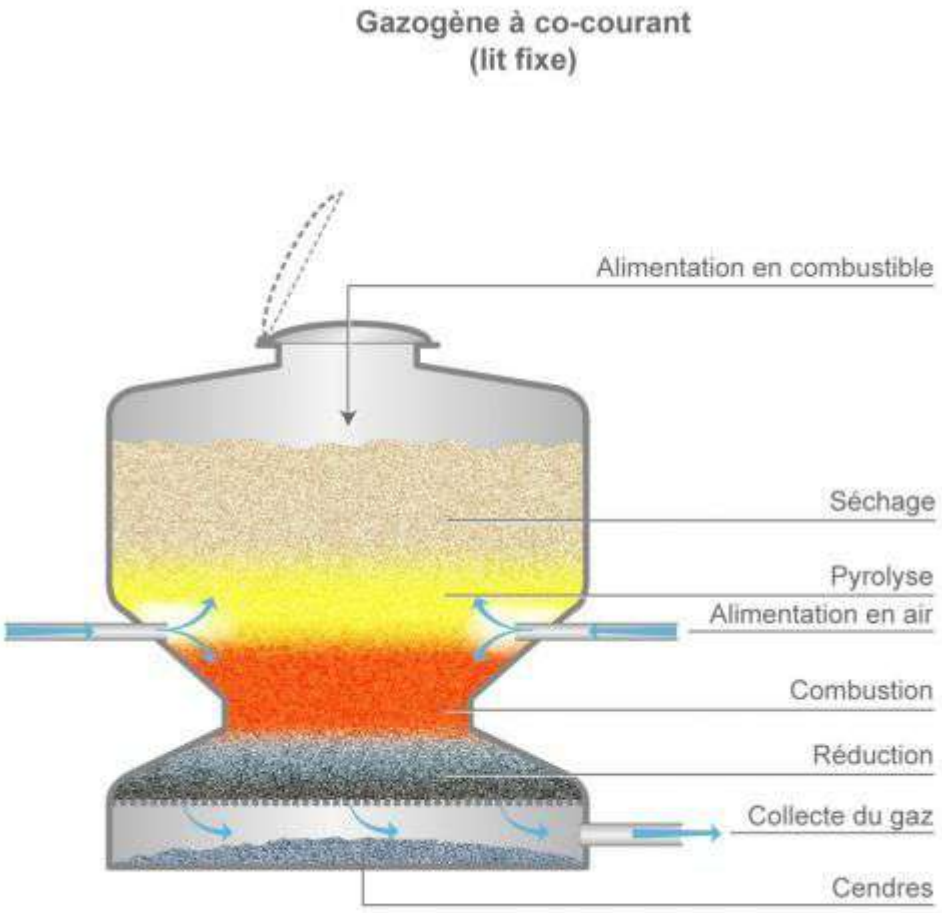


FigureI.2 Schéma derésidus de carbone **[6].**

I.5.3 Les différents procédés de gazéification :

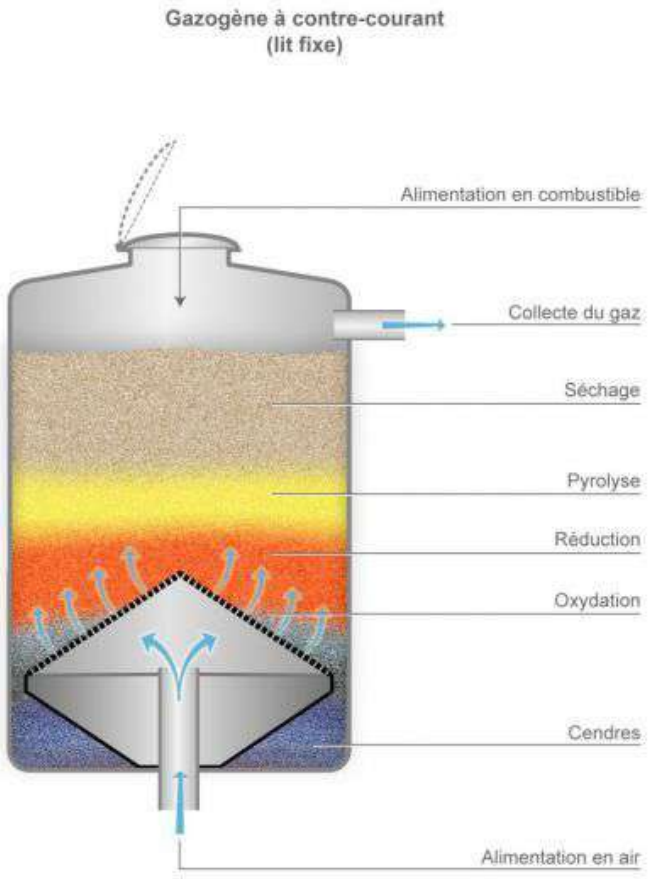
Le choix d'un type de procédé est guidé par la taille de l'installation, le solide combustible carboné utilisé, l'usage du gaz produit et la maturité des technologies :

- **Le procédé à lit fixe**
  Il peut être soit à co-courant soit à contre-courant.
- **À co-courant,** les différentes étapes de la réaction de gazéification sont successivement réalisées de haut en bas dans le réacteur. La matière organique est d'abord introduite à son sommet. De l'air est injecté à mi-hauteur pour amorcer la combustion et fournir de la chaleur à l'ensemble du réacteur. L'augmentation progressive de la température permet d'obtenir les différentes réactions entrainant les gaz produits vers la zone la plus chaude du réacteur. Le syngas est récupéré au niveau du socle du gazéificateur.



FigureI.3 Schéma de gazogéne à co-courant (lit fixe).

- **À contre-courant**, l'air est injecté à la base du réacteur et le syngas est récupéré sous son sommet, au dessus de la zone de pyrolyse. Les goudrons sont moins nombreux à s'échapper du réacteur et l'encrassement des conduits est donc plus limité.



FigureI.4 : Schéma de gazogéne à contre-courant (lit fixe)

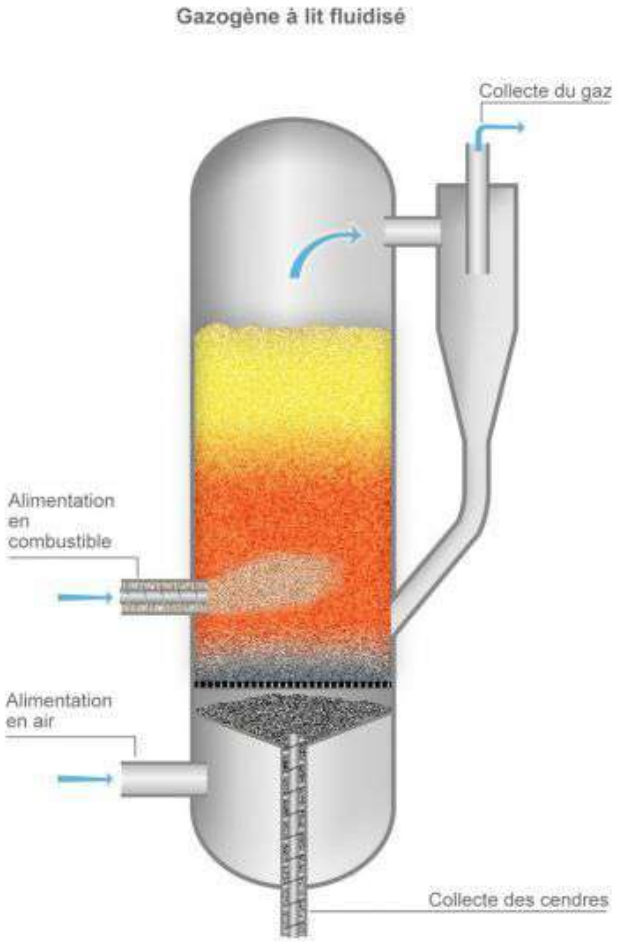
- **Le procédé à lit fluidisé statique**

  Par ce procédé, les particules sont mises en suspension dans le réacteur par injection à sa base d'un gaz qui va « soulever » les grains. Cela favorise les échanges thermiques et massiques entre le gaz et le solide. Dans ce type de réacteur, les différents mécanismes de séchage, pyrolyse, combustion ou oxydation ont lieu dans une seule et même zone.

- **Le procédé à lit fluidisé entraîné**

  Le solide combustible carboné est finement pulvérisé dans un jet d'oxygène. La réaction chimique s'effectue à très haute température et à pression élevée. Cela empêche les goudrons et méthane de se former, les gaz produits en sont ainsi exempts. Le rendement en gaz est donc élevé. Cependant, le procédé à lit fluidisé entraîné nécessite une forte

consommation en oxygène. Par ailleurs, le coût de la pulvérisation préalable du solide combustible carboné est élevé car il faut obtenir une biomasse ou du charbon finement moulu.



FigureI.4 : Schéma de gazogéne à lit fixe fluidisé **[7].**

I.5.4 Enjeux par rapport à l'énergie :

La gazéification peut être utilisée comme une solution de substitut dans plusieurs domaines.

- **La valorisation de la biomasse**
  La technique de gazéification présente un bilan carbone équilibré dans la mesure où elle utilise la biomasse. En effet, dans ce cas, le CO_2 rejeté est celui qui a été absorbé par la photosynthèse ayant produit les végétaux gazéifiés.

- **La valorisation des déchets organiques**

  La gazéification des déchets se pose aujourd'hui en concurrent de l'incinération car elle présente plusieurs avantages par rapport aux procédés classiques :
- l'élimination des produits de combustion est effectuée directement sur le syngas, alors que l'incinération produit un volume de fumée beaucoup plus important ;
- l'énergie électrique peut être fournie à partir de moteurs et de turbines à gaz, qui sont beaucoup moins onéreux et plus efficaces que le cycle de la vapeur utilisé dans les incinérateurs ;
- la conversion chimique du syngas permet de produire des carburants de synthèse, et pas seulement de l'électricité.

- **La gazéification du charbon**

  Comme pour la biomasse, la gazéification du charbon permet de produire du syngas, souvent utilisé pour la production d'électricité par l'action de turbines. Par ailleurs, la liquéfaction indirecte du charbon CTL (Coal To Liquides) par l'intermédiaire de la gazéification du charbon permet d'obtenir des carburants synthétiques.

- **La valorisation des résidus issus du raffinage du pétrole**

  Les résidus issus du raffinage du pétrole comme les goudrons, le coke et l'asphalte peuvent être valorisés par un processus de gazéification. Ils peuvent en effet être, à leur tour, convertis en produits utilisables comme l'hydrogène, la vapeur, l'électricité, l'ammoniac et des produits chimiques.

  Par ailleurs, les boues de raffinerie peuvent, elles aussi, être gazéifiées. Ainsi, intégrée à la raffinerie de pétrole, la gazéification peut constituer une solution aux problèmes environnementaux liés à l'élimination des résidus et des boues. **[8].**

I.5.5 Acteurs majeurs :

L'Europe a une longue expérience de la gazéification héritée des périodes de pénurie en énergie lors des deux guerres mondiales. En France, le projet GAYA associe l'Ademe, le CEA et GDF Suez pour un démonstrateur de production thermochimique d'électricité par bio fuel.

En Afrique, la plupart des gazéifieurs sont situés en Afrique du Sud, où les carburants synthétiques et les produits chimiques sont produis à partir du charbon depuis 1955.

En Amérique du Nord, les produits chimiques, les engrais et l'électricité sont produits par gazéification sur plusieurs sites des Etats-Unis.

En Asie, les installations de gazéification se situent principalement en Inde, en Chine et au Japon. Les pays d'Asie comme la Chine constituent le marché le plus important en termes de capacité installée et de marché potentiel. L'ensemble des pays tropicaux représentent une zone de développement importante qui devrait émerger très rapidement dans les années à venir.

I.5.6 Unités de mesure et chiffres clés :

Selon SFA Pacific Inc, une entreprise américaine spécialisée dans l'évaluation des ressources environnementales, on recense 329 unités de gazéification dans le monde [**9**].Dans l'Union européenne, la « bio-électricité » (issue de biomasse solide ou liquide, de biogaz ou de déchets) a généré, en 2010, 121 TWh (dont 28,6 TWh à partir de biogaz), soit 3,6% de la production électrique totale de l'UE (3 333 TWh)**[08]**.

I.5.7 Passé et présent :

L'histoire de la gazéification commence avec Sir Charles William Siemens en 1868 dans une communication scientifique faite à Londres. Mendeleïev, un chimiste russe, reprend le principe de gazéification vingt ans plus tard. En 1912, une première expérience dans une mine est organisée. À la suite de cette expérience, des résultats encourageants sont obtenus mais les travaux sont interrompus par la Première Guerre mondiale. De 1933 à 1940, des essais commencent en Union soviétique dans cinq stations expérimentales. Mais quelques années plus tard, ces essais sont interrompus par la Deuxième Guerre mondiale.

La diffusion des résultats obtenus en URSS entraîne une prolifération d'expériences un peu partout dans le monde : États-Unis, Grande-Bretagne, Italie, Maroc, Belgique, etc. Cette fièvre retombe toutefois dans les années 1960 face à l'afflux de gaz naturel et de pétrole peu cher en provenance du Moyen-Orient et provoque un effondrement des prix sur le marché de l'énergie. Après cette période d'interruption, les essais reprennent aux États-Unis et en Europe à la suite des deux chocs pétroliers. Entre 1975 et 1990, la gazéification retrouve une croissance importante après l'embargo de 1973. Depuis les années 1990, les gouvernements américain et européens apportent une aide financière aux projets de gazéification.

I.5.8 Futur :

Malgré les atouts qu'elle présente, la gazéification reste encore peu développée dans le monde, ce qui peut s'expliquer par plusieurs raisons :

- l'approvisionnement en matières organiques doit être continu et homogène. C'est en pratique difficilement réalisable, même si les ressources sont censées être abondantes ;
- pour des raisons de rentabilité économique et d'efficacité énergétique, la distance qui sépare les ressources des unités de gazéification ne doit pas dépasser 50 kilomètres ;
- la technique de gazéification ne suscite pas encore un intérêt suffisant de la part des professionnels ou des acteurs privés susceptibles d'assurer le développement de ce procédé. Elle reste encore mal connue.

L'industrialisation et la structuration du marché de la gazéification nécessitent encore des efforts de financement de programmes de recherche, par les gouvernements notamment. En outre, la gestion des déchets étant du ressort des pouvoirs publics, le choix de la gazéification plutôt que de l'incinération ne peut qu'émaner d'une volonté politique forte. Enfin, une implication plus marquée de grands acteurs du secteur privé reste nécessaire pour stimuler le développement de la filière**[9].**

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LA COMBUTION ET LES FLAMMES.

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse au phénomène physique de la combustion et aux processus de la formation et du développement des flammes.

II.2 Définition de la combustion :

La combustion est une réaction d'oxydoréduction irréversible et fortement exothermique. Le réducteur est appelé le combustible et l'oxydant le comburant. Elle se manifeste sous forme de zones de réaction séparant le combustible et le comburant. Ces zones réactionnelles sou flammes peuvent être de deux types. Quand la combustion est contrôlée par la diffusion entre réactifs, i.e., quand la combustion se produit en même temps que le mélange entre le combustible et le comburant, on a une flamme de diffusion. Quand le comburant et le combustible sont déjà intimement mélangés, lorsque la combustion a lieu, on a une flamme de prémélange. Or, on peut considérer que la flamme de diffusion est un ensemble de flammes de prémélange infinitésimales d'où l'importance de la compréhension des flammes de prémélange pour l'ensemble des types de combustion **[10] ,**la figure **II.1**présente les types de combustions avec leurs régimes d'écoulement.

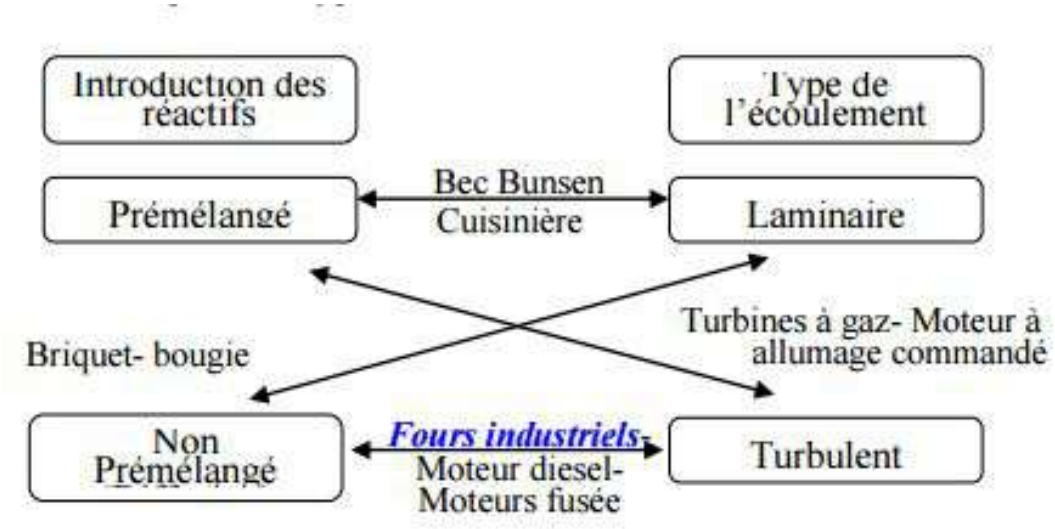


Figure II.1 les différents types de combustion et régimes d'écoulement **[11].**

On peut encore définir la combustion comme étant l'emballement d'une réaction' oxydoréduction, rendue possible par des conditions adéquates de pression, température, composition des réactifs…, contrôlée par des phénomènes physiques comme les transferts de masse et de chaleur.

Deux phénomènes essentiels se déroulent pendant la combustion : l'auto-inflammation et la propagation qui est la conséquence de l'auto-inflammation. L'auto-inflammation se produit lors que la température, la pression et la composition des réactifs atteignent un seuil critique.

Elle est la première manifestation de la combustion. Quant à la propagation dans le reste du mélange, elle apparaît après que l'auto-inflammation a été déclenchée. Pour que la propagation puisse s'installer, il faut que les trois paramètres de pression, température et composition du mélange soient en même temps supérieurs à un seuil critique. Certains phénomènes de parois et de coincement peuvent empêcher la propagation.

Dans un phénomène de combustion, les corps présents sont les suivants :

- Le combustible
- Le comburant
- Le produit de combustion

Le triangle du feu sous dessus représente les trois facteurs doivent être réunis pour que la combustion ait lieu :



Figure II.2 : Triangle du feu **[12].**

II.3 Modes de combustion élémentaires :

II.3.1 La combustion pré-mélangée :

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 et très nocif dont on veut limiter la production comme le montre le tableau II.1.

En contrepartie, les flammes obtenues sont souvent difficiles à maîtriser, nécessitant l'utilisation de dispositifs complexes d'accrochage de flamme.

II.3.2 La combustion non pré-mélangée :

C'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 l'inconvénient de former plus de polluants, du fait des hautes températures atteintes dans le front de flamme.
Il en résulte que le développement des flammes de diffusion est commandé essentiellement par des facteurs aérodynamiques et l'aspect chimique lié à la nature des réactifs reste secondaire. **[12]**

II.3.3 La combustion partiellement pré-mélangée :

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 pré-mélangé se mélangent avant d'atteindre le front de flamme. Ainsi le mode de combustion n'est plus non pré-mélangé mais partiellement pré-mélangé. **[13].**

Mode de combustion	Avantages	inconvénients
Pré-mélangé	Peu polluant (en régime pauvre)	Instabilité de combustion, stockage du mélange
Non pré-mélangé	Stabilité de la flamme, stockage du carburant en dehors des limites de flamme abélite	Production d'oxydes d'azote
Partiellement pré-Mélangé	Peu polluant (en régime pauvre), stockage du carburant en dehors des limites de flamme abélite	Instabilité de combustion, hétérogénies de mélange

Tableau II.1: Avantages et inconvénients principaux des trois modes de combustion.

II.4 La combustion turbulente :

Dans un foyer, l'écoulement est turbulent, c'est à dire que les vitesses des gaz, mesurées en un point fluctuent 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.

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.

II.4.1 La combustion turbulente non pré-mélangée (diffusion) :

La description des différents régimes de flammes de diffusion turbulentes se fait par des paramètres physiques qui sont : les échelles caractéristiques et les nombres adimensionnels. Dans le cas d'une flamme de diffusion, on ne peut pas définir une vitesse et une épaisseur de flamme ; ces notions dans une flamme de diffusion n'ont pas de sens physique ; en effet, on peut obtenir plusieurs vitesses de flammes de diffusion dans la même configuration **[14].**

II.5 Applications industrielles de la combustion turbulente :

Une première grande catégorie de dispositifs concerne les moteurs, qui doivent propulser divers véhicules (avions, fusées, bateaux, automobiles,…) grâce à l'énergie thermique que la combustion peut libérer.la deuxième catégorie ci les brûleurs sont les autres dispositifs industriels utilisant la combustion, qui sont utilisés dans des foyers, des fours, ou des chaudières, la dernière catégorie de situations industrielles, ou naturelles, dans la quelles la combustion turbulente joue un rôle prépondérant ci les incendies et explosions**[15].**

II.6 Les trois catégories de la combustion :

Selon la nature du combustible, on peut rencontrer :

- Combustions solides
- Combustions liquides
- Combustions gazeuses

II.7 Généralités sur les flammes :

Les phénomènes physiques ayant lieu dans les chambres de combustion des turbines à gaz ou des moteurs à combustion interne sont complexes. La flamme est soumise simultanément à l'effet de la turbulence, de la pression, des transferts thermo-diffusifs avec son environnement (gaz brûlés, parois de la chambre de combustion), ... Le rendement de ces dispositifs est donc étroitement lié aux paramètres physico-chimiques des mélanges utilisés (composition, diffusivités thermiques et moléculaires, viscosité…). Pour appréhender l'ensemble de ces phénomènes, il est indispensable de caractériser séparément l'influence de chacun sur les grandeurs caractéristiques de la flamme.

II.7.1 Types des flammes :

Deux types de flammes peuvent être distingués , figure II.3 :

- les flammes de « prémélange »
- les flammes de « diffusion ».

Dans le cas des flammes prémélangées, le mélange de comburant et de combustible est réalisé avant passage de la flamme (dans le cas d'un tube ou d'un brûleur par exemple). Dans les flammes de diffusion, le mélange de comburant et de combustible se fait par diffusion, en sens contraires, du comburant et du combustible vers la zone réactionnelle (dans le cas d'une Bougie par exemple) **[16].** L'observation de l'existence de deux régimes a été faite sur toute circonstance d'écoulement. Le régime à vitesse modérée est dit laminaire tandis que l'autre est dit turbulent, pour marquer le fait d'un brassage du fluide qui se superpose au mouvement principal**.** Dans un écoulement laminaire deux particules fluides voisines à un instant donné restent voisines
aux instants suivants. En d'autres circonstances (avec une vitesse des gaz plus élevée) l'écoulement peut devenir turbulent, c'est-à-dire sans organisation apparente **[16].**

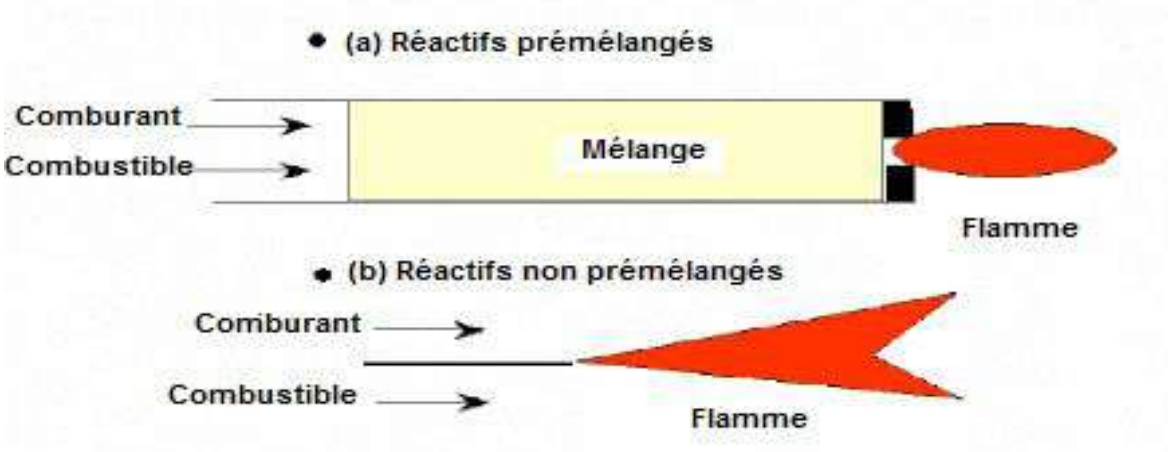


Figure II.3 .Schémas d'une flamme de prémélange (a) et flamme de diffusion (b).

II.7.2 Régime de propagation des flammes :

Lorsqu'on apporte de l'énergie à un mélange gazeux susceptible de s'enflammer, on obtient une zone réactionnelle très étroite et généralement lumineuse au sein du mélange. Cette zone qui constitue le front de flamme est le siège des réactions de combustion. Selon les conditions initiales (pression, composition, température initiale du mélange ou encore énergie minimale d'inflammation), et des conditions de propagation, cette zone réactionnelle peut se propager suivant deux modes différents, la déflagration ou la détonation.

- **Déflagration :** La déflagration est un mode de propagation subsonique. Dans le cas des flammes laminaires aussi bien que dans certains cas des flammes turbulentes, la propagation de la flamme résulte à la fois de la diffusion de la chaleur depuis les gaz frais vers les gaz brûlés ainsi que de la diffusion des espèces actives. Ainsi la propagation de la flamme repose sur un mécanisme de diffusion à la fois thermique et massique. La déflagration est donc constituée d'une zone de combustion d'épaisseur non négligeable et d'une onde de pression qui se propage en amont de celle-ci dans tout le domaine. Cette onde de pression, qui induit de faibles augmentations de la pression du mélange combustible, possède une vitesse sonique tandis que le front de combustion se propage à une vitesse nettement subsonique. A titre d'exemple, la vitesse de propagation d'une flamme d'hydrogène en déflagration varie entre 0,5 et 3 m/s. Lorsque l'on observe la propagation dans un tube cylindrique et en régime laminaire, la zone réactionnelle sépare à un instant donné les gaz frais des gaz brûlés comme le montre la figure II.4

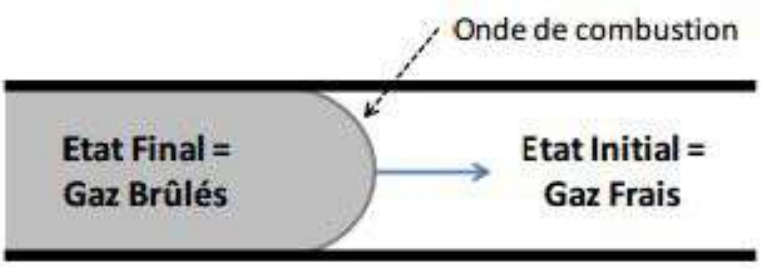


Figure II.4 Représentation schématique d'une onde de déflagration se déplaçant dans un tube. L'onde de combustion porte les gaz d'un état initial à un état fin.

- **Détonation :** Contrairement à la déflagration, la détonation se caractérise par une vitesse de propagation du front de flamme supersonique responsable d'une surpression très importante. Elle est considérée comme une discontinuité monodimensionnelle stationnaire séparant les gaz frais des gaz brûlés (zone réactionnelle infiniment mince) avec une célérité constante indiqué dans la figure II.5. La vitesse de propagation de l'onde de détonation est constante et supersonique (de l'ordre de 2000 m/s), Elle dépend de la nature et de la composition du mélange gazeux ainsi que des conditions initiales de température et de pression **[17].**

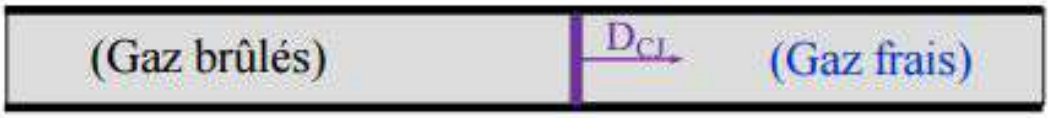


Figure II.5 : Représentation Schématique de la détonation.

- **Transition Déflagration-Détonation :** Dans le cas d'une inflammation provoquée par une faible source d'énergie, la flamme se propage en régime subsonique, mais la vitesse n'est pas constante. Pour certains gaz en fonction de l'encombrement et de la géométrie de l'enceinte dans laquelle la flamme se propage, sa vitesse peut augmenter et devenir supersonique on assiste alors à une transition de la déflagration vers la détonation.

II.7.3 Instabilité des flammes :

Plusieurs phénomènes différents peuvent être à l'origine d'instabilités au sein de la flamme. Ces instabilités sont de trois types :

- **Les instabilités de gravité (Rayleigh-Taylor) :** ce sont des instabilités de gravité qui correspondent à une instabilité de l'interface (le front de flamme) séparant deux fluides de densités différentes. Il en résulte une poussée du fluide le plus lourd (les gaz frais) sur le fluide le plus léger (les gaz brûlés).
- **Les instabilités Hydrodynamique :** appelées aussi instabilités de Darrieus-Landau, elles correspondent à une instabilité intrinsèque de la flamme du fait de l'expansion thermique du mélange gazeux lors de la traversée du front de flamme, siège d'un fort gradient de température. Cette instabilité peut donner lieu à un plissement de la flamme et donc à une augmentation de sa surface, et peut également conduire à son accélération
- **Les instabilités Thermo diffusives :** sont dues à la présence d'effets diffusifs dans la direction tangente au front de flamme (une diffusion thermique α et une diffusion moléculaire D, liées

par le nombre de Lewis Le = α/D). Si Le est inférieur à 1, la diffusion moléculaire est prépondérante, provoquant une augmentation de l'amplitude du plissement de la flamme à l'origine de son instabilité. Des cellules de plus en plus grandes se créent sur le front de flamme et la font s'accélérer. Si L'est supérieur à 1, la diffusion thermique est prépondérante, provoquant une diminution de l'amplitude du plissement de la flamme et permettant sa stabilisation. Enfin, si Le est égal à 1, les deux phénomènes de diffusion se compensent et stabilisent le front de flamme.

Les flammes sujettes à ces instabilités vont donner lieu à des flammes étirées **[18].**

CHAPITRE III : PRESENTATION DU COMSOL MULTIPHYSIQUES.

III.1 Introduction :

Dans le 3eme chapitre nous allons présenter le CODE COMSOL MULTIPHYSIQUES, et ses paramètres.

On simule la combustion turbulente du gaz de synthèse dans un simple brûleur à jet rond. Le modèle est résolu par COMSOL Multiphysics en combinant une interface de réaction du flux et du transfert de chaleur dans les fluides.

III.2 Définition du COMSOL Multiphysiques :

COMSOL Multiphysics est une plate-forme logicielle générale basée sur la méthode des éléments finis et qui permet la modélisation et la simulation des phénomènes physiques à l'aide de méthodes numériques avancées.

COMSOL Multiphysics offre la possibilité de coupler des physiques "simples" ou d'étudier des phénomènes multiphysiques.

Ainsi, pour étendre les simulations possibles, COMSOL Multiphysics comprend plus de 30 modules complémentaires qui offrent des interfaces et des outils spécialisés en génie électrique, mécanique, fluidique et chimique. De plus, des interfaces bidirectionnelles relient les simulations réalisées dans COMSOL Multiphysics à des logiciels tiers de calcul, de CAO (CAD) et de CAOE (ECAD) **[19].**

III.2.1 Présentation de l'interface :

L'interface de COMSOL est constituée de :

- Une barre d'outils d'accès rapide : ou différents raccourcis de fonctionnalités peuvent être ajoutées montrée dans la figure III.1.
- Un ruban de fonctions : incluant le model, les définitions, la géométrie, les matériaux, les modules des phénomènes physiques, le calcul et les résultats.
- Le constructeur du model étudié : c'est un ensemble de racines d'options de chaque module peut être ajouté, modifié, désactivé ou supprimé.
- La fenêtre des options : interactive, elle change à chaque fois qu'une racine est sélectionnée.

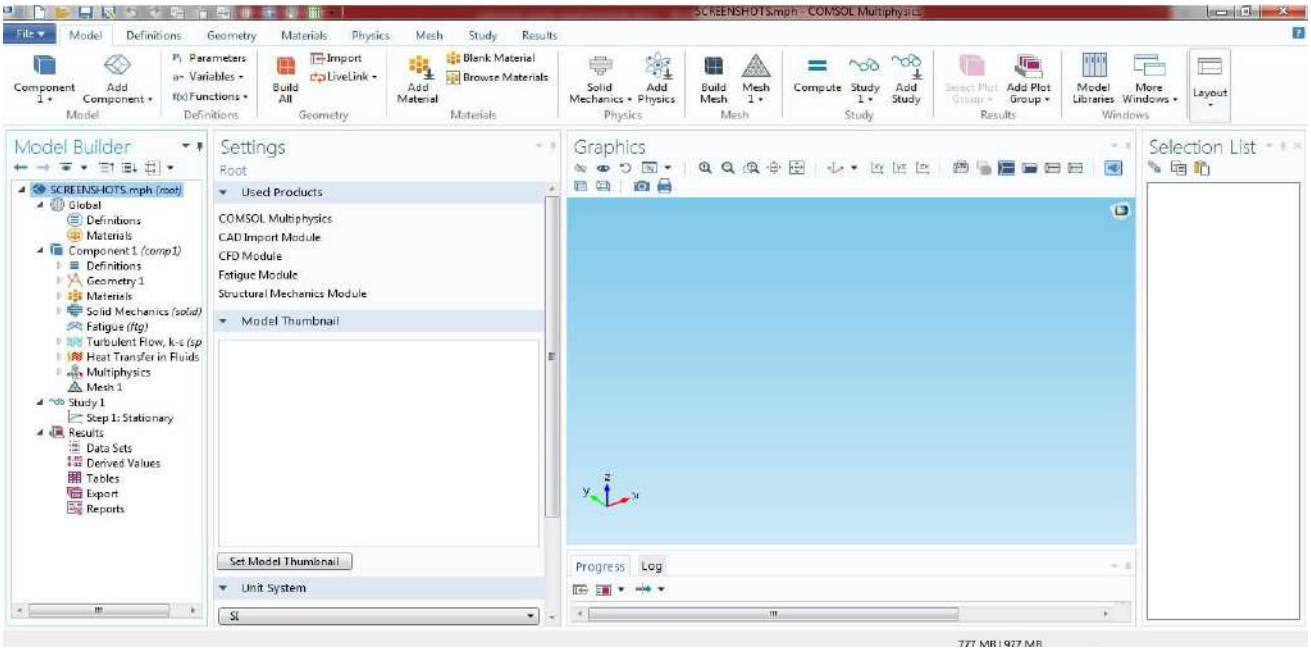


Figure III.1:Capture d'écran de l'interface du logiciel COMSOL Multiphysics.

III.2.2 Choix des modules :

Lors de la création d'un nouveau modèle, on sélectionne le type de géométrie (0D, 1D, 1D asymétrique, 2D, 2D axisymétrique ou 3D). Puis vient la phase de sélection des modules physiques. Dans la présente étude nous allons modéliser différents phénomènes :

- Le flux de vapeur à l'intérieur du condenseur qui va nous donner la distribution de la température et qui servira à calculer les contraintes thermiques.
- Les modes propres de vibration du condenseur, qui vont nous aider dans le calcul sous spectre à définir les fréquences de résonnance que l'on risque d'atteindre.
- La fatigue thermomécanique du matériau sous les conditions extrêmes calculées par les précédentes simulations.

Dans de tels cas, le module « Multiphysics » est incontournable car il permet de combiner les effets de tous les modules dans le même calcul.

III.2.3 Régimes transitoire, stationnaire, fréquentiel et cyclique :

Après sélection des modules physiques, plusieurs cas d'étude sont possibles. L'étude en régime stationnaire, transitoire, fréquentiel ou le calcul des harmoniques.

Dans notre étude nous avons trois calculs à faire et donc trois mode d'étude :

- Régime stationnaire : pour le flux de vapeur parce que l'écoulement turbulent est complexe et nos moyens matériels de calcul nous limitent à ce niveau. Mais surtout, parce

que le régime stationnaire est assez représentative et c'est celui qui dure le plus longtemps et donc a le plus d'influence.

- Calcul des harmoniques : pour les modes propres et les fréquences de résonnance de vibration
- Calcul en mode cyclique : pour la fatigue.

Des modes combinés sont aussi disponibles comme l'analyse « précontrainte, fréquences propres » qui est utilisée pour calculer les fréquences et les modes propres qui sont influencés par un chargement statique. Elle consiste en deux étapes : une étude en régime stationnaire suivie par une étude en régime de fatigue **[20].**

III.2.4 Géométrie :

COMSOL Multiphysics propose des outils de modélisation géométrique en 1D, 2D et 3D, à partir d'un moteur géométrique COMSOL natif. Différentes primitives sont disponibles et il est également possible d'extruder des objets géométriques 2D en 3D comme le montre la figure III.2.

De plus, une révolution ou une extrusion peut être appliquée aux objets en 2D le long de courbes paramétrées. Les opérations booléennes (union, différence ou intersection par exemple) permettent de créer des formes plus complexes impliquant des ensembles de solides, de surfaces, de courbes et de points. Les fonctions de modélisation à main levée font appel aux surfaces et aux courbes paramétrées, ainsi qu'aux courbes interpolées. Les opérations géométriques sont toujours organisées selon une séquence dans l'arborescence du modèle.

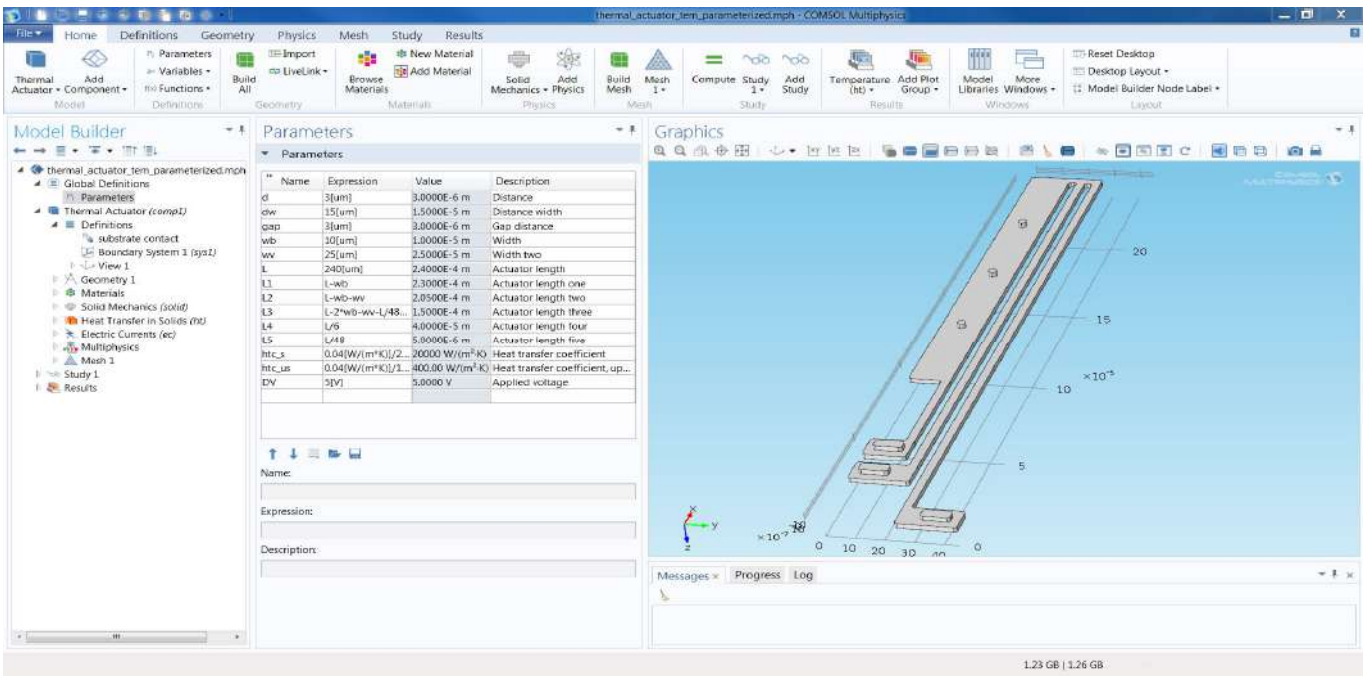


Figure III.2 : Capture d'écran de la Géométrie du logiciel COMSOL Multiphysics.

III.2.5 Physique :

Les phénomènes physique intervenants sont sélectionnés et ajoutés. Chaque module physique est décrit par des équations dont une décrivant le mieux le système. Aussi, plusieurs options et paramètres peuvent être ajoutés pour introduire les conditions initiales et les conditions aux limites.

III.2.6 Multiphysics :

C'est l'un des modules les plus importants, il permet la combinaison des équations des modules physiques. D'un point de vu MEF (Méthodes des Eléments Finis), il assemble un système matriciel à plusieurs dimensions selon l'interdépendance des paramètres calculés.
Par exemple, si nous avons à calculer une distribution de températures qui dépendent elles-mêmes d'un calcul électrique, une dimension est ajoutée à la matrice pour calculer la solution d'un système « local » pour chaque température.

III.2.7 Maillage :

COMSOL Multiphysics propose des outils de maillage automatique et semi-automatique, dont le maillage tétraédrique libre et le maillage extrudé. L'algorithme par défaut génère automatiquement un maillage tétraédrique pour les solides, et une combinaison maillage tétraédrique-maillage extrudé pour les fluides. L'utilisateur peut également définir une séquence de maillage pour contrôler la séquence de création du maillage. Une séquence de maillage permet d'utiliser conjointement des éléments tétraédriques, prismatiques ou hexaédriques et elle peut être pilotée par paramètres, figure III.3.

De plus, l'import d'un maillage dans le format NASTRAN prend également en charge les éléments pyramidaux. Une fois le maillage importé au format NASTRAN, d'autres opérations basées sur les coordonnées peuvent être exécutées pour le raffiner au niveau du domaine, de la frontière et de l'arête.

L'approche multiphysique de COMSOL consiste à séparer la forme de la géométrie (en 3D : tétraédrique, prismatique, hexaédrique, pyramidale) des éléments finis à l'aide des «fonctions de forme des éléments finis». Cette façon de procéder garantit une flexibilité maximale. Chaque forme géométrique utilise des fonctions de forme du premier, du deuxième ou du troisième ordre, voire dans certains cas d'ordre supérieur, pour assurer la correspondance avec, respectivement, les éléments finis linéaires, quadratiques ou cubiques traditionnels. La physique utilise pour la

plupart les éléments finis de Lagrange (ou éléments finis nodaux iso paramétriques): transfert de chaleur, mécanique des structures ou électrostatique, notamment.

La CFD utilise également des éléments spécialisés et des schémas de stabilisation numérique. L'électromagnétisme 3D fait appel à des éléments rotationnels de différents ordres (connu aussi sous le nom d'éléments d'arête ou vectoriel).

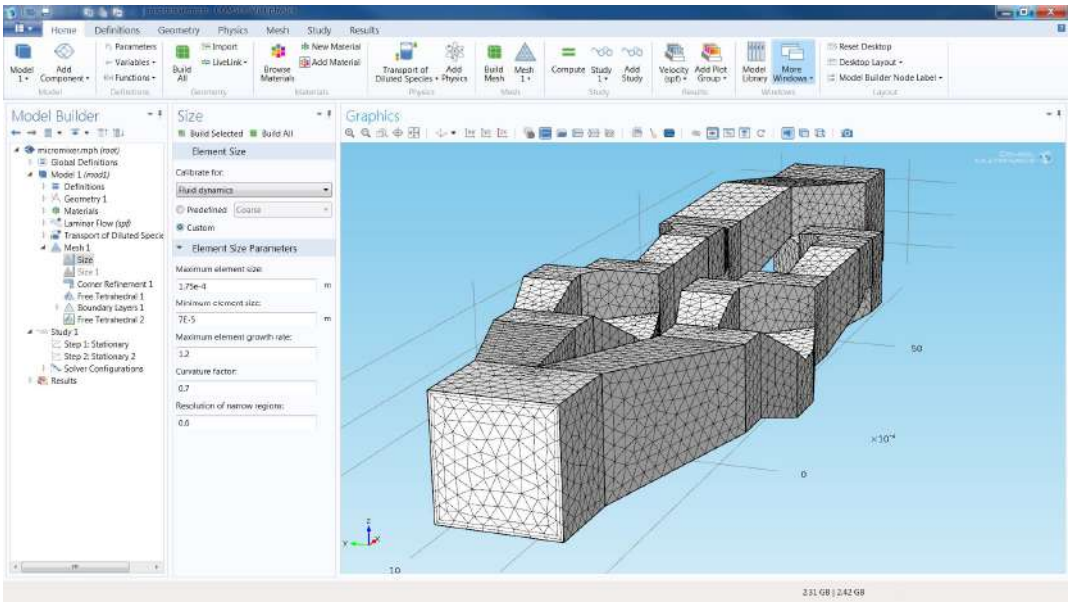


Figure III.3 : capture d'écran de Maillage du logiciel COMSOL Multiphysics.

III.2.8 Paramètres :

COMSOL crée des séquences afin de consigner toutes les étapes qui interviennent dans la création de la géométrie, du maillage, des études et de la configuration des solveurs, de la visualisation et de la présentation des résultats. Il est donc facile de paramétrer toute partie du modèle, puisqu'il suffit de changer un nœud dans l'arborescence du modèle et de relancer l'exécution des séquences. Le programme mémorise et applique une nouvelle fois toutes les autres informations et données du modèle indiquées dans la figure III.4. Par ailleurs, la géométrie et les paramètres de simulation sont liés par une connexion associative. Autrement dit, tout changement de la géométrie est propagé automatiquement à l'ensemble du modèle. Si vous préférez un environnement piloté par commandes, vous pouvez exécuter COMSOL Multiphysics en mode batch.

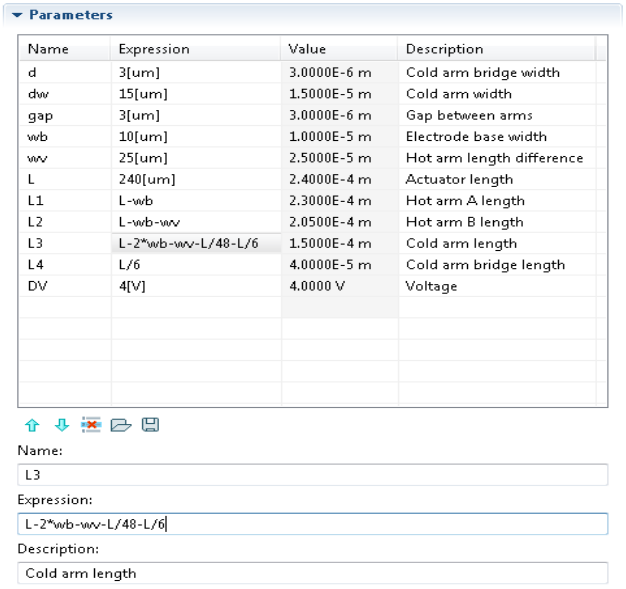


Figure III.4 : capture d'écran des Paramètres du logiciel COMSOL Multiphysics.

III.2.9 Calcul :

C'est l'étape finale du calcul en éléments finis. C'est là que les quadratures sont calculées, que le système discret est écrit sous forme matricielle et qu'il est résolu, figure III.5. Le logiciel utilise par défaut un algorithme basé sur la méthode de décomposition LU pour résoudre les systèmes matriciels, mais il est possible de sélectionner d'autres solveurs directs ou itératifs.

Le calcul ne fait que résoudre le système itératif. Il ne calcul donc que les paramètres des fonctions des modules physiques. Si par exemple nous voulons calculer un gradient à partir de la solution, l'opération s'effectue au niveau du traitement des résultats

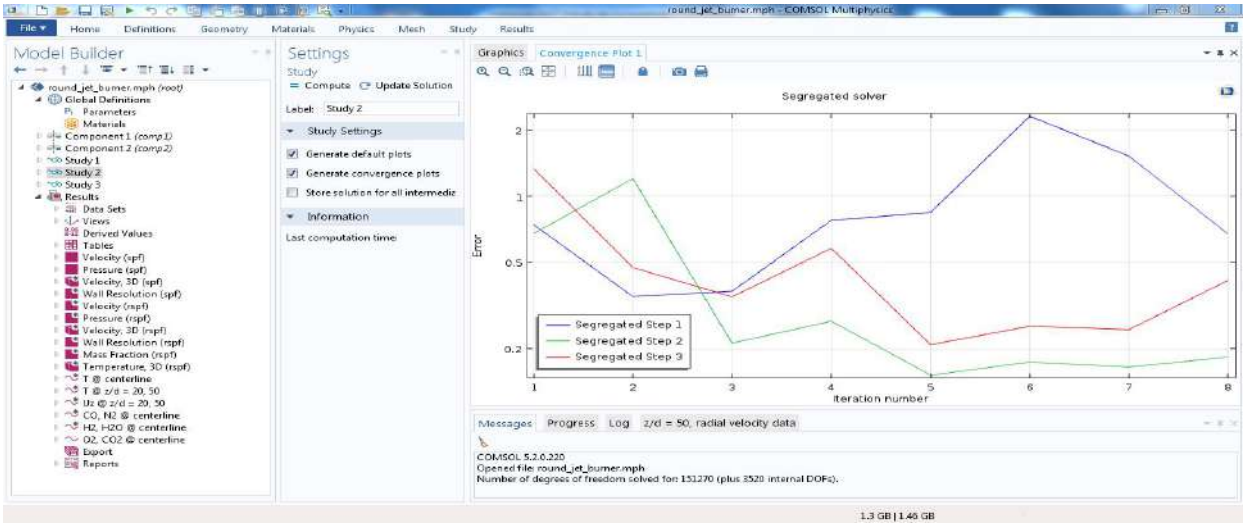


Figure III.5 : capture d'écran de Calcul du logiciel COMSOL Multiphysics.

III.2.10 Visualisation et post-traitement des résultats :

Les fonctionnalités de visualisation comprennent différents types de graphiques dont les tracés de surface, en coupe, en iso surface, en flèche et en ligne de courant. Loin de se limiter aux quantités intégrées, la visualisation peut être étendue par l'utilisation de quantités physiques composites. Il suffit alors d'entrer les expressions mathématiques dans les variables de champs inconnus, ainsi que leurs dérivées. Il est ainsi possible de visualiser toutes les quantités qui présentent un intérêt pour les résultats de la simulation comme le montre la figure III.6. COMSOL Multiphysics propose également toute une gamme d'outils de post-traitement pour l'évaluation et l'intégration. Ces outils permettent de calculer la valeur maximale, minimale, moyenne ou intégrée de toute quantité ou de quantités composites, dans un volume, sur une surface, le long d'une arête incurvée et au niveau d'un point.

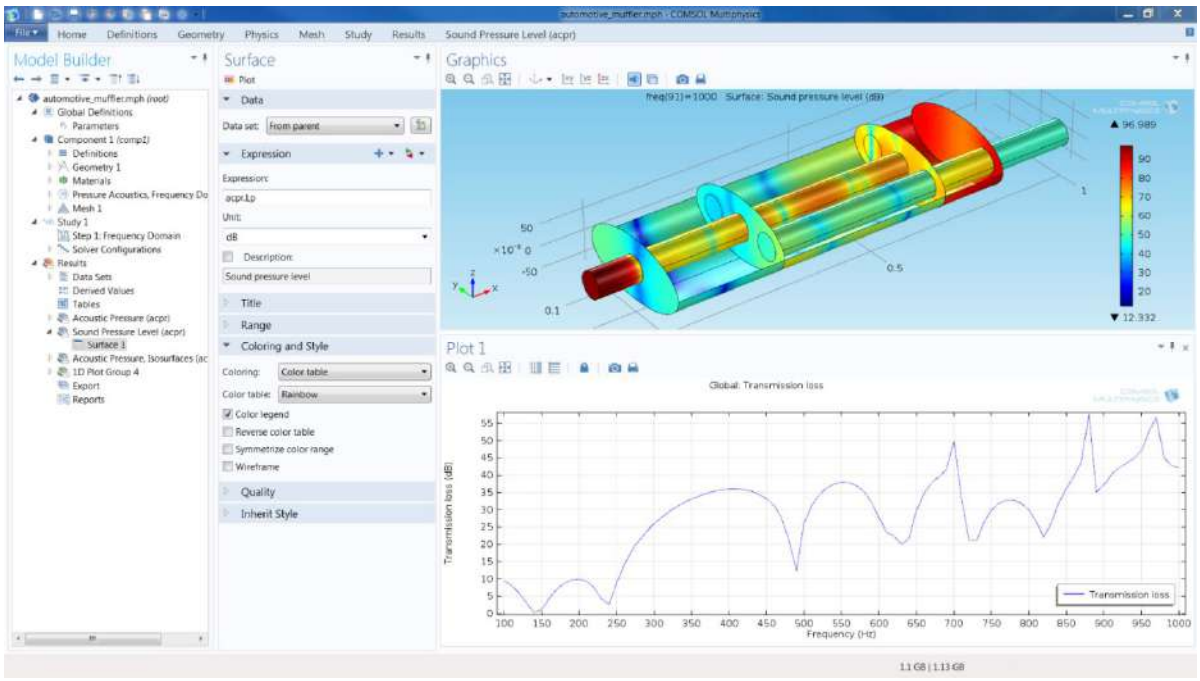


Figure III.6 : capture d'écran de Visualisation et Post-traitement des Résultats du logiciel COMSOL Multiphysics **[19].**

III.2.11 Affichage et export des résultats :

Tous les calculs sont illustrés sous formes de graphes, tableaux, nuages de points, surfaces iso-paramétriques …etc, ceci est montré dans la figure III.7. Les résultats peuvent être exportés directement sous formes de tableaux de données, de photos, vidéos …etc. ou alors être traités par des relations mathématiques pour ensuite être exportées.

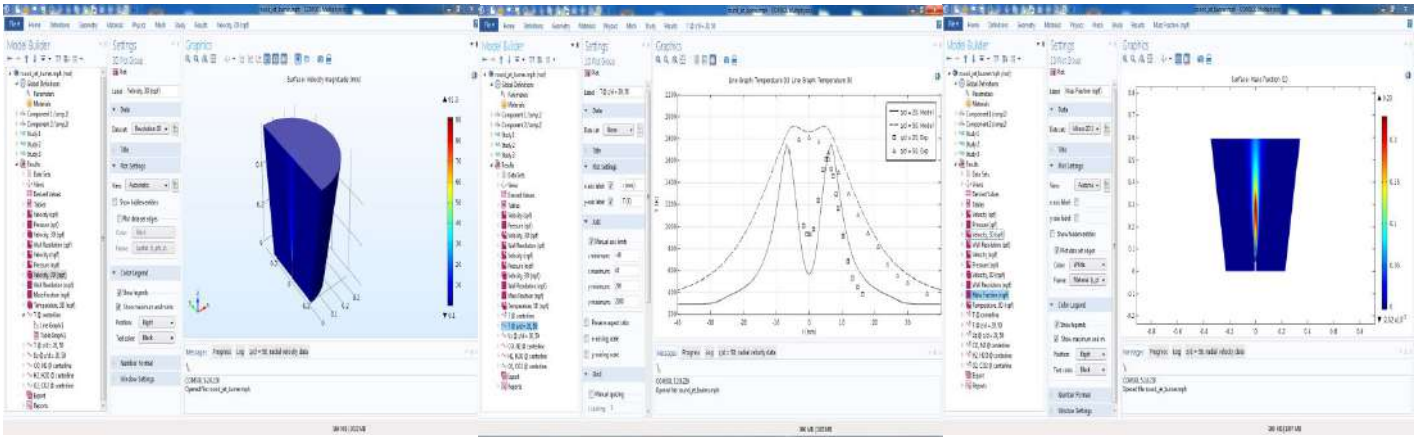


Figure III.7 : capture d'écran des Résultats du logiciel COMSOL Multiphysics.

III.3 Combustion de gaz de synthèse dans un brûleur à jet rond :

III.3.1 Introduction :

La configuration du modèle correspond à celle étudiée par Couci et al **[21].** La température et la composition résultant de la combustion non prémélangée dans la configuration du brûleur ont également fait l'objet d'une étude expérimentale par Barlow et collègues **[22.23]** dans le cadre de l'Atelier international sur la mesure et le calcul des flammes non mélangées turbulente.

III.3.2 Définition du modèle :

Le brûleur étudié dans ce modèle consiste en un tuyau droit, placé dans un léger co-écoulement. Le carburant en phase gazeuse est alimenté à travers le tuyau en utilisant une vitesse d'entrée de 76 m / s, tandis que la vitesse de co-écoulement à l'extérieur du tuyau est de 0,7 m / s. Au niveau de la sortie du tuyau, le gaz combustible se mélange au co-écoulement, créant ainsi un jet circulaire non confiné. Le gaz introduit dans le tube se compose de trois composés typiques du gaz de synthèse; Le monoxyde de carbone (CO), l'hydrogène (H_2) et Azote (N_2). Le gaz de co-écoulement est constitué d'air. A la sortie du tuyau, le carburant est allumé. Le combustible et l'oxydant entrent dans la zone de réaction séparément, la combustion résultante est du type non prémélangé. Une réaction continue exige que les réactifs et l'oxydant soient mélangés à des conditions stœchiométriques. Dans ce montage, le flux turbulent du jet mélangera efficacement le combustible du tuyau avec l'oxygène co-écoulant.

En outre, le mélange doit être allumé en permanence. Dans ce brûleur, les petites zones de recirculation générées par l'épaisseur de la paroi du tube fournissent le moyen de décélérer le gaz produit chaud. Les zones de recirculation favorisent de ce fait l'allumage continu du mélange qui se

rapproche et stabilisent la flamme à l'orifice de la conduite. Dans les expériences **[24]**, on n'a pas observé de décollage ou d'extinction localisée de la flamme.

Dans le modèle actuel, la combustion de gaz de synthèse est modélisée en utilisant deux réactions irréversibles:

$$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 \quad (1)$$

$$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O \quad (2)$$

Cette hypothèse d'oxydation complète du combustible correspond à l'une des approches utilisées **[21]**. Le transport de masse dans le jet réactif est modélisé en résolvant pour les fractions de masse de six espèces; Les cinq espèces participant aux réactions et le N_2 azoté originaire de l'air coulant.

Le nombre de Reynolds pour le jet, basé sur la vitesse d'entrée et le diamètre intérieur du tuyau, est approximativement 16700, indiquant que le jet est complètement turbulent. Dans ces conditions, les processus de mélange et de réaction dans le jet sont fortement influencés par la nature turbulente du flux. Pour tenir compte de la turbulence lors de la résolution du champ d'écoulement, on applique le modèle de turbulence k-ω

Profitant de la symétrie, un modèle bidimensionnel utilisant un système de coordonnées cylindriques est résolu.

III.3.3 Réaction turbulente :

Lors de l'utilisation d'un modèle de turbulence dans une interface de Réaction Flow, la vitesse de production (kg / (m3 • s)) de l'espèce i résultant de la réaction j est modélisée comme étant le minimum de la vitesse de réaction de la valeur moyenne-fermeture et la vitesse de dissipation- Taux de modèle:

$$R_{ij} = \nu_{ij} M_i \cdot \min\left[r_{\mathrm{MVC},j}, r_{\mathrm{ED},j}\right] \quad (3)$$

Le taux de fermeture de la valeur moyenne est la vitesse de réaction cinétique exprimée en utilisant les fractions massiques moyennes. Ceci correspond à la vitesse de réaction caractéristique pour les réactions qui sont lentes par rapport au mélange turbulent, ou la vitesse de réaction dans des régions avec des niveaux de turbulence négligeables. Ceci peut être quantifié à travers le nombre de Damköhler, qui compare l'échelle de temps turbulent (τ_T) à l'échelle de temps chimique (τ_C). La valeur moyenne de fermeture est appropriée pour les nombres de Damköhler faibles:

$$\mathrm{Da} = \frac{\tau_T}{\tau_c} \ll 1$$

La vitesse de réaction définie par le modèle de dissipation par tourbillons **[25]** est:

$$r_{\mathrm{ED},j} = \frac{\alpha_j}{\tau_T}\rho \cdot \min\left[\min\left(\frac{\omega_r}{\nu_{rj}M_r}\right), \beta\sum_p\left(\frac{\omega_p}{\nu_{pj}M_p}\right)\right] \quad (4)$$

Où τT (s) est l'échelle de temps de mélange de la turbulence, ρla densité du mélange (kg / m3), ωla fraction de masse de l'espèce, νles coefficients stœchiométriques et M la masse molaire (kg / mol) .Les propriétés des réactifs de la réaction sont indiquées en utilisant un indice r, tandis que les propriétés du produit sont désignées par un indice p.

Le modèle de dissipation par tourbillons suppose que les nombres de Reynolds et de Damköhler sont suffisamment élevés pour que la vitesse de réaction soit limitée par l'échelle de temps de mélange turbulentτT. Une réaction globale peut alors au plus progresser à la vitesse à laquelle les réactifs frais sont mélangés, au niveau moléculaire, par la turbulence présente. On suppose également que la vitesse de réaction est limitée par le réactif déficient; Le réactif ayant la concentration locale la plus faible. Le paramètre de modèleβspécifie que les espèces de produits sont nécessaires pour la réaction, en modélisant l'énergie d'activation. Pour la combustion gazeuse non prémélangée, les paramètres du modèle se sont avérés être **[25].**

$$\alpha = 4 , \qquad \beta = 0.5$$

Dans le modèle actuel, la vitesse de réaction moléculaire des réactions est supposée être infiniment rapide. Ceci est réalisé dans le modèle en prescrivant des constantes de vitesse irréalistes élevées pour les réactions. Ceci implique que la vitesse de production est donnée uniquement par le mélange turbulent dans l'équation 4.

Il convient de noter que le modèle de dissipation de Foucault est un modèle robuste mais simple pour les réactions turbulentes. La vitesse de réaction est régie par une échelle de temps unique, le temps de mélange turbulent. Pour cette raison, les réactions étudiées doivent être limitées à une étape globale (comme dans l'équation 2), ou à des réactions en deux étapes.

III.3.5 Chaleur de réaction :

La chaleur de réaction, ou changement d'enthalpie, après chaque réaction est définie à partir de la chaleur de formation des produits et réactifs:

$$\Delta H_r = \sum_{\text{products}} \Delta H_f - \sum_{\text{reactants}} \Delta H_f \quad (5)$$

La chaleur des formations pour chaque espèce est donnée dans le tableau 1 **[26]**. Comme la chaleur de formation des produits est inférieure à celle des réactifs, les deux réactions sont exothermiques et libèrent de la chaleur. Le dégagement de chaleur est inclus dans le modèle en ajoutant une fonction de source de chaleur à l'interface utilisateur de transfert de chaleur dans les fluides. La source de chaleur (W / m3) appliquée est définie comme suit:

$$q = r_{\mathrm{ED},1}\Delta H_{\mathrm{r}1} + r_{\mathrm{ED},2}\Delta H_{\mathrm{r}2} \quad (6)$$

TABLE I: SPECIES ENTHALPY OF FORMATION AND HEAT CAPACITY

SPECIES	ΔH_f (cal/mol) T = 298 K	C_p (cal/(mol·K) T = 300 K	C_p (cal/(mol·K) T = 1000 K	C_p (cal/(mol·K) T = 2000 K
N_2	0	6.949	7.830	8.601
H_2	0	6.902	7.209	8.183
O_2	0	7.010	8.350	9.032
H_2O	-57.80	7.999	9.875	12.224
CO	-26.420	47.259	6.950	7.948
CO_2	-94.061	51.140	8.910	12.993

Tableau III.1 Enthalpie de formation et capacité calorifique des espèces.

III.3.6 Capacité thermique :

La température dans le jet augmente significativement en raison de la libération de la chaleur après les réactions, c'est l'une des caractéristiques de définition de la combustion. Pour une prédiction précise de la température, il est important de tenir compte de la dépendance à la température des capacités thermiques des espèces. Dans le modèle, les fonctions d'interpolation pour la capacité thermique à pression constante, Cp, i (cal / (mol • K)), pour chaque espèce sont définies en utilisant les valeurs de trois températures différentes. La capacité calorifique du mélange, c_p, mélange (J / (kg • K)), est calculée en tant que moyenne pondérée en fraction de masse de la chaleur individuelle

Capacités :

$$c_{\mathrm{p,\,mix}} = \sum_i \frac{\omega_i C_{\mathrm{p},i}}{M_i} \quad (7)$$

III.4 Instruction de modélisation:

Dans le menu **file**, choisissez **New**.

New

1 Dans **New** fenêtre, cliquez sur le bouton **Model Wizard**.

Model wizard

1 Dans la fenêtre **Model Wizard**, cliquez sur le bouton**2D Axisymmetric**.

2Dans la fenetre **Select physics** arbre, Sélectionnez **Fluid Flow>Single-Phase Flow>Turbulent Flow>Turbulent Flow, k-ω (spf)**.

3 Cliquez sur le bouton **Add**.

4 Cliquez sur le bouton **Study**.

5 Dans l'arborescence, sélectionnez **Preset Studies>Stationary**.

6 Cliquez sur le bouton **Done.**

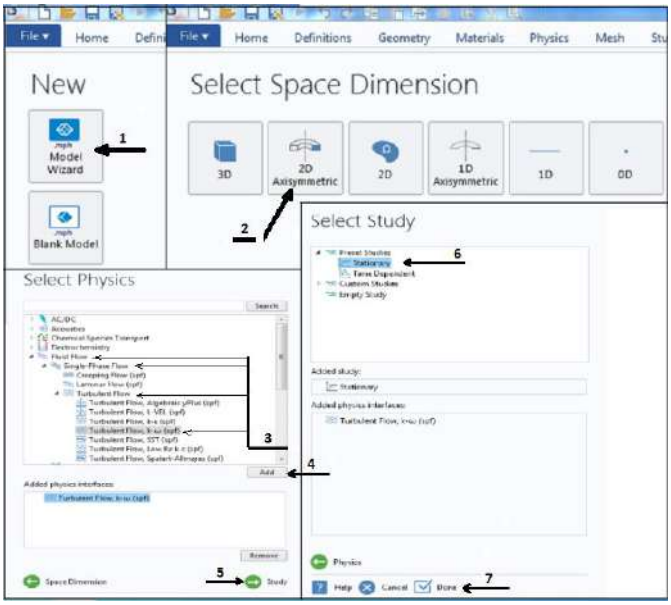


Figure III.1 : Fenêtre d'entré du comsol

Global Définitions :

Paramètre :

1 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Parameters**.

2 Dans la fenêtre **Parameters**, recherchez la section **Parameters**.

3 Cliquez sur **Load from File**.

4 Accédez au dossier Bibliothèque de modèles du modèle et double-cliquez sur le fichier round_jet_burner_params.txt.

Geometry1 :

Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le noeud **Component 1 >Geometry 1**.

Rectangle 1 :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Geometry 1** et choisissez **Rectangle**.

2 Dans la fenêtre Paramètres du **Rectangle** , localisez la section Taille.

3 Dans **Width** edit field, tapez Di / 2.

4 Dans **Height** edit field, tapez Di * 200.

5 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

6 Cliquez sur le bouton the **Zoom Extents**dans la barre d'outils Graphiques.

Pour une visualisation plus facile de la géométrie mince, désactivez la préservation du rapport d'aspect de la vue.

Définitions :

View 1 :

Dans la fenêtre **Model Builder** , développez le nœud **Component 1>Definitions**

Axis :

1 Dans la fenêtre **Model Builder** , développez le nœud **View 1** , puis cliquez sur **Axis**.

2 Dans la fenêtre Paramètres **Axis** , Localisez la section **Axis**.

3 Désactivez **Preserve aspect ratio**.

4 Cliquez sur le bouton **Zoom Extents**dans la barre d'outils Graphiques.

Appliquer des propriétés de fluide pour la simulation de tuyau. Une densité approximative peut être utilisée.

Turbulent Flow, k-ω

Fluid Properties 1;

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 1>Turbulent Flow, k-ω**cliquez sur **FluidProperties 1**.

2 Dans la fenêtre des paramètres **Fluid Properties**, localisez la section **Fluid Properties**.

3 Dans la listeρ, choisissez **User defined**. Dans associated edit field, tapez 1.

4 Dans la listeμ choisissez **User defined** .Dans associated edit field, tapez mu_mix.

Inlet 1 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Inlet**

2 Sélectionnez Boundary 2 uniquement.

3 Dans la fenêtre Paramètres **Inlet** , Localisez la section **Boundary Condition**.

4 Dans le L_T edit field, tapez 0.07 * Di.

5 Localisez la section **Velocity**. Dans le U0 edit field, tapez Ujet.

Outlet 1 :

1 Dans la barre d'outils **Physics** , cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Outlet**.

2 Sélectionnez Boundary 3 uniquement.

3 Dans la fenêtre Paramètres **Outlet**, localisez la section **Pressure Conditions**.

4 Cochez la case **Normal flow**.

Mesh1 :

Mapped 1 :

Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 1**, cliquez avec le bouton droit sur **Mesh 1** et sélectionnez **Mapped**.

Distribution 1 :

1 Dans la **Model Builder**, sous **Component 1>Mesh 1**, cliquez avec le bouton droit sur **Mapped** et sélectionnez **Distribution**.

2 Sélectionnez Boundaries 2 et 3 uniquement.

3 Dans la fenêtre Paramètres de **Distribution**, Localiser la section **Distribution**.

4 Dans la liste **Distribution properties** , choisissez **Predefined distribution type**.

5 Dans le **Number of elements** edit field, saisissez 25.

6 Dans le **Element ratio** edit field, tapez 5.

7 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

Distribution 2 :

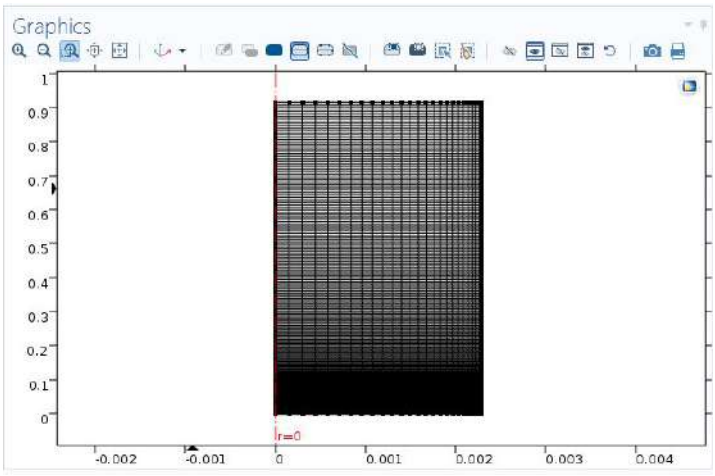
1 Cliquez avec le bouton droit sur **Mapped 1**et sélectionnez **Distribution**.

2 Sélectionnez Boundaries 1 et 4 uniquement.

3 Dans la fenêtre Paramètres de **Distribution**, Localiser la section **Distribution**.

4 Dans la liste **Distribution properties**, Choisissez**Predefined distribution type**.

5 Dans **Number of elements** edit field, taper 200.



6 Dans **Element ratio** edit field, taper 20.

7 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

Maintenant, ajoutez un deuxième modèle pour la simulation de réacteur à réaction ronde.

1 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Add Component** et sélectionner **2D Axisymmetric**.

Geometry 2 :

Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Add Physics**.

Add Physics :

1 Allez à la fenêtre **Add PhysicsChemical Species Transport>Reacting Flow>Turbulent**

2 Dans l'arbre **Add Physics**, sélectionnez **Flow>Turbulent Flow**, **k-ω (rspf).**

3 Trouvez **Physics in study**Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

Studies	Solve
Study 1	×

4 Cliquez pour développer la section **Dependent variables**. Localiser **Dependent Variables** section. Dans le **Number of species**d'espèces, tapez 6.

5 Dans la table **Mass fractions**, saisissez les paramètres suivants:

wCO
wO2
wCO2
wH2
wH2O
wN2

6 Dans la fenêtre **Add physics**, cliquez sur **Add to Component**.

7 Accédez à la fenêtre **Add Physics**

8 Dans l'arbre **Add physics**, sélectionnez **Heat Transfer>Heat Transfer in Fluids (ht)**.

9 Trouvez **Physics in study** dans la sous-section. Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

Studies	Solve
Study 1	×

10 Dans la fenêtre **Add physics**, cliquez sur **Add to Component**.

11 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Add Physics**.

Root :

Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Add Study**.

Add Study :

1 Allez dans la fenêtre **Add Study**

2 Trouver la sous-section **Studies.** Dans l'arborescence, sélectionnez **Preset Studies>Stationary**.

3 Dans la fenêtre **Add study**, cliquez sur **Add Study**.

4 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Add Study**.

Definitions :

Variables 1

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Definitions** et choisissez **Variables**

2 Dans la fenêtre **Variables**, recherchez la section **Variables**

3 Cliquez sur **Load from File**.

4 Accédez au dossier Bibliothèque de modèles du modèle et double-cliquez sur le fichier round_jet_burner_vars.txt.

Geometry2 :

Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le nœud **Geometry 2.**

Rectangle 1 :

1 Cliquez avec le bouton droit sur **Component 2>Geometry 2**et choisissez **Rectangle**.

2 Dans la fenêtre Paramètres **Rectangle**, localisez la section **Size**

3 Dans le **Width** edit field, tapez GeomW

4 Dans le **Height** edit field, tapez GeomH.

5 Cliquez sur le bouton **Build Selected**

Rectangle 2 :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Geometry 2** et choisissez **Rectangle**.

2 Dans la fenêtre Paramètres **Rectangle**, localisez la section **Size.**

3 Dans le **Width** edit field, tapez Pth.

4 Dans le **Height** edit field, tapez Pl.

5 Localisez la section **Position.** Dans le champ d'édition r, tapez Di / 2.

6 Cliquez sur le bouton **Build Selected.**

Chamfer 1 :

1 Dans la barre d'outils **Geometry**, cliquez sur **Chamfer**.

2 Sur l'objet **r2**, sélectionnez uniquement les points 3 et 4.

3 Dans la fenêtre Paramètres **Chamfer**, localisez la section **Distance**

4 Dans le **Distance from vertex** edit field, tapez Pth * 0.15.

5 Cliquez sur le bouton **Build Selected**

6Cliquez sur le bouton **Zoom Extents**dans la barre d'outils Graphiques.

Bézier Polygon :

1 Cliquez avec le bouton droit sur **Geometry 2** et sélectionnez **Bézier Polygon**.

2 Cliquez sur le bouton **Zoom Extents**dans la barre d'outils Graphiques.

3 Dans la fenêtre des paramètres **Bézier Polygon**, localisez la section **Polygon Segments**.

4 Trouvez la sous-section **Added segments**. Cliquez sur le bouton **Add Linear**.

5 Trouvez la sous-section **Control points**. Dans la rangée 1, réglez r sur GeomW.

6 Dans la ligne 2, réglez r sur GeomW * 1.5.

7 Dans la ligne 2, réglez z sur GeomH.

8 Recherchez la sous-section **Added segments**. Cliquez sur le bouton **Add Linear**.

9 Trouvez la sous-section **Control points**. Dans la rangée 2, réglez r sur GeomW.

10 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

Union 1 :

1 Dans la barre d'outils **Geometry**, cliquez sur **Union**.

2 Sélectionnez uniquement les objets b1 et r1.

3 Dans la fenêtre des Paramètres **Union**, localisez la section **Union**.

4 Décochez la case **Keep interior boundaries**.

5 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

Difference 1 :

1 Dans la barre d'outils **Geometry**, cliquez sur **Difference**.

2 Sélectionnez uniquement l'objet **uni1** .

3 Dans la fenêtre des Paramètres **Difference**, localisez la section **Difference**.

4 Sélectionnez le bouton **Objects to subtract**.

5 Sélectionnez l'objet **cha1** uniquement.

6 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

Bézier Polygon 2 :

1 Cliquez avec le bouton droit sur **Geometry 2** et choisissez **Bézier Polygon**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Bézier Polygon**, localisez la section **Polygon Segments**.

3 Trouvez la sous-section **Added segments**. Cliquez sur le bouton **Add Linear**.

4 Trouvez la sous-section **Control points**. Dans la rangée 1, réglez r sur Di / 2.

5 Dans la ligne **1**, réglez **z** sur Pl + 0,3e-3.

6 Dans la ligne **2**, réglez **r** sur Di.

7 Dans la ligne **2**, réglez **z** sur GeomH.

8 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

Bézier Polygon 3 :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Geometry 2** et choisissez **Bézier Polygon**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Bézier Polygon**, localisez la section **Polygon Segments**.

3 Trouvez la sous-section **Added segments**. Cliquez sur le bouton **Add Linear**.

4 Trouvez la sous-section **Control points**. Dans la rangée **1**, réglez **r** sur Di / 2 + Pth.

5 Dans la ligne **1**, réglez **z** sur Pl + 0,3e-3.

6 Dans la ligne **2**, réglez **r** sur 0,04.

7 Dans la ligne **2**, réglez **z** sur GeomH.

8 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

Form Union :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2>Geometry 2**, cliquez avec le bouton droit sur **Form Union** et choisissez **Build Selected**.

2 Dans la fenêtre **Form Union/Assembly**, Localisez la section **Form Union/Assembly**.

3 Dans le **Relative repair tolerance** edit field, tapez 1e-6.

Mesh Control Edges 1 :

1 Dans la barre d'outils **Geometry**, cliquez sur **Virtual Operations** et choisissez **Mesh Control Edges**

2 Sur l'objet **fin**, sélectionnez Boundaries 6 et 11 uniquement.

3 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

4 Cliquez sur le bouton **Zoom Extents**dans la barre d'outils Graphiques.

Form Composite Edges 1 :

1 Dans la barre d'outils **Geometry**, cliquez sur **Virtual Operations**et choisissez **Form Composite Edges**.

2 Sur l'objet **mce1**, sélectionnez Boundaries 3 et 11 uniquement.

3 Cliquez sur le bouton **Build Selected**.

Ceci conclut la géométrie du jet réactif. Définissez maintenant une variable de couplage qui peut être utilisée pour appliquer les conditions de sortie du modèle précédent à l'entrée du courant.

Definitions :

Linear Extrusion 1 :

1 Dans la barre d'outils **Definitions**, cliquez sur **Component Couplings**et choisissez **Linear Extrusion :**

2 Sélectionnez Domaine 1 uniquement.

3 Dans la fenêtre Paramètres **Linear Extrusion**, localisez la section **Source Vertices**

4 Sélectionnez le bouton **Source vertex 1**

5 Sélectionnez Point 2 uniquement.

6 Sélectionnez le bouton **Source vertex 2**

7 Sélectionnez Point 4 uniquement.

8 Cliquez pour agrandir la section **Destination**. Dans la liste **Destination geometry**, choisissez **Geometry 2 :**

9 Localisez la section **Destination Vertices**. Sélectionnez le bouton **Destination vertex 1**

10 Sélectionnez Point 1 uniquement.

11 Sélectionnez le bouton **Destination vertex 2**

12 Sélectionnez Point 3 uniquement.

Reacting Flow :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2**, cliquez sur **Reacting Flow**.

2 Dans la fenêtre **Reacting Flow**, localisez la section **Species**

3 Dans la liste **From mass constraint**, choisissez **wN2**.

4 Repérez la section **Physical Model**. Trouvez la **Mass transport mechanisms**. Dans la liste **Diffusion model**, choisissez **Fick's law**.

Fluid 1 :

Appliquer la température à partir de l'interface de transfert de chaleur.

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2>Reacting Flow**, cliquez sur **Fluid 1**.

2 Dans la fenêtre Paramètres **Fluid**, localisez la section **Model Inputs**

3 Dans la liste T, choisissez **Temperature (ht)**.

4 Localisez la section **Fluid Properties**. Dans la liste,, choisissez **Ideal gas**.

5 Dans la liste □, choisissez **User defined**. Dans le champ d'édition associé, tapez mu_mix.

6 Dans le champ d'édition MwCO, tapez M_CO.

7 Dans le champ d'édition MwO2, tapez M_O2.

8 Dans le champ d'édition MwCO2, tapez M_CO2.

9 Dans le champ d'édition MwH2, tapez M_H2.

10 Dans le champ d'édition MwH2O, tapez M_H2O.

11 Dans le champ d'édition MwN2, tapez M_N2.

12 Localisez la section **Mixing Length Limit**. Dans la liste, sélectionnez Manuel.

13 Dans le champ d'édition lmix, lim, tapez Di * 10.

Initial Values 1 :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2>Reacting Flow**, cliquez sur **Initial Values 1**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Initial Values**, localisez la section **Initial Values**

3 Dans le champ d'édition w0, wCO, tapez 0.

4 Dans le champ d'édition w0, wO2, tapez wcf_O2.

5 Dans le champ d'édition w0, wCO2, tapez 0.

6 Dans le champ d'édition w0, wH2, tapez 0.

7 Dans le champ d'édition w0, wH2O, tapez 0.

Inlet 1 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Inlet**.

2 Sélectionnez Limite 2 uniquement.

3 Dans la fenêtre des Paramètres **Inlet**, Localisez la section **Boundary Condition**

4 Cliquez sur le bouton **Specify turbulence variables**

5 Dans le champ d'édition k0, tapez comp1.linext1 (k).

6 Dans le champ d'édition ω0, tapez comp1.linext1 (om).

7 Localisez la section **Velocity**. Dans le champ d'édition U0, tapez comp1.linext1 (w).

Inlet 2 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Inlet**.

2 Sélectionnez Boundaries 9 et 10 uniquement.

3 Dans la fenêtre des Paramètres **Inlet**, Localisez la section **Boundary Condition**

4 Dans le champ d'édition IT, tapez 0.01.

5 Dans le champ d'édition LT, tapez 0.1 * Di.

6 Localisez la section **Velocity**. Cliquez sur le bouton **Velocity field**.

7 Spécifiez le vecteur $\mathbf{u}_0$ comme

0	r
Ucf	z

Inflow 1 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Inflow**.

2 Sélectionnez Boundary 2 uniquement.

3 Dans la fenêtre des paramètres **Inflow**, localisez la section **Inflow**.

4 Dans la liste **Mixture specification**, choisissez **Mole fractions**.

5 Dans le champ d'édition x0, wCO, tapez x0_CO.

6 Dans le champ d'édition x0, wO2, tapez x0_O2.

7 Dans le champ d'édition x0, wCO2, tapez x0_CO2.

8 Dans le champ d'édition x0, wH2, tapez x0_H2.

9 Dans le champ d'édition x0, wH2O, tapez x0_H2O.

Inflow 2 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Inflow**.

2 Sélectionnez Boundaries 9 et 10 uniquement.

3 Dans la fenêtre des paramèters **Inflow**, localisez la section **Inflow**

4 Dans le champ d'édition w0, wCO, tapez 1e-5.

5 Dans le champ d'édition w0, wO2, tapez wcf_O2.

6 Dans le champ d'édition w0, wCO2, tapez 1e-5.

7 Dans le champ d'édition w0, wH2, tapez 1e-5.

8 Dans le champ d'édition w0, wH2O, tapez 1e-5.

Outflow 1 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Outflow**.

2 Sélectionnez Boundary 3 uniquement.

Outlet 2 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Outlet**.

2 Sélectionnez Boundary 3 uniquement.

3 Dans la fenêtre des Paramètres **Outlet**, localisez la section **Pressure Conditions**.

4 Cochez la case **Normal flow**.

Reactions 1 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Domains** et choisissez **Reactions**.

2 Sélectionnez Domain 1 uniquement.

3 Dans la fenêtre **Reactions**, localisez la section **Reaction Rate**.

4 Dans le champ d'éditionν_{wCO}, tapez -1.

5 Dans le champ d'éditionν_{wO2}, tapez -0.5.

6 Dans le champ d'éditionν_{wCO2}, saisissez 1.

7 Localisez la section **Rate Constants**. Désactivez la case à cocher **Use Arrhenius expressions**

Appliquer une vitesse de réaction irréaliste élevée pour modéliser les réactions comme infiniment rapide. Dans ce cas, la vitesse de réaction sera donnée par le mélange turbulent.

8 Dans le champ d'éditionk^f, tapez 1e100.

Reactions 2 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Domains** et choisissez **Reactions**.

2 Sélectionnez Domain 1 uniquement.

3 Dans la fenêtre des paramètres **Reactions**, localisez la section **Reaction Rate**.

4 Dans le champ d'éditionν_{wO2}, tapez -0.5.

5 Dans le champ d'éditionν_{wH2}, saisissez -1.

6 Dans le champ d'édition ν_{wH2O}, tapez 1.

7 Localisez la section **Rate Constants**. Désactivez la case à cocher **Use Arrhenius expressions**d'Arrhenius.

8 Dans le champ d'éditionk^f, tapez 1e100.

Utilisez les capacités calorifiques tabulées pour créer des fonctions d'interpolation, une pour chaque espèce.

Definitions :

Interpolation 1 :

1 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Functions** et choisissez **Global>Interpolation**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Interpolation**, Localisez la section **Definition**

3 Dans le champ d'édition **Function name**, tapez Cp_CO.

4 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

t	f(t)
300	47.259
1000	6.950
2000	7.948

5 Localisez la section **Interpolation and Extrapolation**. Dans la liste **Interpolation**, choisissez **Piecewisecubic**.

6 Repérez la section **Units**. Dans le champ d'édition **Arguments**, tapez K.

7 Dans le champ d'édition **Function**, tapez cal / mol/K. Tracez la fonction d'interpolation résultante

8 Cliquez sur le bouton **Plot.**

Interpolation 2 :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris **Component 2>Definitions>Interpolation 1** et choisissez **Duplicate**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Interpolation**, recherchez la section **Definition.**

3 Dans le champ d'édition **Function name**, tapez Cp_CO2.

4 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

t	f(t)
300	51.140
1000	8.910
2000	12.993

Interpolation 3 :

1 Cliquez avec le bouton droit sur **Component 2>Definitions>Interpolation 2** et choisissez **Duplicate :**

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Interpolation**, recherchez la section **Definition.**

3 Dans le champ d'édition **Function name**, tapez Cp_H2.

4 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

t	f(t)
300	6.902
1000	7.209
2000	8.183

Interpolation 4 :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Component 2>Definitions>Interpolation3** et choisissez **Duplicate**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Interpolation**, recherchez la section **Definition.**

3 Dans le champ **Function name**, tapez Cp_H2O.

4 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

t	f(t)
300	51.140
1000	8.910
2000	12.993

Interpolation 5 :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur Composant **Component 2>Definitions>Interpolation4** et choisissez **Duplicate**..

2 Dans la fenêtre Paramètres **Interpolation**, recherchez la section **Definition.**

3 Dans le champ d'édition **Function name**, tapez Cp_N2.

4 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

t	f(t)
300	6.902
1000	7.209
2000	8.183

Interpolation 6 :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Component 2>Definitions>Interpolation 5** et choisissez **Duplicate**.

2 Dans la fenêtre Paramètres **Interpolation**, recherchez la section **Definition.**

3 Dans le champ d'édition **Function name**, tapez Cp_O2.

4 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

t	f(t)
300	7.010
1000	8.350
2000	9.032

Il faut définir la capacité calorifique du mélange. Elle est calculée comme la moyenne de masse des capacités des espèces. On doit définir également le changement d'enthalpie pour chacune des réactions incluses.

Variables 1 :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2>Definitions**, cliquez sur **Variables 1**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Variables**, Localisez la section **Variables**

3 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

Name	Expression	Unit	Description
Cp_mix	wCO*Cp_CO(T)/ M_CO+wCO2*Cp_CO2(T)/ M_CO2+wH2*Cp_H2(T)/ M_H2+wH2O*Cp_H2O(T)/ M_H2O+wN2*Cp_N2(T)/ M_N2+wO2*Cp_O2(T)/ M_O2	J/(kg·K)	Heat capacity, mixture
dH_R1	dH_CO2-(dH_CO+0.5*dH_O2)	J/mol	Enthalpy change reaction 1
dH_R2	dH_H2O-(dH_H2+0.5*dH_O2)	J/mol	Enthalpy change reaction 2

Tableau III.2 : Tableau des variables.

Configurez maintenant l'interface de transfert de chaleur.

Heat Transferin fluids:

Heat Transfer in Fluids 1:

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2>Heat Transfer in Fluids**, cliquez sur **HeatTransfer in Fluids 1**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Heat Transfer in Fluids**, localisez la section **Model Inputs.**

3 Dans la liste p, choisissez **Pressure (rspf/rfluid1)**.

4 Dans la liste u, choisissez **Velocity field (rspf/rfluid1)**.

5 Localisez la section **Heat Conduction**, **Fluid**. Dans la liste k, choisissez **Heat Conduction, Fluid**, tapez k_mix + Cp_mix * rspf.muT / 0.72.

6 Localisez la section **Thermodynamics, Fluid**. Dans la liste **Fluid type**, choisissez **Ideal gas**.

7 Dans la liste **Gas constant type**, choisissez **Mean molar mass**.

8 Dans la liste Mn, choisissez **User defined**. Dans le champ d'édition associé, tapez rspf.Mn.

9 Dans la liste Cp, choisissez **User defined**. Dans le champ d'édition associé, tapez Cp_mix.

Ajouter une fonction de travail sous pression.

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris **Component 2>Heat Transfer in Fluids>Heat Transfer in Fluids 1**et choisissez **Pressure Work**.

Initial Values 1 :

1 Dans la fenêtre des Paramètres **Initial Values**, localisez la section **Initial Values.**

2 Dans le champ d'édition T, tapez T0.

Temperature 1 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Temperature**.

2 Sélectionnez Boundaries 2, 9 et 10 uniquement.

3 Dans la fenêtre des Paramètres **Temperature**, localisez la section **Temperature.**

4 Dans le champ d'édition T0, tapez T0.

Outflow 1 :

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Boundaries** et choisissez **Outflow**.

2 Sélectionnez Boundary 3 uniquement.

Heat Source 1

1 Dans la barre d'outils **Physics**, cliquez sur **Domains** et choisissez **Heat Source**.

2 Sélectionnez Domain 1 uniquement.

3 Dans la fenêtre des Paramètres **Heat Source**, localisez la section **Heat Source.**

4 Dans le champ Q, saisissez- (dH_R1 * rspf.rEDC_treac1 + dH_R2 * rspf.rEDC_treac2).

Mesh2 :

Cliquez sur le bouton **Zoom Extents** dans la barre d'outils Graphiques.

Size :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Mesh 2** et choisissez **EditPhysics-Induced Sequence**.

2 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2>Mesh 2**, cliquez sur Taille.

3 Dans la fenêtre des Paramètres **Size**, localisez la section **Element Size.**

4 Cliquez sur le bouton **Custom.**

5 Localisez la section **Element Size Parameters**. Dans le **Maximum element size**, tapez 0.05.

6 Dans le **Maximum element growth rate**, tapez 1.12.

7 Dans le **Resolution of narrow regions**, tapez 5.

Size 1:

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2>Mesh 2**, cliquez sur **Size 1**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Size**, localisez la section **Element Size.**

3 Cliquez sur le bouton **Custom**.

4 localisez la section **Element Size Parameters**. Cochez la case **Resolution of narrow regions**.

5 Dans le champ d'édition associated, tapez 5.

6 Cliquez sur le bouton **Build Selected**

Size 2 :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez avec le bouton droit sur **Mesh 2** et choisissez **Size**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Size**, localisez la section **Element Size.**

3 Cliquez sur le bouton **Custom.**

4 Localisez la section **Geometric Entity Selection**. Dans la liste **Geometric entity level**, choisissez **Boundary**.

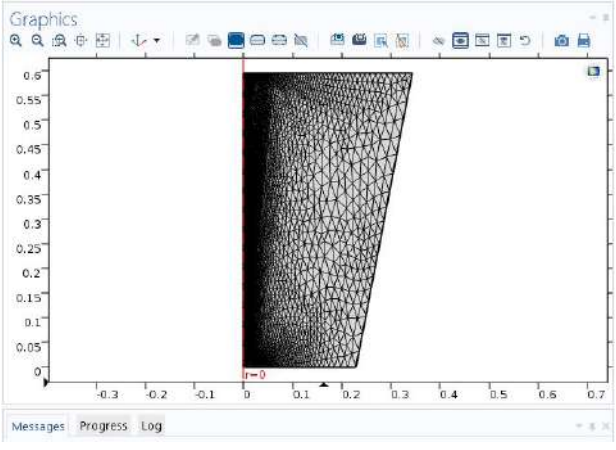
5 Sélectionnez Boundaries1, 13 et 14 uniquement.

6 Repérez la section des Paramètres de **Element Size Parameters**. Cochez la case **Maximum element size.**

7 Dans le champ d'édition associated, tapez 0.01.

8 Cochez la case **Maximum element growth rate**.

9 Dans le champ d'édition associated, tapez 1.04.



Free Triangular 1 :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Component 2>Mesh 2**, cliquez sur **Free Triangular**

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Free Triangular**,

cliquez pour développer la section **Scalegeometry.**

3 Localisez la section **Scale Geometry**. Dans le **z-direction scale**, tapez 0.5.

Boundary Layer Properties 1:

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le nœud **Boundary Layers 1**,puis cliquez sur**Boundary Layer Properties 1**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **BoundaryLayer Properties**, localisez la section **Boundary LayerProperties**.

3 Dans le **Number of boundary layers**,saisissez 6.

4 Cliquez sur le bouton **Build All.**Résoudre le débit de tuyau turbulent entièrementdéveloppé dans le modèle 1.

Study 1 :

Solver 1 :

1 Dans la barre d'outils **Study**, cliquez **Show Default Solver**.

2 Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le nœud **Solver 1**.

3 Effectuez un clic droit sur **Study 1>Solver Configurations>Solver** et choisissez **Compute**.

Utiliser la deuxième étude pour résoudre le flux de jet axialement symétrique dans le modèle 2. Dans cette étude, un jet isotherme réagissant est résolu, en utilisant les profils de sortie turbulents entièrement développés comme conditions d'entrée pour le tuyau.

Study 2:

Step 1: Stationary:

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Study 2**, cliquez sur **Step 1: Stationary**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Stationary**, localisez la section **Physics and Variables Selection**

3 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

Physics	Solve for	Discretization
Turbulent Flow, k-ω {spf}	×	Physics
Heat Transfer in Fluids {ht}	×	Physics

4 Cliquez pour développer la section **Values of dependent variables**. Localiser la section **Values ofDependent Variables**. Cochez la case **Values of variables not solved for**.

5 Dans la liste **Method**, choisissez **Solution**.

6 Dans la liste **Study**, choisissez **Study 1, Stationary**.

Maintenant résoudre le jetréactif isotherme. Les réactions compliquées nécessitent des facteurs d'amortissement pour la résolution de groupe ségrégée pour l'espèce.

Solver 2 :

1 Dans la barre d'outils **Study**, cliquez sur **Show Default Solver**.

2 Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le nœud **Study 2>Solver Configurations>Solver2>Stationary Solver 1>Segregated 1**, puis cliquez sur **Segregated Step 3**.

3 Dans la fenêtre des Paramètres **Segregated Step**, cliquez pour développer la section **Method and termination**.

4 Localisez la section **Method and Termination**. Dans **Damping factor** edit field, tapez 0,25.

5 Dans la fenêtre **Model Builder**, réduisez le nœud **Solver 2**.

6 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Solver 2** et choisissez **Compute**.

Ajouter une troisième étude pour inclure la température et résoudre pour un jet de réaction non-isotherme. Pour une solution robuste et efficace, utilisez deux étapes d'étude. Commencez par résoudre la Température, en utilisant la vitesse et les fractions de masse de la solution de jet isotherme. Ensuite, dans la deuxième étape, résolvez le flux de réaction non isothermique totalement couplé, en utilisant la solution précédente comme condition initiale.

Add Study :

1 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Add Study**.

2 Allez dans la fenêtre **Add Study**.

3 Trouver la sous-section **Studie**. Dans l'arborescence, sélectionnez **Preset Studies>Stationary.**

4 Trouvez la sous-section **Physics in study**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants :

Physics	Solve
Turbulent Flow, k-ω (spf)	×
Reacting Flow (rspf)	×

5 Dans la fenêtre **Add study**, cliquez sur **Add Study**.

6 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Add Study**.

Study 3:

Step 1: Stationary:

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Study 3**, cliquez sur **Step 1: Stationary**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Stationary**, cliquez pour développer la section **Values of dependent variables**

3 Localisez la section **Values of Dependent Variables**. Cochez la case **Values of variables notsolved for**

4 Dans la liste **Method**, choisissez **Solution**.

5 Dans la liste **Study**, choisissez **Study 2, Stationary**.

Step 2: Stationary 2:

1 Dans la barre d'outils **Study**, cliquez sur **Study Steps**et choisissez **Stationary>Stationary**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Stationary**, localisez la section **Physics and Variables Selection**

3 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

Physics	Solve for	Discretization
Turbulent Flow, k-ω {spf}	×	physics

4 Cliquez pour développer la section **Values of dependent variables**. Localiser la Section **Values of Dependent Variables**. Cochez la case **Initial values of variables solved**.

5 Dans la liste **Method**, choisissez **Solution**.

6 Dans la liste **Study**, choisissez **Study 3, Stationary**.

7 Cochez la case **Values of variables not solved for**.

8 Dans la liste **Method**, choisissez **Solution**.

9 Dans la liste **Study**, choisissez **Study 3, Stationary**.

10 Dans la barre d'outils **Study**, cliquez **Show Default Solver**.

Avant de résoudre, désactivez la génération automatique de groupes de tracés par défaut. Les données existantes serviront à enregistrer les résultats non isothermiques.

11 Dans la fenêtre des Paramètres **Study**, localisez la section **Study Settings**.

12 Décocher la case **Generate convergence plots**.

13 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez sur **Study 3**.

14 Dans la fenêtre des Paramètres **Study**, localisez la section **Study Settings**.

15 Désactivez la case à **Generate default plts**.

Maintenant résoudre le cas non-isothermique réaction.

1 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Compute**.

Maintenant passer à post traitement le résultat du jet non-isothermique. Commencez par créer un jeu de données 2D en miroir ainsi qu'un ensemble de données 3D révolu.

Results :

Data Sets :

1 Dans la barre d'outils **Results**, cliquez sur **More Data Sets**et choisissez **Mirror 2D**.

2 Dans la fenêtre de configuration **Mirror 2D**, Localisez la section **Data**.

3 Dans la **Data set**, choisissez **Solution 6**.

4 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>Data Sets**, cliquez sur **Revolution 2D2**.

5 Dans la fenêtre des Paramètres **Revolution 2D**, cliquez pour développer la section **Revolution layers**

6 Localisez la section **Revolution Layers**. Dans **Revolution angle** edit field, tapez 180.

7 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>Data Sets>Revolution 2D 2** et choisissez **Duplicate**.

8 Dans la fenêtre des Paramètres **Revolution 2D**, Localisez la section **Data**.

9 Dans la liste **Data set**, choisissez **Solution 6**..

Créez deux lignes de coupe à des hauteurs fixes à partir de la sortie du tuyau.

1 Dans la barre d'outils **Results**, cliquez sur **Cut Line 2D**

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Cut Line 2D**, Localisez la section **Data**.

3 Dans la liste **Data set**, choisissez **Mirror 2D 1**.

4 Localisez la section **Line Data**. Dans la **Line entry method**, choisissez**Point anddirection**.

5 Trouver la sous-section **Point**. Dans **y** edit field, tapez Pl + 20 * Di.

6 Cliquez pour agrandir la section **Advanced**. Trouver la sous-section **Space variable**. Dans le **x** edit field , tapez r_mirr20.

7 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>Data Sets>Cut Line 2D 1** et choisissez **Duplicate**.

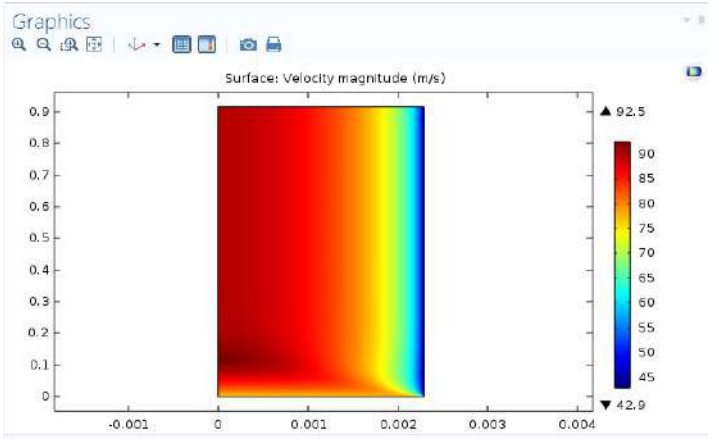
8 Dans la fenêtre des Paramètres **Cut Line 2D**, localisez la section **Line Data**.

9 Trouvez la sous-section **Point**. Dans **y** edit field, tapez Pl + 50 * Di.

10 , Localisez la section **Advanced**. Trouver la sous-section **Space variable**. Dans le **x** edit field, tapez r_mirr50.

Maintenant, appliquez l Ensemble de données miroir aux groupes de tracés existants.

Velocity (rspf) :



1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous**Results**, cliquez sur **Velocity (rspf)**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **2D Plot Group**, localisez la section **Data**.

3 Dans la liste **Data set**, choisissez **Mirror 2D 1**.

4 Dans la barre d'outils **2D plot group**, cliquez sur **Plot**.

5 Dans la fenêtre **Model Builder**,développez le nœud **Velocity (rspf)**.

6 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>Velocity (rspf)**et choisissez **Streamline**.

7 Dans la fenêtre des Paramètres **Streamline**, localisez la section **Streamline Positioning**.

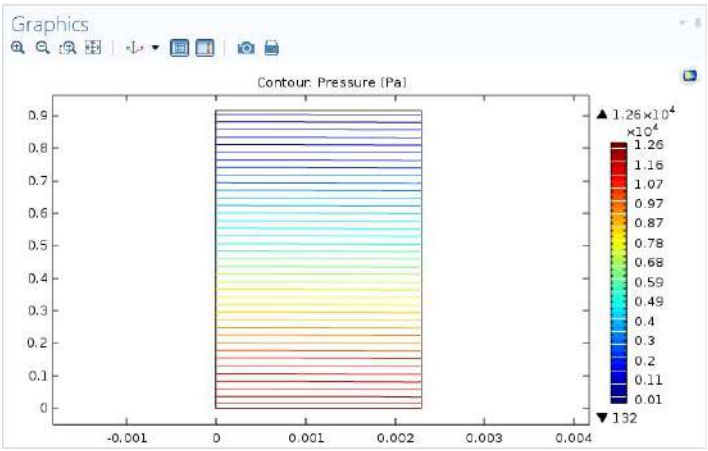
8 Dans la liste **Positioning**, choisissez **Uniform density**.

9 Dans le **Separating distance** edit field, tapez 0.035.

10 Localisez la section **Coloring and Style**. Dans la liste **Color**, choisissez **Gray**.

11 Dans la barre d'outils **2D plot group**, cliquez sur **Plot**.

12 Cliquez sur le bouton **Zoom Extents**dans la barre d'outils Graphiques.



Pressure (rspf) :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results** cliquez sur **Pressure (rspf)**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **2D Plot Group**, localisez la section **Data**.

3 Dans la liste **Data set**, choisissez **Mirror 2D 1**.

4 Dans la barre d'outils **2D plot group**, cliquez sur **Plot**.

Wall Resolution (rspf) :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results** cliquez sur **Wall Resolution (rspf)**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **2D Plot Group**, localisez la section **Data**.

3 Dans la liste **Data set**, choisissez **Mirror 2D 1**.

4 Dans la barre d'outils **2D plot group**, cliquez sur **Plot**.

Mass Fraction (rspf) :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results**, cliquez sur **Mass Fraction (rspf)**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **2D Plot Group**, localisez la section **Data**.

3 Dans la liste **Data set**, choisissez **Mirror 2D 1**.

4 Localisez la section **Plot Settings**. Dans la liste **Color**, choisissez **White**.

5 Dans la barre d'outils **2D plot group**, cliquez sur **Plot**.

6 Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le nœud **Mass Fraction (rspf)** ,puis cliquez sur **Surface1**.

7 Dans la fenêtre des Paramètres de **Surface**, Localisez la section **Expression**.

8 Dans **Expression** edit field, tapez wCO2.

9 Dans la barre d'outils **2D plot group**, cliquez sur **Plot**.

10 Cliquez sur le bouton **Zoom Extents**dans la barre d'outils Graphiques.

Velocity, 3D (rspf) :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results**, cliquez sur **Velocity, 3D (rspf)**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **3D Plot Group**, localisez la section **Plot Settings**.

3 Décochez la case **Plot data set edges**.

Velocity, 3D (rspf) 1 :

1 Cliquez avec le bouton droit sur **Results>Velocity, 3D (rspf)** et choisissez **Duplicate**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **3D Plot Group**, localisez la section **Data**.

3 Dans la liste **Data set**, choisissez **Revolution 2D 3**.

4 Cliquez avec le bouton droit sur **Results>Velocity, 3D (rspf) 1**et choisissez **Rename**.

5 Dans la boîte de dialogue **Rename 3D Plot Group**, tapez Température, 3D (rspf) dans le **Newname** edit field.

6 Cliquez sur **OK**

Temperature, 3D (rspf)

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le nœud **Results>Temperature, 3D (rspf)** , puis cliquez sur **Surface 1**.

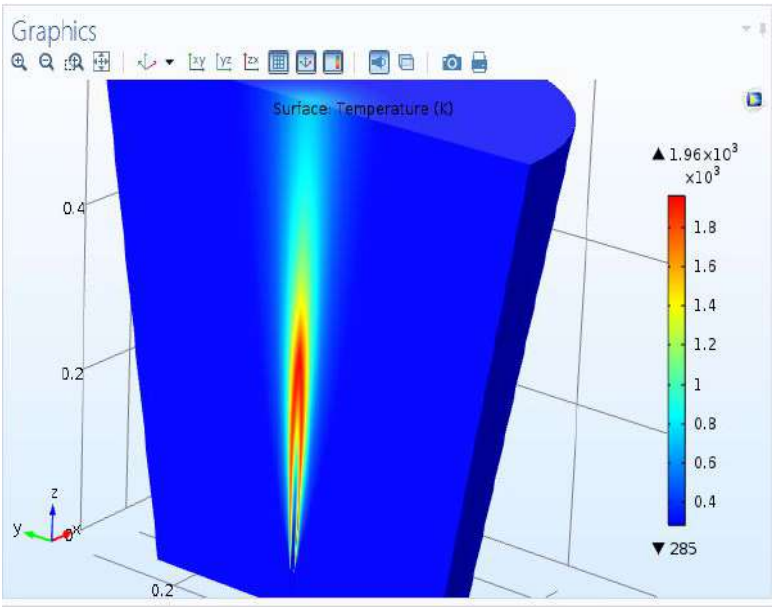
2 Dans la fenêtre des Paramètres **Surface**, localisez la section **Expression**.

3 Dans le **Expression** edit field, tapez T.

4 Localisez la section **Coloring and Style**. Dans la liste **Color table**, choisissez **RainbowLight**.

5 Dans la barre d'outils **3D plot group**, cliquez sur **Plot**.

6 Cliquez sur le bouton **Zoom Extents** dans la barre d'outils Graphiques.



Importez les fichiers de données expérimentales.

Les dossiers correspondent à ceux publiés en ligne (Réf. 4) par R. Barlow et collègues.

Le nom du modèle round_jet_burner a été précédé des noms de fichier. Pour connaître la colonne à tracer, ouvrez les fichiers à l'aide d'un éditeur de texte.

7 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Tables** et choisissez **Table**.

8 Dans la fenêtre des Paramètres **Table**, Localisez la section **Data**.

9 Cliquez sur **Import**.

10 Accédez au dossier model's Model Library folder et double-cliquez sur le fichier round_jet_burner_chnAclY.fav.

Table :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>Tables>Table 1**et choisissez **Rename**.

2 Dans la boîte de dialogue **Rename Table**, saisissez Centerline data dans le **New name** edit field..

3 Cliquez sur **OK**.

Results :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Tables** et choisissez **Table**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Table**, Localisez la section **Data**.

3 Cliquez sur **Import**.

4 Accédez au dossier model's Model Library folder et double-cliquez sur le fichier round_jet_burner_chnAd20Y.fav.

Table :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>Tables>Table 2**et choisissez **Rename**.

2 Dans la boîte de dialogue **Rename Table**, tapez z / d = 20, radial data dans le **New name** edit field.

3 Cliquez sur **OK**

Results :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Tables** et choisissez **Table**

2 Dans la fenêtredes ParamètresTable, Localisez la section **Data**.

3 Cliquez sur **Import**.

4 Accédez au dossier model's Model Library folder et double-cliquez sur le fichier round_jet_burner_chnAd50Y.fav.

Table :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>Tables>Table 3**et choisissez **Rename**.

2 Dans la boîte de dialogue **Rename Table**, saisissez z / d = 50, radial data dans le **New name** edit field

3 Cliquez sur **OK**.

Results :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Tables** et choisissez **Table**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Table**, Localisez la section **Data**.

3 Cliquez sur **Import**.

4 Accédez au dossier model's Model Library folder et double-cliquez sur le fichier round_jet_burner_seq1420.dat.

Table :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>Tables>Table 4**et choisissez **Rename**.

2 Dans la boîte de dialogue **Rename Table**, tapez z / d = 20, radial velocity data dans le **New name** edit field

3 Cliquez sur **OK**.

Results :

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Tables** et choisissez **Table**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Table**, Localisez la section **Data**.

3 Cliquez sur **Import**.

4 Accédez au dossier model's Model Library folder et double-cliquez sur le fichier round_jet_burner_seq1450.dat.

Table :

1 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>Tables>Table 5**et choisissez **Rename**.

2 Dans la boîte de dialogue **Rename Table**, tapez z / d = 50, radial velocity data dans le **New name** edit field

3 Cliquez sur **OK**.

Results:

1D Plot Group 11:

1 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Add Plot Group**et choisissez **1D Plot Group**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **1D Plot Group**, localisez la section **Data**.

3 Dans la liste **Data set**, choisissez **Solution 6**.

4 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Line Graph**.

5 Sélectionnez Boundary 1 uniquement.

6 Dans la fenêtre des Paramètres **Line Graph**, localisez la section **y-Axis Data**.

7 Dans **Expression** edit field, tapez T.

8 Localisez la section **x-Axis Data**. Dans la liste **Parameter**, choisissez **Expression**.

9 Dans le **Expression** edit field, tapez (z-Pl) * 1000.

10 Cliquez pour agrandir la section **Coloring and style**. localisez la section **Coloring and Style**. Trouvez la sous-section **Line style**. Dans la liste **Color**, choisissez **Black**.

11 Cliquez pour développer la section **Legends**. Cochez la case **Show legends**.

12 Dans la liste **Legends**, sélectionnez **Manual**.

13 Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
Model

14 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Table Graph**.

15 Dans la fenêtre des Paramètres **Table Graph**, localisez la section **Data**.

16 Dans la liste **x-axis data**, choisissez **Column 1**.

17 Dans la liste **Plot columns**, choisissez **Manual**.

18 Dans la liste **Columns**, sélectionnez **Column 4**.

19 Localisez la section **Coloring and Style**. Trouvez la sous-section **Line style**. Dans la liste **Line**, choisissez **None**.

20 Dans la liste **Color**, choisissez **Black**.

21 Trouvez la sous-section **Line markers**. Dans la liste **Marker**, choisissez **Square**.

22 Dans la liste **Positioning**, sélectionnez **data points**.

23 Cliquez pour développer la **Legends**. Cochez la case **Show legends**.

24 Dans la liste **Legends**, choisissez **Manual**.

25 Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants:

Legends
Exp.

26 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez avec le bouton droit sur **1D Plot Group 11** et choisissez **Rename**.

27 Dans la boîte de dialogue **Rename 1D Plot Group**, tapez T @ centerlinedans **New name**editfield.

28 Cliquez sur **OK**.

29 Dans la fenêtre des Paramètres **1D Plot Group**, localisez la section **Plot Settings**.

30 Cochez la case **x-axis label**.

31 Dans le associated edit field, tapez z (mm).

32 Cochez la case **y-axis label**.

33 Dans le associated edit field, tapez T (K).

34 Localisez la section **Axis**. Cochez la case **Manual axis limits**.

35 Dans le **x minimum** edit field, tapez -50.

36 Dans le **x maximum** edit field, tapez 500.

37 Dans le **y minimum** edit field, tapez 200.

38 Dans le **y maximum** edit field, tapez 2200.

39 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Plot**.

1D Plot Group 12 :

1 Dans la barre d'outils **Home**, cliquez sur **Add Plot Group** et choisissez **1D Plot Group**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **1D Plot Group**, localisez la section **Data**.

3 Dans la liste **Data set**, sélectionnez **None**.

4 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Line Graph**.

5 Dans la fenêtre des Paramètres **Line Graph**, localisez la section **Data**.

6 Dans la liste **Data set**, choisissez **Cut Line 2D 1**.

7 Localisez la section **y-Axis Data**. Dans le champ **Expression**, tapez T.

8 Localisez la section **x-Axis Data**. Dans la liste **Parameter**, choisissez **Expression**.

9 Dans le champ **Expression** edit, tapez r_mirr20 * 1000.

10 Cliquez pour agrandir la section **Coloring and style**. Localisez la section **Coloring and Style**. Recherchez la sous-section **Line style**. Dans la liste **Color**, choisissez **Black**.

11 Cliquez pour développer la section **Legends**. Cochez la case **Show legends**.

12 Dans la liste **Legends**, sélectionnez **Manual**.

13 Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
z/d = 20, Model

14 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>1D Plot Group 12>Line Graph 1** et choisissez **Duplicate**.

15 Dans la fenêtre des Paramètres **Line Graph**, localisez la section **Data**.

16 Dans la liste **Data set**, choisissez **Cut Line 2D 2**.

17 Localisez la section **x-Axis Data**. Dans le champ **Expression** edit, tapez r_mirr50 * 1000.

18 Localisez la section **Coloring and Style**. Localisez la sous-section **Line style**. Dans la liste Ligne, choisissez **Dashed**.

19 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
z/d = 50, Model

20 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Plot**.

21 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Table Graph**.

22 Dans la fenêtre des Paramètres **Table Graph**, localisez la section **Data**.

23 Dans la liste **Table**, choisissez **z/d = 20, radial data**.

24 Dans la liste **x-axis data**, choisissez **Column 1**.

25 Dans la liste **Plot columns**, choisissez **Manual**.

26 Dans la liste **Columns**, sélectionnez **Column 4**.

27 Cliquez pour agrandir la section **Coloring and style**. Localisez la section **Coloring and Style**. Recherchez la sous-section **Line style**. Dans la liste Ligne, choisissez **None**.

28 Dans la liste **Color**, choisissez **Black**.

29 Recherchez la sous-section **Line markers**. Dans la liste **Marker**, choisissez **Square**.

30 Dans la liste **Positioning**, sélectionnez **In data points**.

31 Localisez la section **Legends**. Cochez la case **Show legends**.

32 Dans la liste **Legends**, choisissez **Manual**.

33 Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
z/d = 20, Exp

34 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Results>1D Plot Group 12>Table Graph 1** et choisissez **Duplicate**.

35 Dans la fenêtre des Paramètres **Table Graph**, recherchez la section **Data**.

36 Dans la liste **Table**, choisissez **z/d = 50, radial data**.

37 Repérez la section **Coloring and Style**. Recherchez la sous-section **Line markers**. Du Liste des **Marker**, choisissez **Triangle**.

38 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
z/d = 50, Exp

39 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez avec le bouton droit sur **1D Plot Group 12** et choisissez **Rename**.

40 Dans la boîte de dialogue **Rename 1D Plot Group** , tapez T @ z / d = 20, 50 dans le champ **New name**.

41 Cliquez sur **OK**.

42 Dans la fenêtre des Paramètres **1D Plot Group**, localisez la section **Plot Settings**.

43 Cochez la case de l'étiquette **x-axis label**.

44 Dans le champ d'édition associé, tapez r (mm).

45 Cochez la case **y-axis label**.

46 Dans le champ d'édition associé, tapez T (K).

47 Localisez **Axis** section. Cochez la case **Manual axis limits**.

48 Dans le champ d'édition **x minimum**, tapez -40.

49 Dans le champ d'édition **x maximum**, tapez 40.

50 Dans le champ d'édition **y minimum**, tapez 200.

51 Dans le champ de saisie **y maximum**, tapez 2200.

52 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Plot.**

T @ z/d = 20, 50.2

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **@ z/d = 20, 50**et choisissez **Duplicate.**

2 Cliquez avec le bouton droit sur T **T @ z/d = 20, 50.2**et choisissez **Rename**.

3 Dans la boîte de dialogue **Rename 1D Plot Group**, tapez Uz @ z / d = 20, 50 dans le champ **New name.**

4 Cliquez sur **OK**.

Uz @ z/d = 20, 50

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le nœud **Results>Uz @ z/d = 20, 50**, puis cliquez sur

Line Graph 1 :

2 Dans la fenêtre Paramètres **Line Graph**, localisez la section Données de **y-Axis Data**

3 Dans le champ **Expression** edit, tapez w2.

4 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>Uz @ z/d = 20, 50**, cliquez sur **Line Graph**

5 Dans la fenêtre Paramètres **Line Graph**, localisez la section **y-Axis Data**

6 Dans le champ **Expression** edit, tapez w2.

7 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>Uz @ z/d = 20, 50**, cliquez sur **Table Graph**

8 Dans la fenêtre Paramètres **Table Graph**, localisez la section **Data**.

9 Dans la liste **x-axis data**, choisissez **Column 2**.

10 Dans la liste **Table**, choisissez **z/d = 20, radial velocity data**.

11 Dans la liste **Columns**, sélectionnez **Column 9**.

12 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>Uz @ z/d = 20, 50** click **Table Graph 2**.

13 Dans la fenêtre des Paramètres **Table Graph**, localisez la section **Data**.

14 Dans la liste **x-axis data**, choisissez **Column 2**.

15 Dans la liste **Table**, choisissez **z/d = 50, radial velocity data**.

16 Dans la liste **Columns**, sélectionnez **Column 9**.

17 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez sur **Uz @ z/d = 20, 50**.

18 Dans la fenêtre des Paramètres **1D Plot Group**, localisez la section **Plot Settings**.

19 Dans le champ d'édition de l'étiquette **y-axis label**, tapez Vitesse axiale [m / s].

20 Localisez la section **Axis**. Dans le champ d'édition **y minimum**, tapez -1.

21 Dans le champ d'édition **y maximum**, saisissez 80.

22 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Plot**.

T @ centerline 1

1 Dans la fenêtre Générateur de modèle, sous **Results**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **T @ centerline** et choisissez **Duplicate.**

2 Cliquez avec le bouton droit sur **T @ centerline 1** et choisissez **Rename**.

3 Dans la boîte de dialogue **Rename 1D Plot Group**, tapez CO, N2 @ ligne centrale dans le champ **Newname :**

4 Cliquez sur **OK**.

5 Dans la fenêtre des Paramètres **1D Plot Group**, localisez la section **Plot Settings**

6 Dans le champ d'édition **y-axis label**, tapez Mass fraction.

7 Localisez la section **Axis**. Dans le champ **x minimum** edit, tapez -50.

8 Dans le champ d'édition **x minimum**, tapez 500.

9 Dans le champ d'édition **y maximum**, saisissez -0,05.

10 Dans le champ de saisie **y minimum**, tapez 1.

11 Cliquez pour développer la section **Legend**. Dans la liste **Position**, choisissez **Middle right**.

CO, N2 @ centerline

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, développez **Results>CO, N2 @ centerline**, puis cliquez sur **Line Graph 1 :**

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Line Graph**, localisez la section **y-Axis Data**.

3 Dans le champ **Expression** edit, tapez wCO.

4 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
CO, Model

5 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>CO, N2 @ centerline**, cliquez sur **Table Graph 1**.

6 Dans la fenêtre des Paramètres **Table Graph**, localisez la section **Data**.

7 Dans la liste **Columns**, sélectionnez **Column 14**.

8 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
CO, Exp.

9 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Plot**.

10 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>CO, N2 @ centerline**, cliquez avec le bouton droit sur **LineGraph 1** et choisissez **Duplicate**.

11 Dans la fenêtre des paramétrage**Line Graph**, localisez la section **y-Axis Data**.

12 Dans le champ **Expression** edit, tapez wN2.

13 Cliquez pour agrandir la section **Coloring and style**. Repérez la section **Coloring and Style**. Recherchez la sous-section **Line style**. Dans la liste Ligne, choisissez **Dashed**.

14 Repérez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
N2, Model

15 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>CO, N2 @ centerline**, cliquez avec le bouton droit sur **Table Graph 1** et choisissez **Duplicate**.

16 Dans la fenêtre des Paramètres **Table Graph**, localisez la section **Data**.

17 Dans la liste **Columns**, sélectionnez **Column 8**.

18 Localisez la section **Coloring and Style**. Recherchez la sous-section **Line markers**. Dans la Liste **Marker**, choisissez **Triangle**.

19 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
N2, Exp.

20 Dans la barre d'outils **1D plot group** ,cliquez sur **Plot**.

CO, N2 @ centerline 1

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **N2 @ centerline** et choisissez **Duplicate**.

2 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **CO,N2 @ centerline 1** et choisissez **Rename**.

3 Dans la boîte de dialogue **Rename 1D Plot Group**, saisissez H2, H2O @ centerline dans le champ **Newname**.

4 Cliquez sur **OK**.

H2, H2O @ centerline

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le noeud **Results>H2, H2O @ centerline**, puis cliquez sur **Line Graph 1**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Line Graph**, localisez la section **y-Axis Data**.

3 Dans le champ **Expression** edit, tapez wH2.

4 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
H2, Model

5 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>H2, H2O @ centerline**, cliquez sur **Table Graph1**.

6 Dans la fenêtre des Paramètres **Table Graph**, localisez la section **Data**.

7 Dans la liste **Columns**, sélectionnez **Column 10**.

8 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
H2, Exp.

9 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>H2, H2O @ centerline**, cliquez sur Graphique **Line Graph 2**.

10 Dans la fenêtre des Paramètres **Line Graph**, localisez la section **y-Axis Data**.

11 Dans le champ **Expression** edit, tapez wH2O.

12 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
H2O, Model

13 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>H2, H2O @ centerline**, cliquez sur **Table Graph 2**.

14 Dans la fenêtre des Paramètres **Table Graph**, localisez la section **Data**.

15 Dans la liste **Columns**, sélectionnez **Column 12**.

16 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
H2O, Exp

17 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez sur **H2, H2O @ centerline**.

18 Dans la fenêtre de paramètres **1D Plot Group**, localisez la section **Axis**.

19 Dans le champ d'édition **y minimum**, tapez -0.01.

20 Dans le champ d'édition **y maximum**, tapez 0.15.

21 Dans le champ d'édition **y minimum**, saisissez -0,02.

22 Localisez la section **Legend**. Dans la liste **Position**, choisissez **Upper right**.

23 Dans la barre d'outils **1D plot group**, cliquez sur **Plot**.

H2, H2O @ centerline 1

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, cliquez avec le bouton droit de la souris sur **H2, H2O @ centerline** et choisissez **Duplicate**.

2 Cliquez avec le bouton droit de la souris **H2, H2O @ centerline 1** et choisissez **Rename**.

3 Dans la boîte de dialogue **Rename 1D Plot Group**, saisissez O2, CO2 @ centerline dans le champ **Newname**.

4 Cliquez sur **OK**.

O2, CO2 @ centerline

1 Dans la fenêtre **Model Builder**, développez le noeud **Results>O2, CO2 @ centerline**, puis cliquez sur Graphique **Line Graph 1**.

2 Dans la fenêtre des Paramètres **Line Graph**, localisez la section **y-Axis Data**.

3 Dans le champ **Expression** edit, tapez wO2.

4 Localisez la section **Legends**. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
O2, Model

5 Dans la fenêtre **Model Builder**, sous **Results>O2, CO2 @ centerline**, cliquez sur **Table Graph 1**.

6 Dans la fenêtre des Paramètres du graphique de table, localisez la section Données.

7 Dans la liste Colonnes, sélectionnez Colonne 6.

8 Localisez la section Légendes. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
O2, Exp.

9 Dans la fenêtre Générateur de modèle, sous Résultats> O2, CO2 @ ligne centrale, cliquez sur Graphique linéaire 2.

10 Dans la fenêtre Paramètres du graphique de lignes, localisez la section Données de l'axe y.

11 Dans le champ Expression edit, tapez wCO2.

12 Localisez la section Légendes. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

13 Dans la fenêtre Générateur de modèle, sous Résultats> O2, CO2 @ axe central, cliquez sur Tableau Graphique 2.

14 Dans la fenêtre Paramètres du graphique de table, localisez la section Données.

15 Dans la liste Colonnes, sélectionnez Colonne 16.

16 Localisez la section Légendes. Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

Legends
CO2, Exp

17 Dans la fenêtre Générateur de modèle, cliquez sur O2, CO2 @ centerline.

18 Dans la fenêtre de paramètres 1D Plot Group, localisez la section Axis.

19 Dans le champ d'édition y minimum, saisissez -0,05.

20 Dans le champ d'édition y maximum, tapez 0.4.

21 Dans la barre d'outils du groupe de tracés 1D, cliquez sur Plot.

22 Dans la barre d'outils du groupe de tracés 1D, cliquez sur Plot.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS.

IV.1 Introduction :

On présente dans ce chapitre les résultats obtenus par les simulations numériques à l'aide du code **COMSOL MULTIPHYSICS** sur deux PC i3 CPU. Le temps de calcul pour un cas atteint en moyenne 7 heures.

IV.2 Modélisation d'un brûleur à jet rond:

IV.2.1 Configuration expérimentale numérique :

Dans le modèle, le gaz de synthèse est alimenté par un tuyau dans une région ouverte avec un léger écoulement d'air. Lors de la sortie du tuyau, le gaz de synthèse se mélange et réagit avec l'air environnant de manière non prémélangée. La flamme turbulente qui en résulte est fixée à la sortie du tuyau.

Le modèle est résolu en combinant les interfaces utilisateur Réaction du flux et Transfert de chaleur dans les fluides. Le flux turbulent dans le jet est modélisé en utilisant le modèle de turbulence k-ω, et les réactions turbulentes sont modélisées à l'aide du modèle de dissipation de Foucault. La vitesse résultante, la température et les fractions de masse des espèces dans le réacteur sont comparées aux valeurs expérimentales.

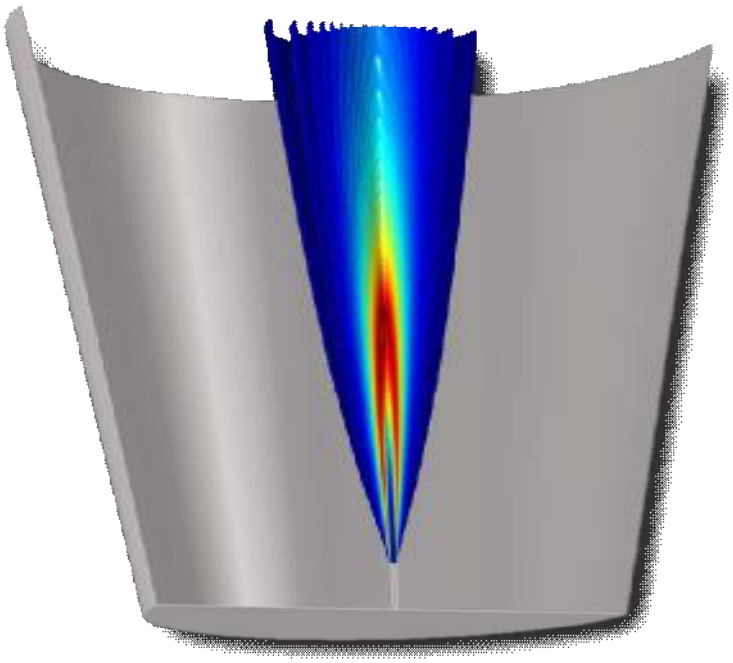


Figure IV.1 : brûleur à jet rond

IV.2.2 Propriétés des mélanges :

Cette étude implique les 05 composantes du gaz de synthèse:

- l'hydrogène (H2) 30%,
- Le monoxyde de carbone (CO) 40%,
- le dioxyde de carbone (CO2) 0%,
- Méthane (CH4) 0%,
- l'azote (N2) 30%.

On a tracé deux lignes radiales (Cut Line 2D 1, Cut Line 2D 2) et une axial (Cut Line 2D 3) pour voir les résultats de la combustion.

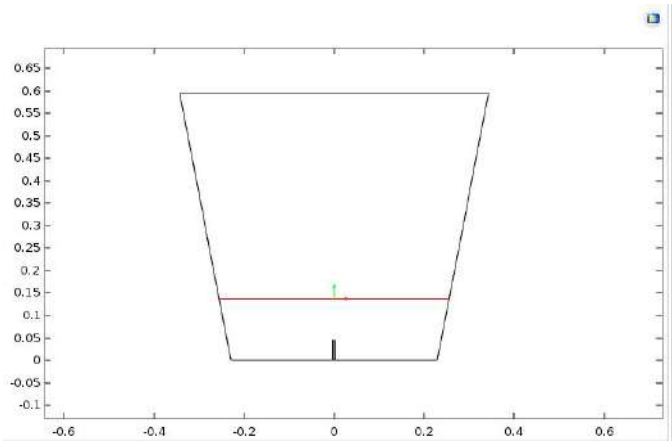


Figure IV.2 : Cut Line 2D 1

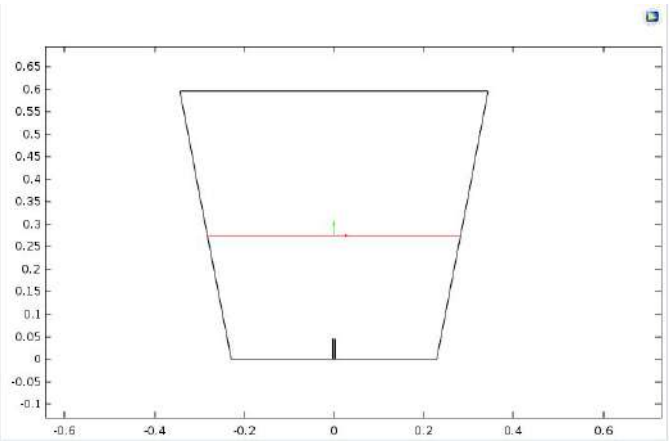


Figure IV.3 : Cut Line 2D 2

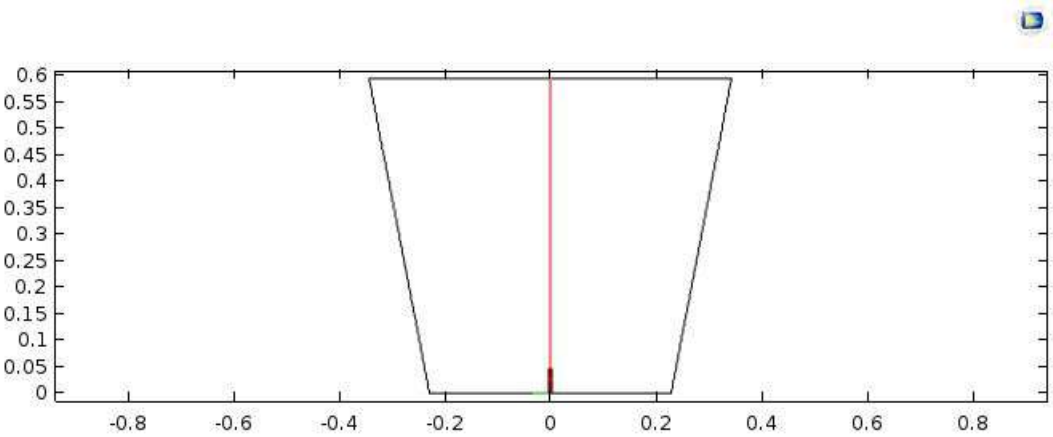


Figure IV.4 : Cut Line 2D 3

IV.3 Solution :

Le modèle de combustion de gaz de synthèse est résolu en trois étapes.

1 Utiliser un sous-modèle initial pour résoudre l'écoulement turbulent isotherme dans un tuyau droit de même diamètre que le brûleur. L'écoulement entièrement développé à la sortie de la conduite est ensuite utilisé comme condition d'entrée pour le brûleur.

2 Résoudre l'écoulement turbulent et réagissant, mais isotherme, dans la configuration du brûleur à jet rond.

3 Inclure le transfert de chaleur et de résoudre pour le flux de réaction entièrement couplé, en utilisant la solution précédente comme condition initiale.

L'utilisation de plusieurs étapes de solution est essentielle pour une procédure de solution robuste lors de la résolution de modèles avec un degré élevé de couplage. C'est le cas pour le flux de réaction turbulent incluant le transfert de chaleur.

IV.4 Résultats et discussion :

Le champ de vitesse résultant dans le jet non réactif isotherme est visualisé sur la figure IV.5 L'expansion et le développement du jet libre chaud est clairement observé. Le mélange turbulent dans les parties extérieures du jet agit pour accélérer le fluide provenant du co-écoulement, et l'incorporer dans le jet. Ceci est communément appelé entraînement et peut être observé dans les lignes de courant de co-écoulement qui se courbent vers le jet en aval de l'orifice.

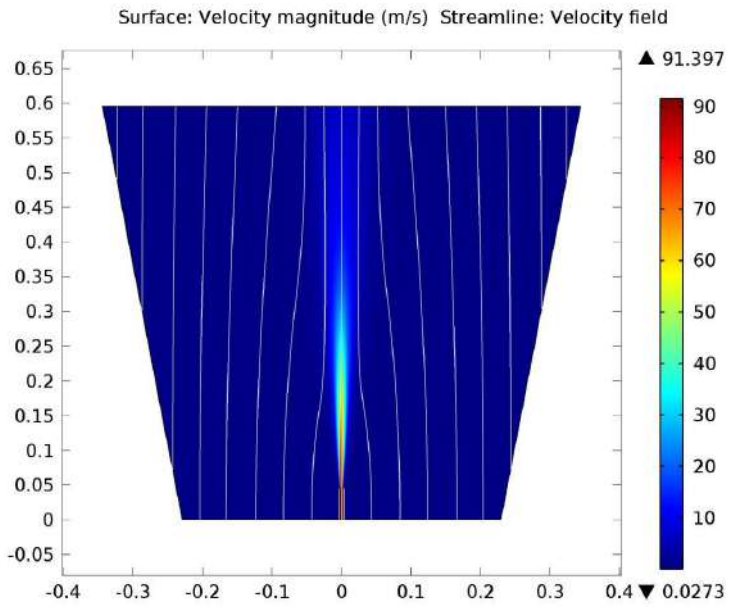


Figure IV.5 : L'amplitude de vitesse et les trajets d'écoulement (lignes de courant) du jet de réaction.

La température dans le jet est représentée sur la figure IV.6 où un jeu de données tourné a été utilisé pour souligner la structure du jet rond. La température maximale dans le jet est considérée comme étant d'environ 1960 K. La fraction de masse de dioxyde de carbone dans le jet de réaction est tracée sur la figure IV.7. La formation de CO2 a lieu dans la couche de cisaillement externe du jet. C'est là que le carburant provenant du tuyau rencontre l'oxygène dans le co-écoulement et réagit. Les réactions sont favorisées par le mélange turbulent dans la couche de cisaillement du jet. On constate également que la formation de CO2 commence juste à l'extérieur du tuyau. C'est également le cas
pour l'augmentation de température de la figure IV.6. Cela implique qu'il n'y a pas de décollage et que la flamme est fixée à la canalisation.

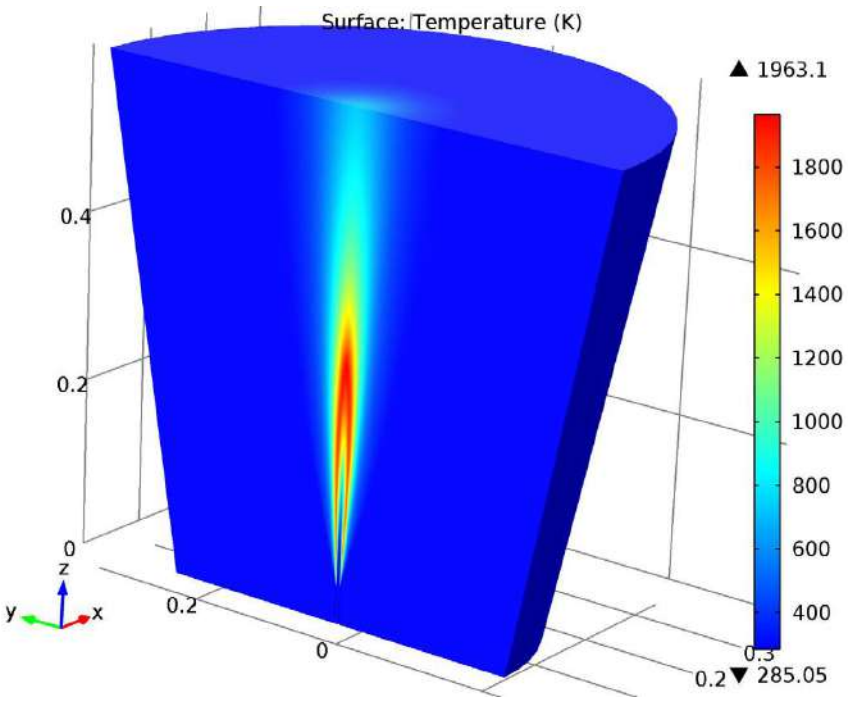


Figure IV.6: Température de jet affichée à l'aide d'un ensemble de données revu.

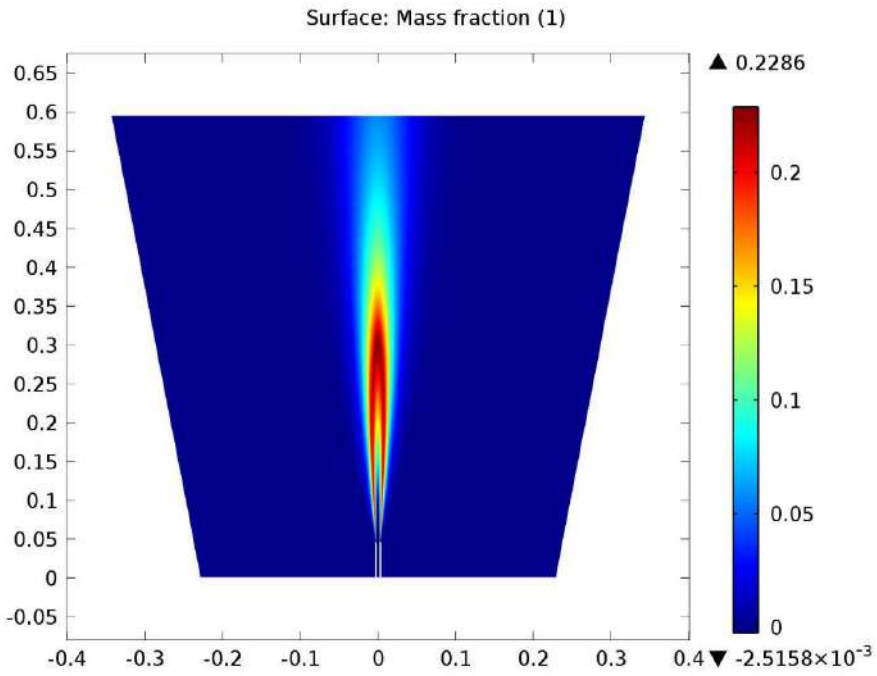


Figure IV.7: fraction de masse de CO2 dans le réacteur.

Dans la figure IV.8-IV.9, les résultats obtenus dans le modèle sont comparés avec les résultats expérimentaux de Barlow et collègues. Sur la figure IV.8 **[22]**, la température du jet est Examinés et comparés avec les expériences. Dans le panneau de gauche, la température le long de l'axe est tracée. On voit que la température maximale prédite dans le modèle est proche de celle de l'expérience. Cependant, dans le modèle, le profil de température est déplacé dans le sens aval. Cela est probablement dû au fait que le rayonnement n'a pas été inclus dans le modèle. Dans le panneau droit de la figure IV.8, on compare les profils de température à 20 et 50 diamètres de tuyau en aval de la sortie de tuyau avec les expériences. La vitesse axiale du jet est comparée aux résultats expérimentaux de la figure IV.9, en utilisant les mêmes positions en aval. La vitesse axiale se compare bien aux valeurs expérimentales aux deux positions.

Dans la figure IV.10, la concentration de l'espèce le long de la ligne médiane du jet est analysée et comparée aux résultats expérimentaux. Pour certaines espèces, N2 et CO2, le développement de la fraction de masse axiale s'accorde bien avec les résultats expérimentaux. Pour les espèces combustibles CO et H2, un accord équitable est observé. Pour les autres espèces, O2 et H2O, la tendance semble correcte mais les profils sont décalés en aval, comme c'était le cas avec la température. La raison de l'écart dans les fractions de masse peut en partie être attribuée au fait que le rayonnement n'est pas inclus, mais la précision est probablement également influencée de

manière significative par le schéma de réaction simplifié et par le modèle de dissipation de Foucault.

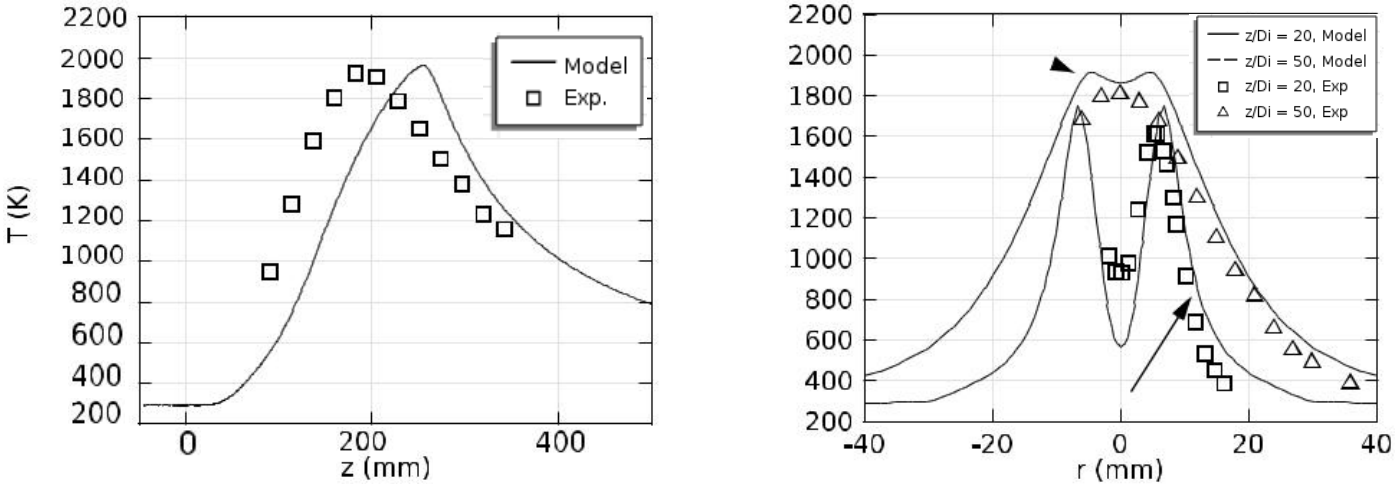


Figure IV.8 : Température du jet le long de la ligne médiane (à gauche), et radialement à deux positions différentes en aval de la sortie du tuyau (à droite).

Les résultats des modèles sont tracés à l'aide de lignes, tandis que les résultats expérimentaux sont indiqués en utilisant des symboles. Les positions aval sont définies en termes de diamètre intérieur du tuyau (d).

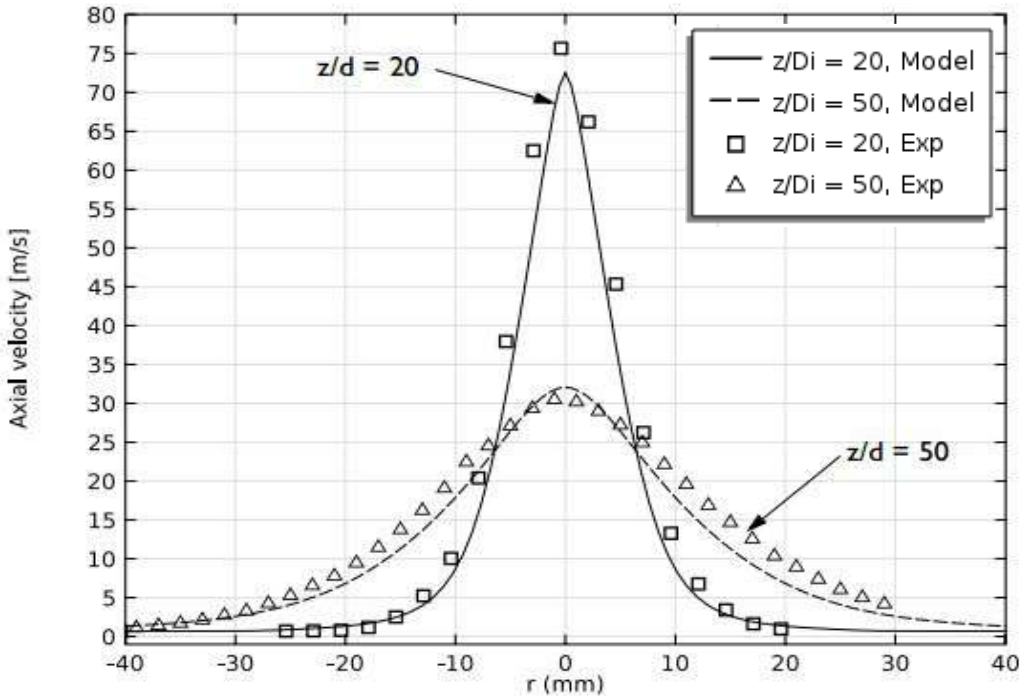


Figure IV.9: Vitesse axiale à deux positions différentes en aval de la sortie du tuyau. Les résultats des modèles sont tracés à l'aide de lignes, tandis que les résultats expérimentaux sont indiqués en utilisant des symboles **[22]**.

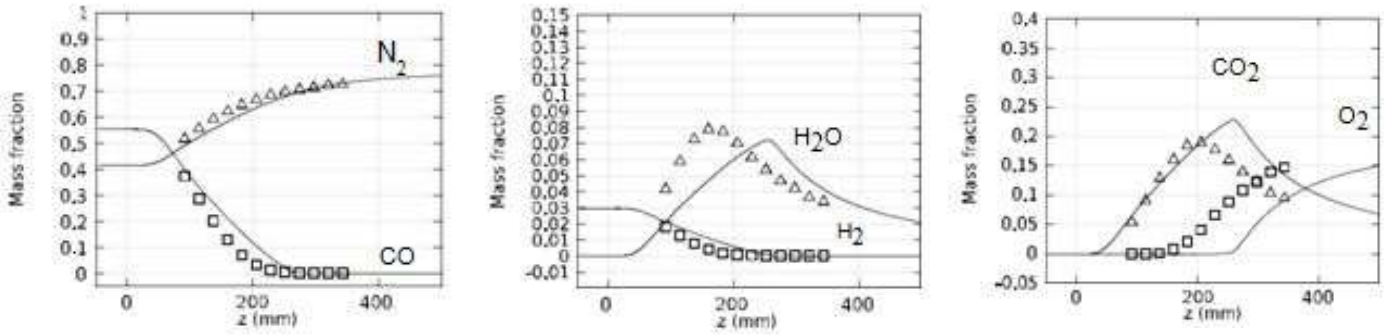


Figure IV.10 : Fractions massiques des espèces sur la ligne médiane du jet. Les résultats des modèles sont tracés à l'aide de lignes, tandis que les résultats expérimentaux sont indiqués en utilisant des symboles.

IV.4.1 Effet de la vitesse d'entrée de Coflow :

On veut mettre en évidence l'effet de la vitesse d'entrée de jet sur le brûleur. On a pris trois valeurs de vitesse **(10 m/s, 20 m/s, 40m/s)** et on fixe toutes les autres conditions initial

	La vitesse	**pression**	**température**	**Modèle de turbulence**
Coflow	10 m/s	1 atm	292 K	**k-ω**
	20 m/s			
	40 m/s			
Jet	76 m/s	1 atm	292 K	

IV.4.1.a Champ de la fraction massique de CO2 :

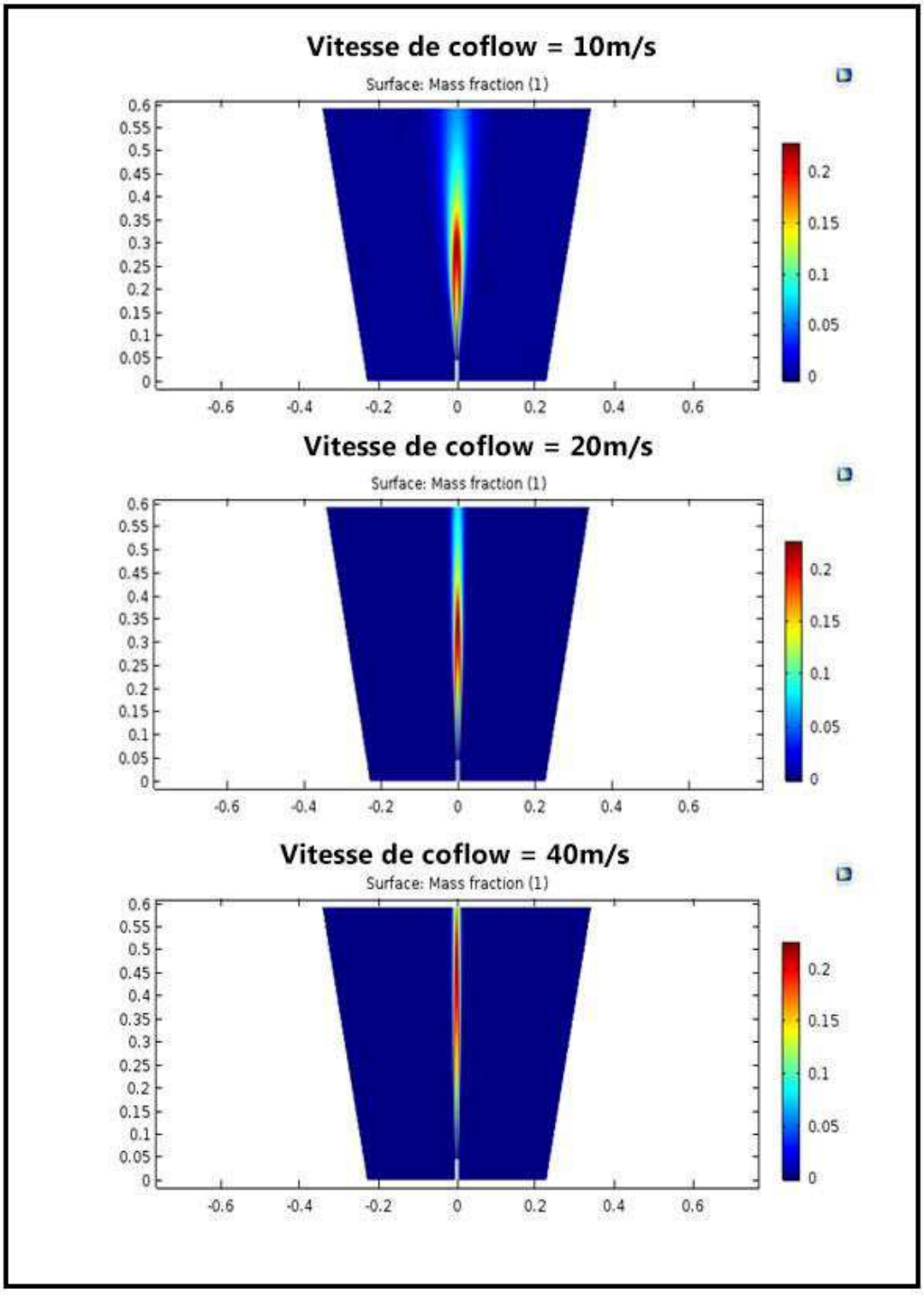


Figure IV.11 : Champ de la fraction massique de CO2 avec la variation de la vitesse de coflow

Les champs de la fraction massique du **CO2** de la chambre pour différentes Vitesses d'entrée de coflow sont montrés sur la figure (IV.11). On peut voir que la structure flamme est faible lorsque la vitesse de coflow =40m/s. La structure de flamme devient plus intense avec la diminution de la vitesse de coflow.

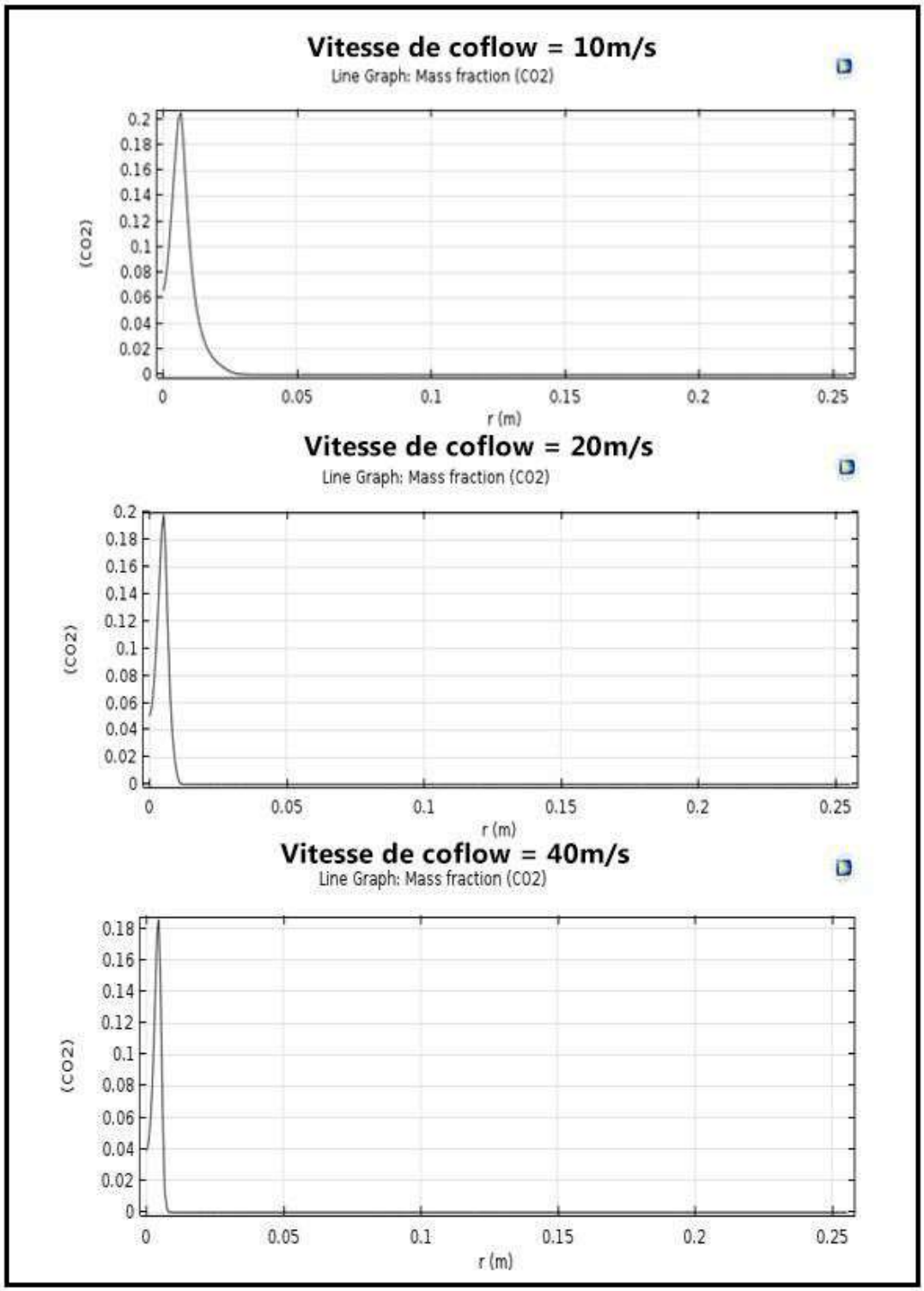


Figure IV.12 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la concentration de CO2 avec la variation de la vitesse de coflow

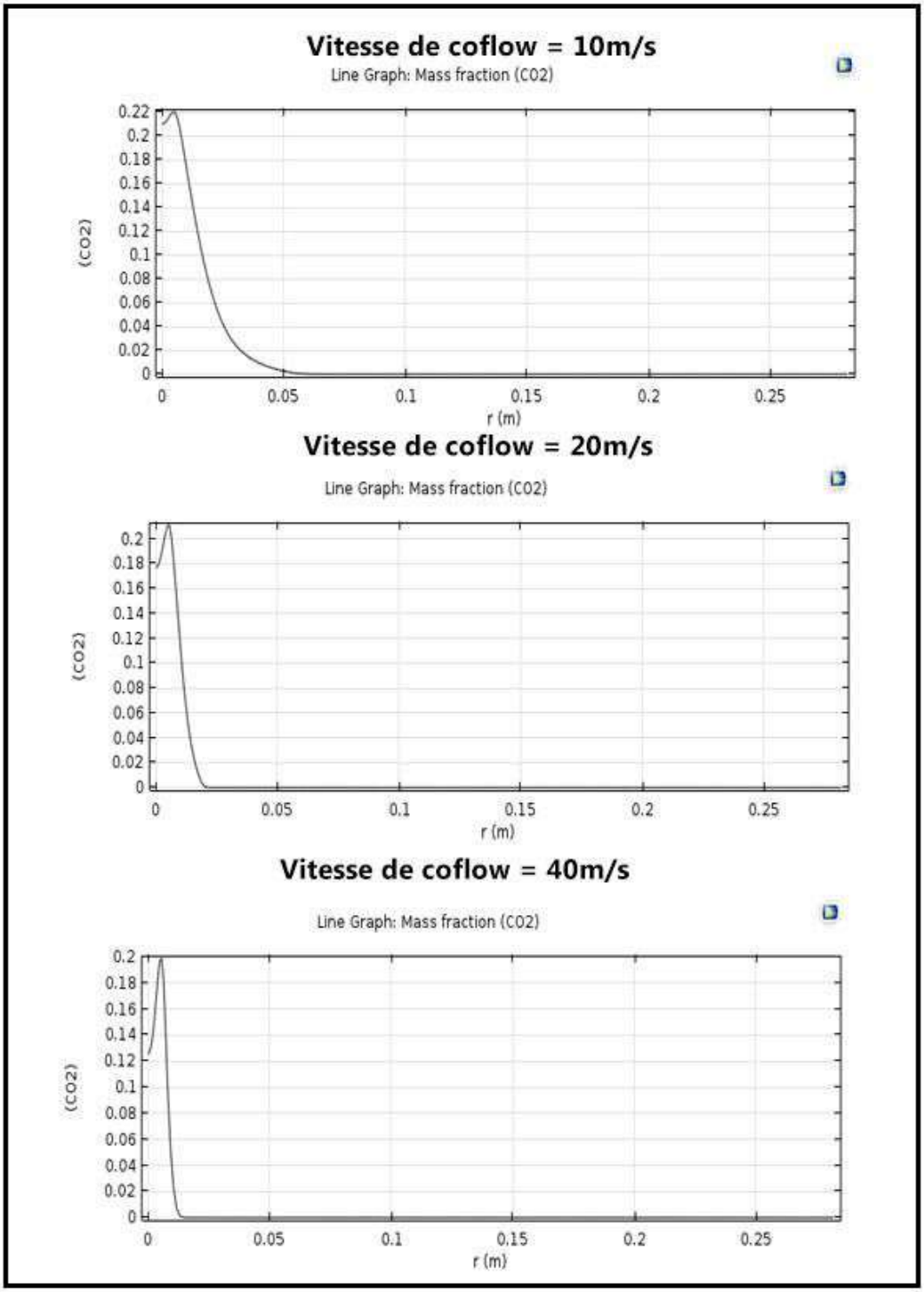


Figure IV.13 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la concentration de CO2 avec la variation de la vitesse de coflow

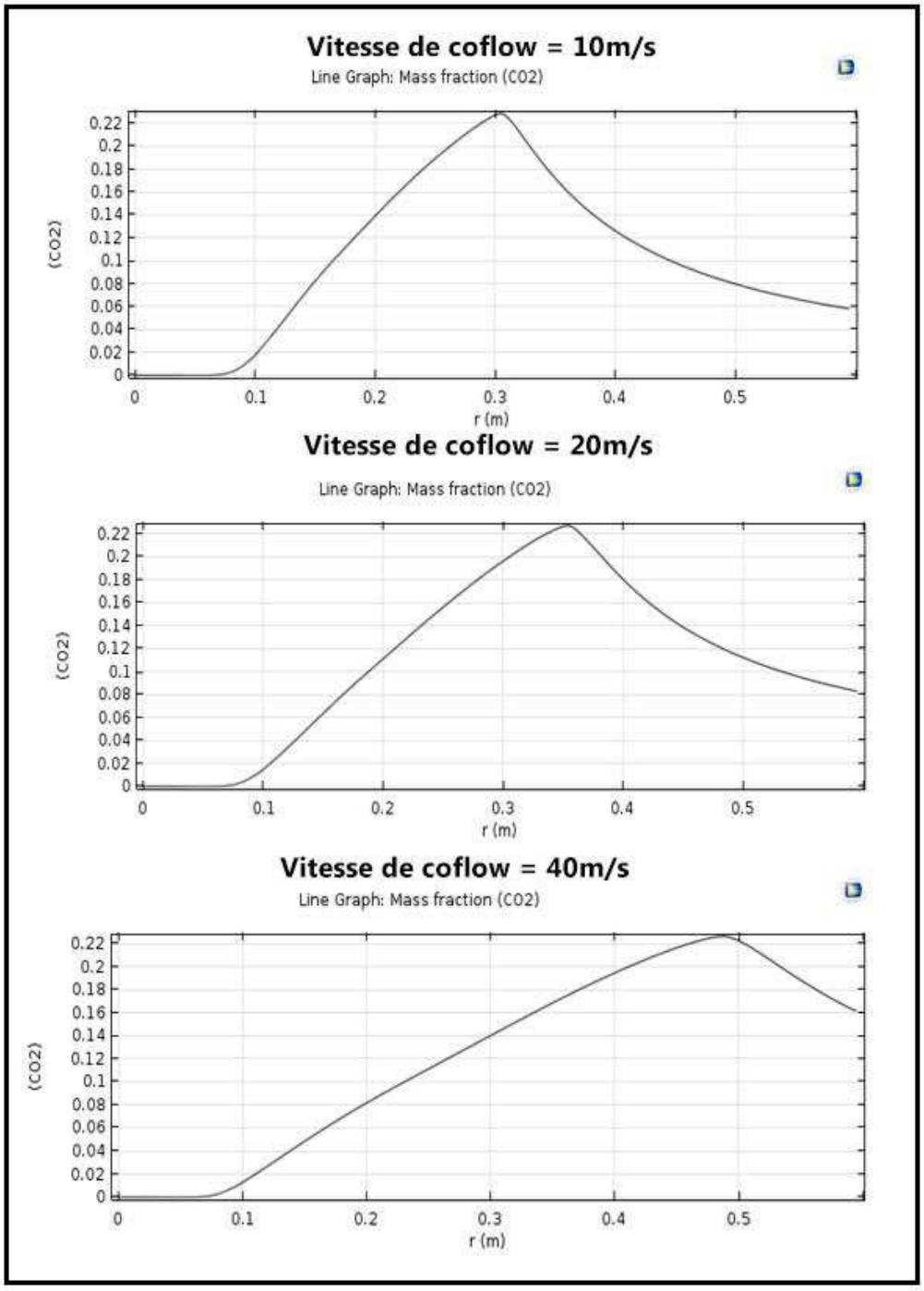


Figure IV.13 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la concentration de CO2 avec la variation de la vitesse de coflow.

L'évolution de la fraction massique de CO2 suivant les lignes axiale et radiale montre que :

- Le taux de fraction massique du CO2 est inversement proportionnel à la valeur de la vitesse d'entrée de l'air.
- Radialement (cut line 1, cut line 2), on remarque que la fraction massique de CO2 est symétrie par rapport à l'axe central de le bruleur.

IV.4.1.b Champ de pression:

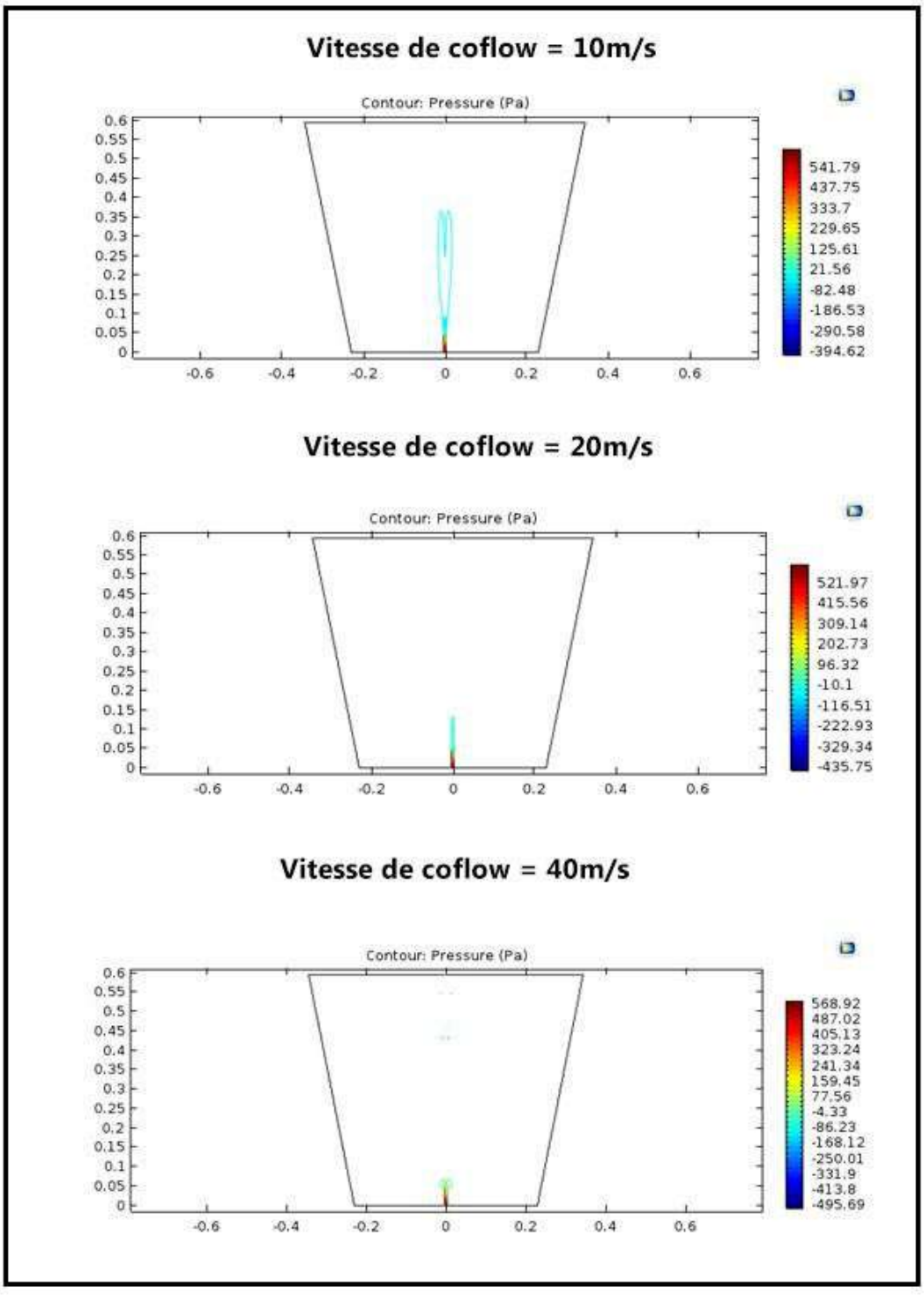


Figure IV.14 : Champ de pression avec la variation de la vitesse de coflow

La Répartition de la pression dans le bruleur pour différentes valeurs de Vitesse de coflow est montrée sur la figure (IV.14).

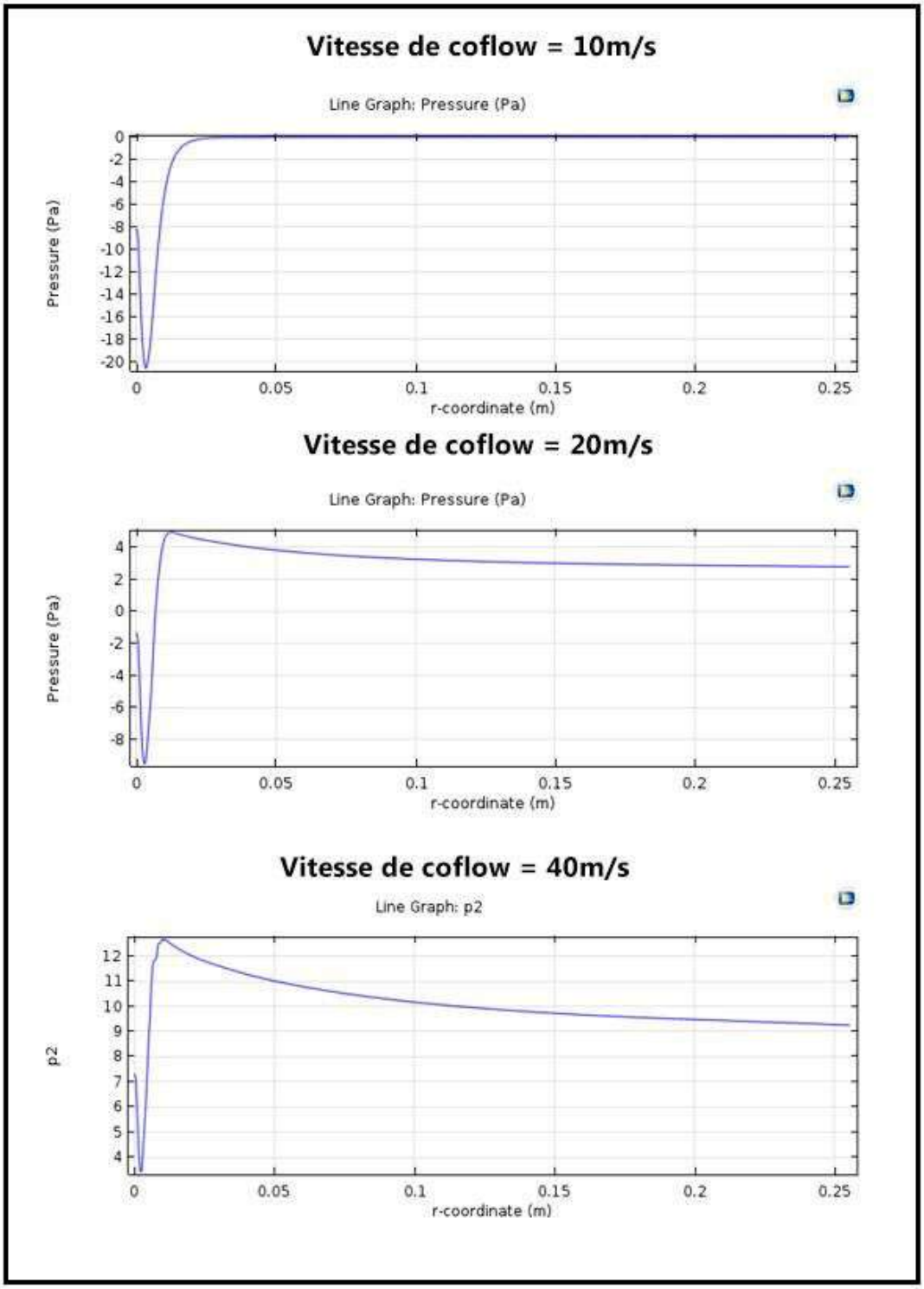


Figure IV.15 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la pression avec la variation de la vitesse de coflow.

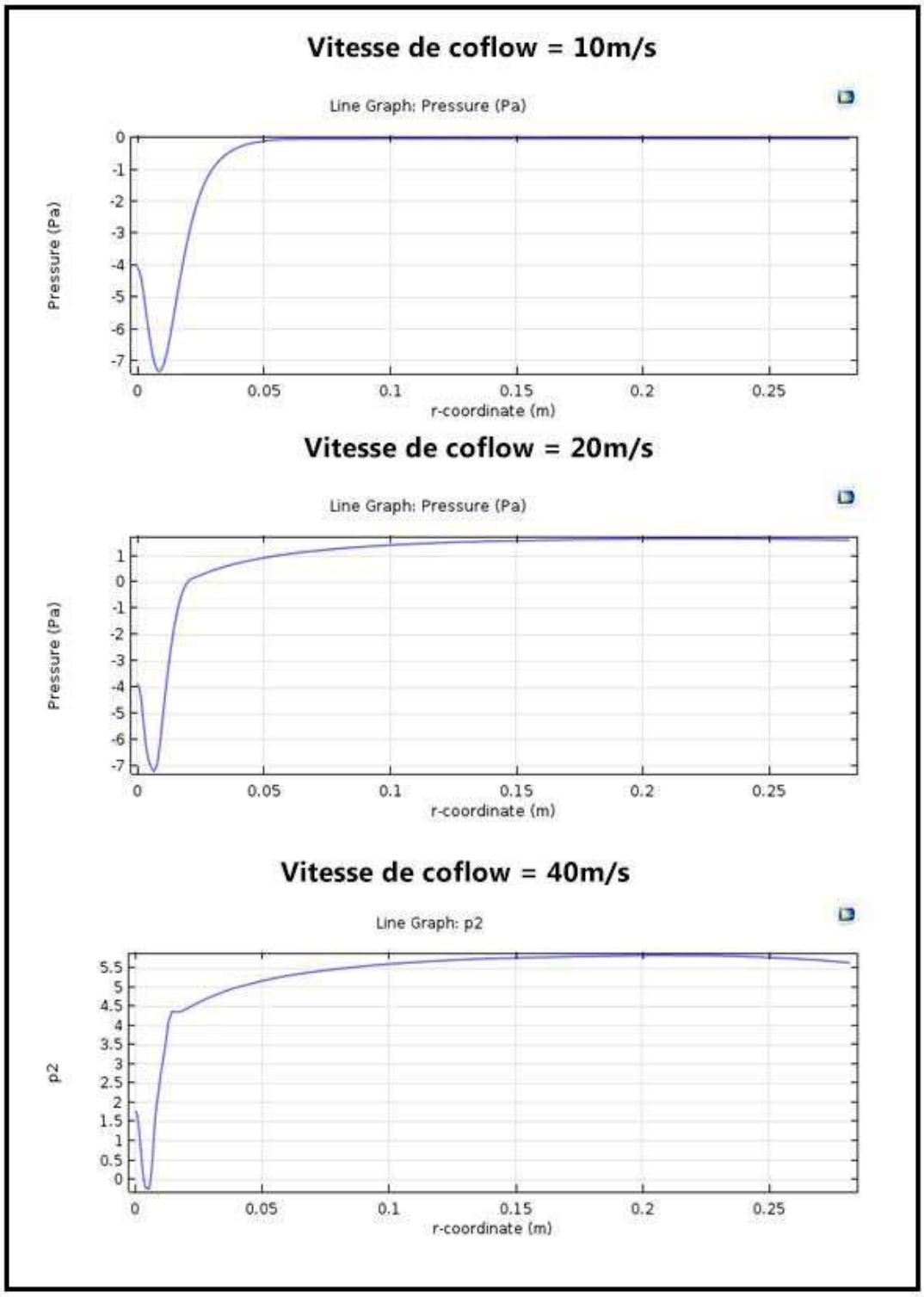


Figure IV.16 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la pression avec la variation de la vitesse de coflow.

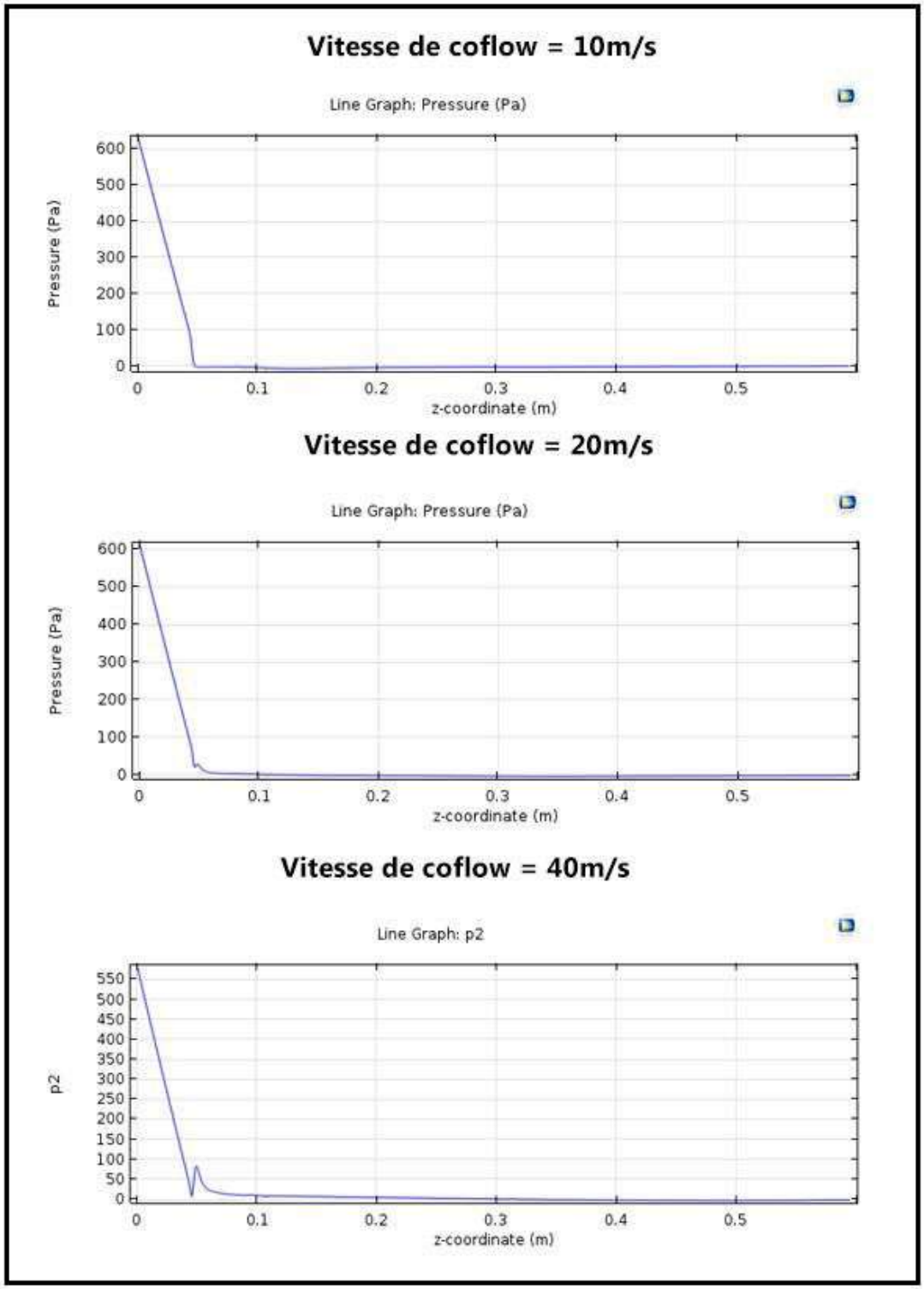


Figure IV.17 : Evolution axiale Cut Line 2D 3 de la pression avec la variation de la vitesse de coflow.

A partir des courbes de l'évolution de la pression, on peut voir l'influence de la

- variation de Vitesse de coflow d'entrée sur la pression (Figure(IV.15_16_17)) :
- La pression de la flamme est proportionnelle à la valeur de la vitesse d'entrée de coflow. En effet, lorsque le débit de coflow augmente, la pression augmente.

- Radialement (cut line 1et cut line 2) on remarque que le profil de la pression est symétrique par rapport à l'axe central de brulure.
- La taille de contour flamme devient plus importante pour de faibles vitesses d'entrée d'air.
- Axialement remarque une fluctuation dans la même zone pour les trois graphes, apparition d'un pic de pression dans la courbure du graphe, ce pic de pression atteint une valeur plus importante quand la vitesse est plus élevée

IV.4.2 Effet de la température d'entrée sur la flamme :

Le but de cette partie est de voir l'effet de variation de la température d'entrée sur la structure de la flamme, ainsi que son influence sur la combustion. On suppose que a température vari à (**200 k, 500k, 800k)**

	La vitesse	**pression**	**température**	**Modèle de turbulence**
Coflow	0.7 m/s	1 atm	**200° K** **500° K** **800° K**	**k-ω**
Jet	76 m/s	1 atm		

IV.4.2.a Champ de pression:

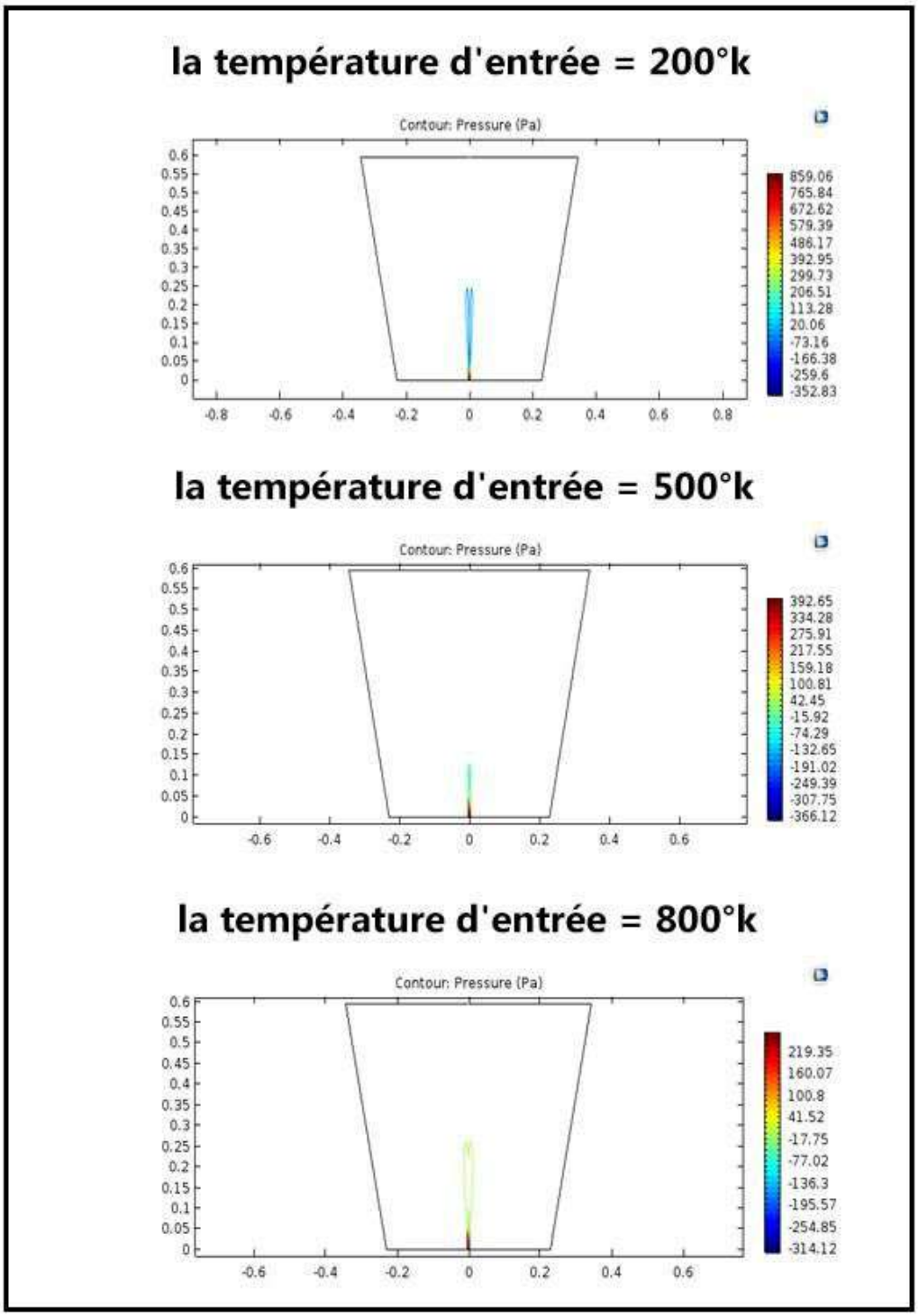


Figure IV.18 : Champ de pression avec la variation de la température d'entrée

La Répartition de la pression dans le bruleur pour différentes valeurs de la température d'entrée est montrée sur la figure (IV.18)

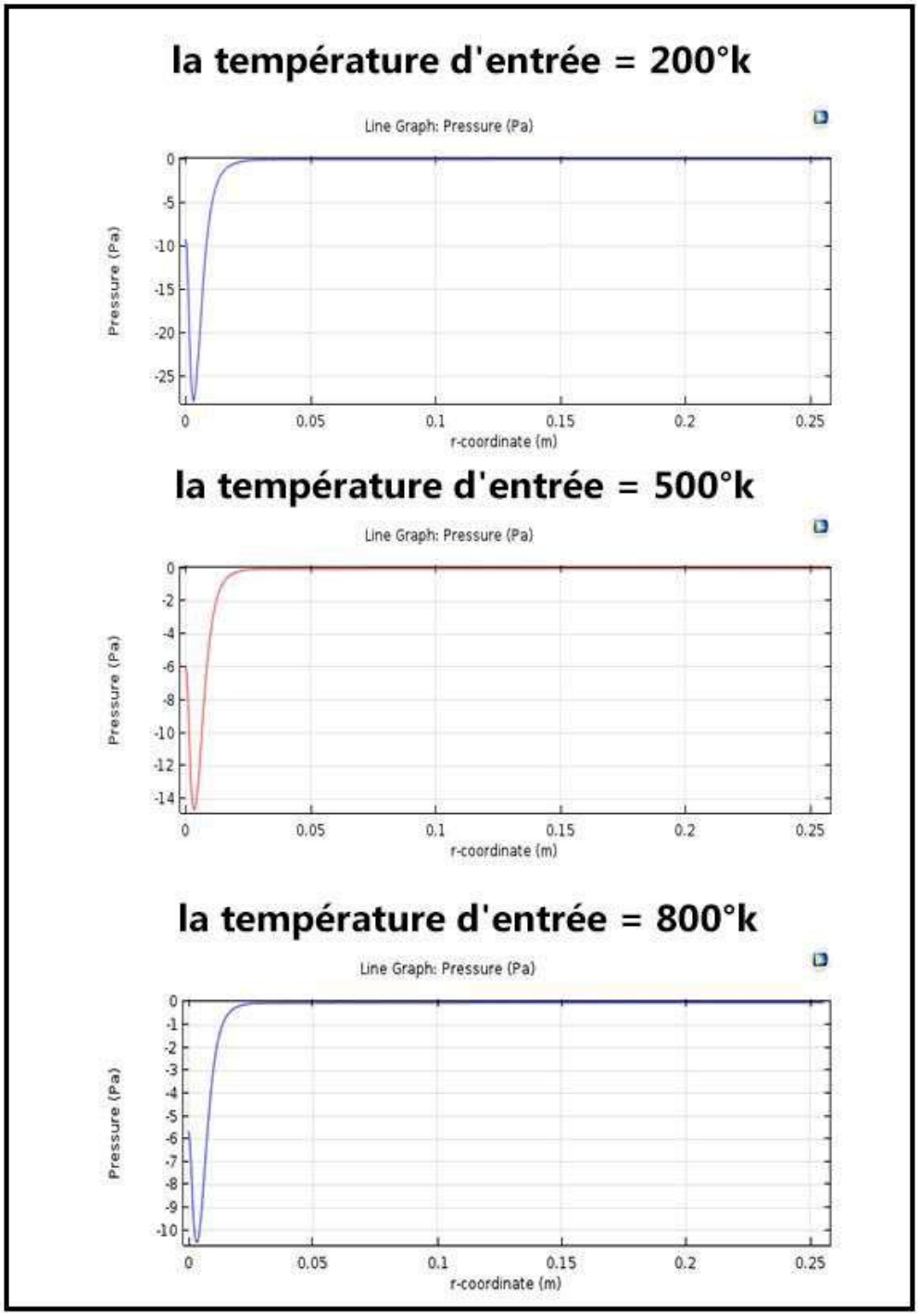


Figure IV.19 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la pression avec la variation de la température d'entrée.

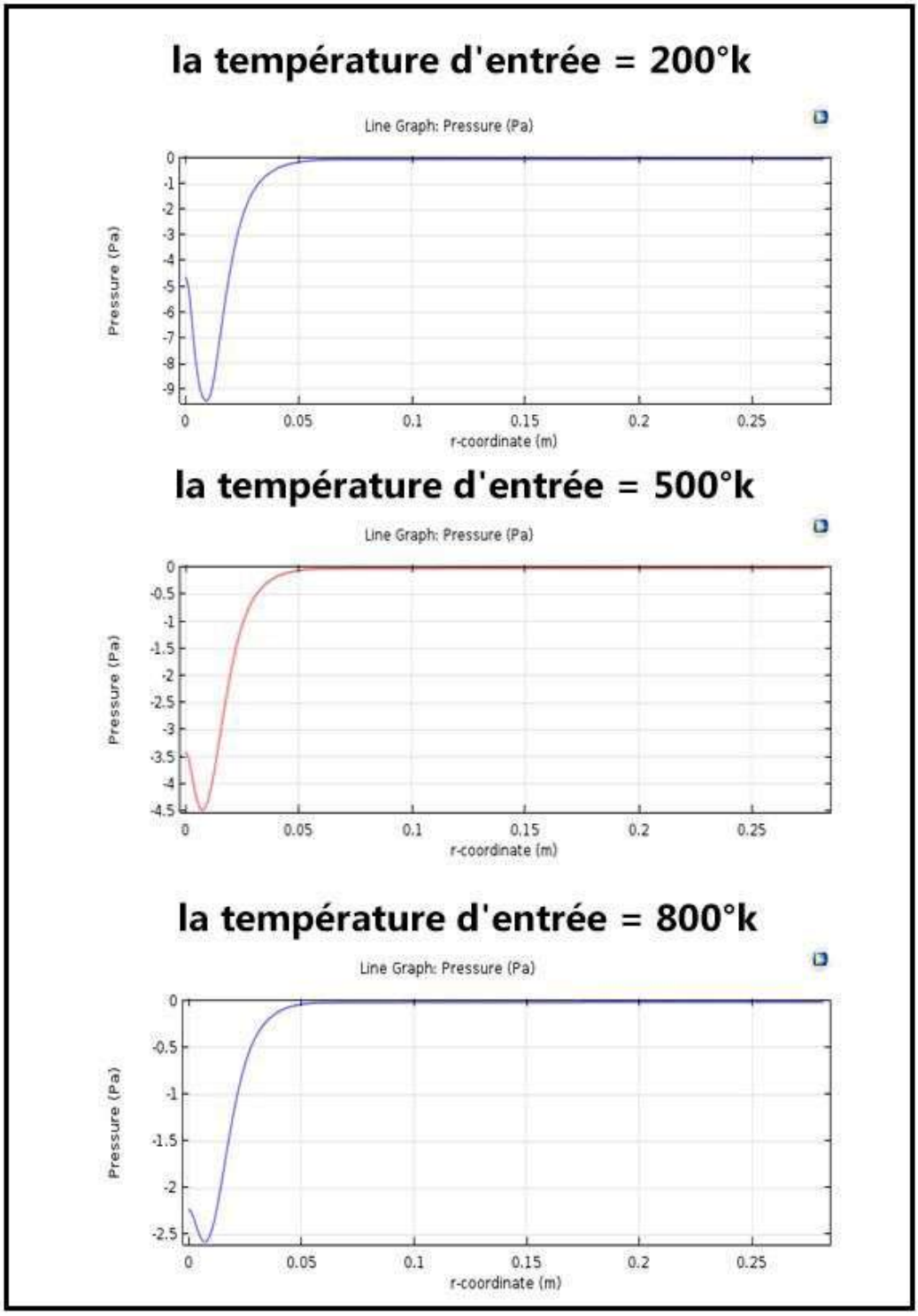


Figure IV.20 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la pression avec la variation de la température d'entrée.

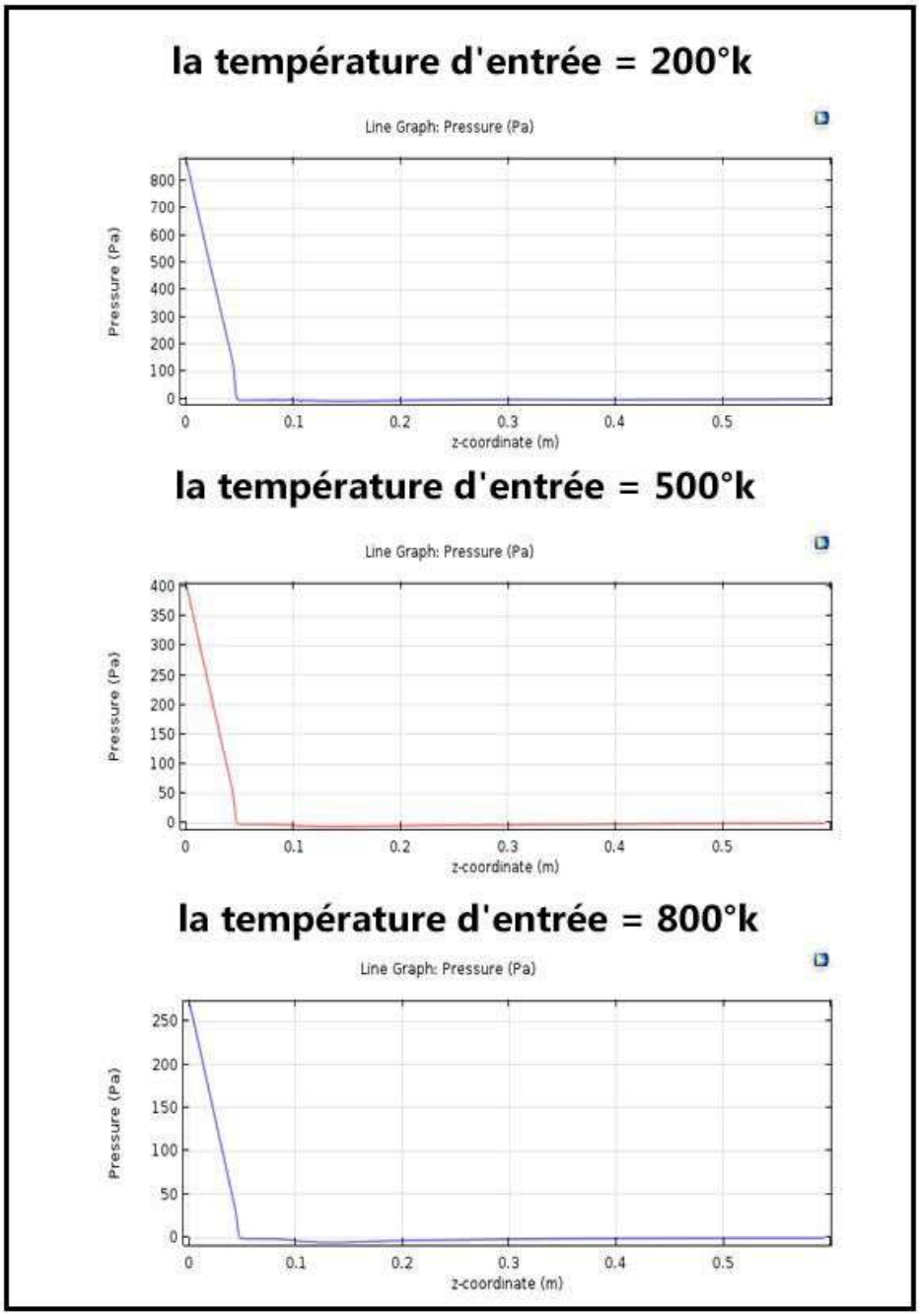


Figure IV.21 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la pression avec la variation de la température d'entrée.

A partir des courbes de l'évolution de la pression, on peut voir l'influence de la Variation de la température d'entrée sur la pression (Figure(IV.19_20_21)) :

- La pression de la flamme est proportionnelle à la valeur de la température d'entrée. En effet, lorsque température d'entrée augmente, la pression augmente.
- Radialement (cut line 1et cut line 2) on remarque que le profil de la pression est symétrique par rapport à l'axe central de brulure.
- La taille de contour flamme devient plus importante pour de faibles valeurs de température d'entrée.

IV.4.2.b Champ de vitesse:

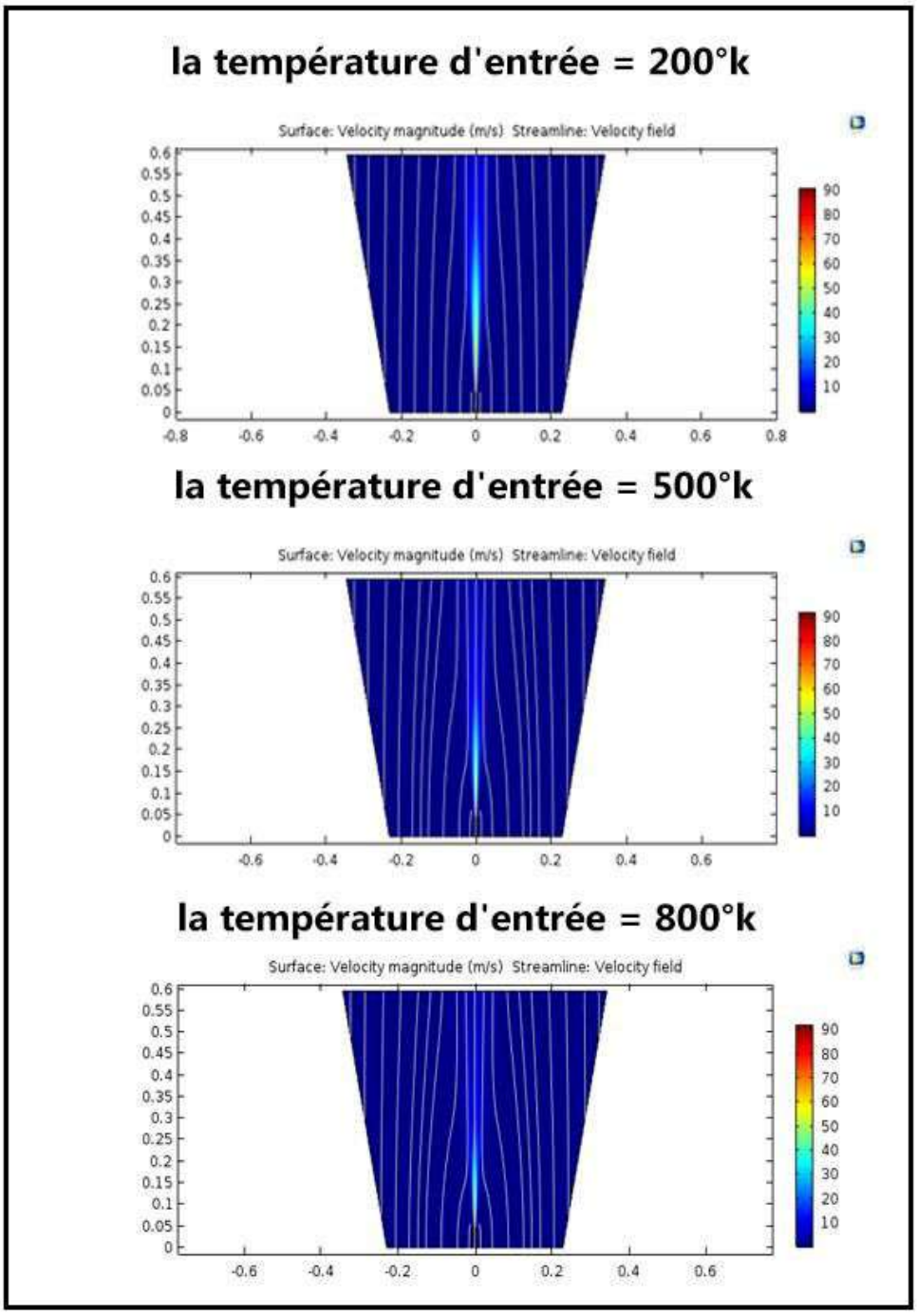


Figure IV.22 : Champ de vitesse avec la variation de la température d'entrée.

Répartition de la vitesse de brûleur de différente température d'entrée est montrée sur la figure précédant. On peut voir que, l'augmentation de la température d'entrée influencé sur l'existence de la vitesse

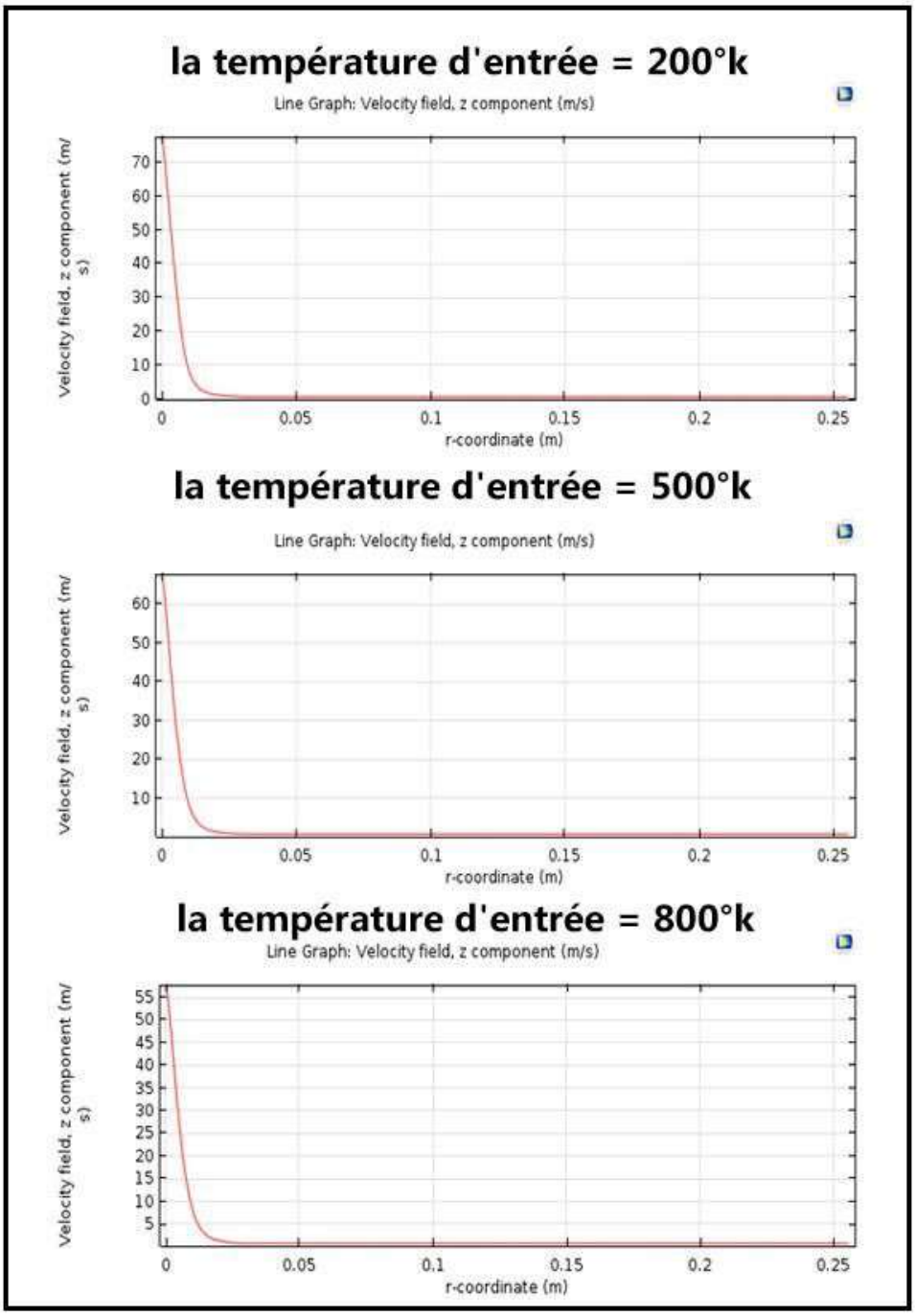


Figure IV.23 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la vitesse avec la variation de la température d'entrée

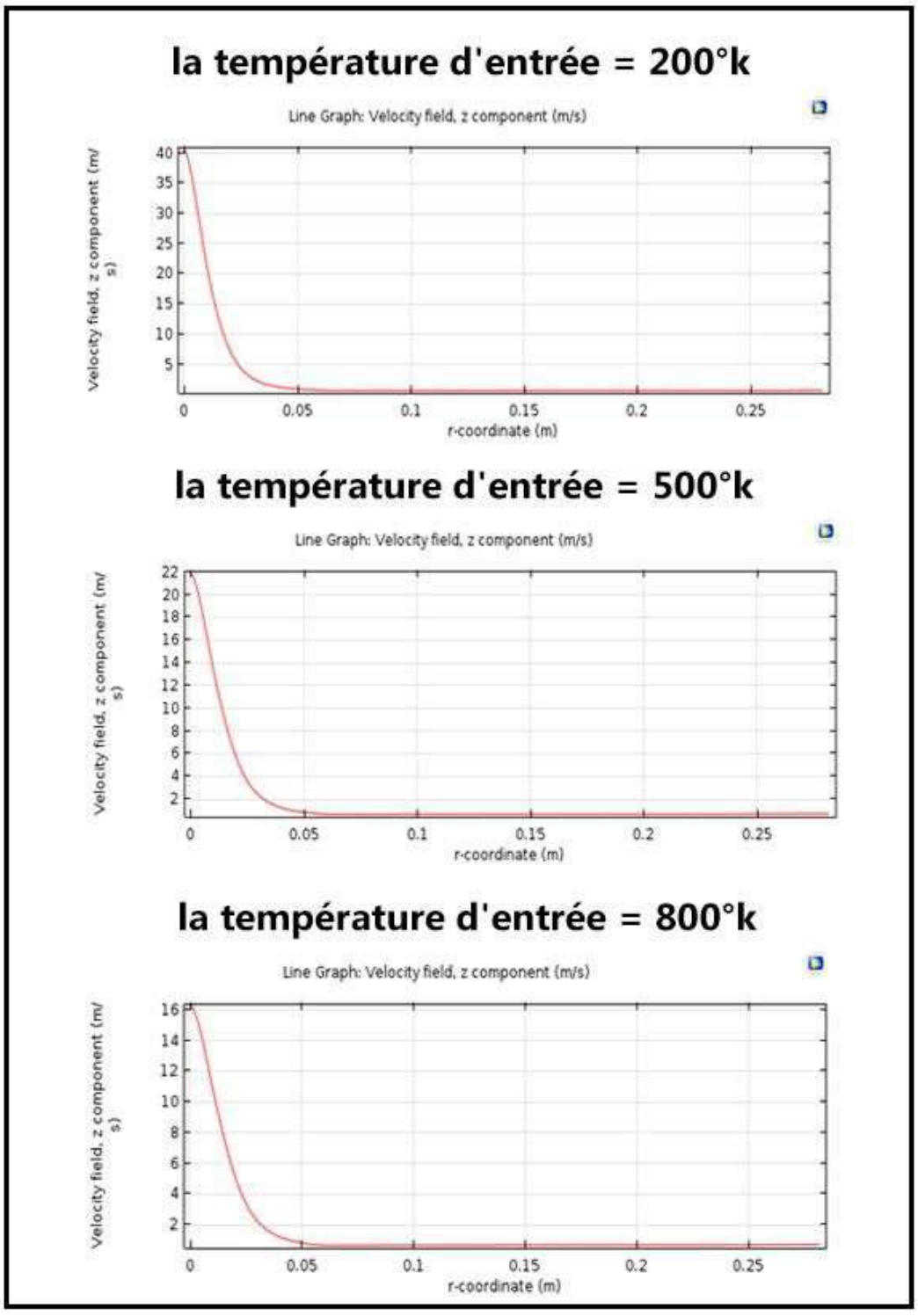


Figure IV.24 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la vitesse avec la variation de la température d'entrée

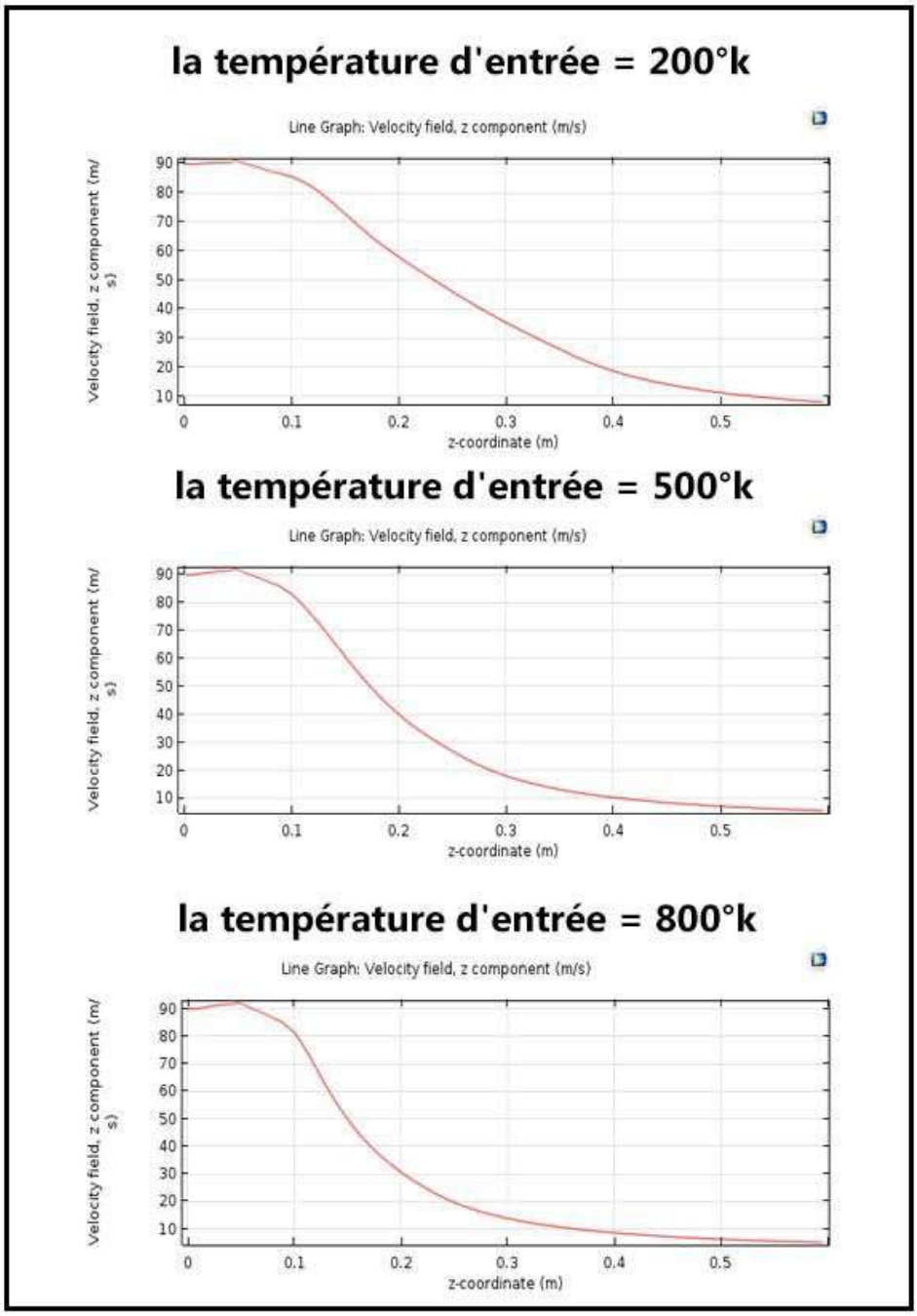


Figure IV.25 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la vitesse avec la variation de la température d'entrée.

L'influence de la variation de température d'entrée sur la vitesse est représentée sur les graphes ci-dessus :

- les évolutions radiales sont représentées sur les graphes (figure IV.23_24) et montrent que la vitesse est inversement proportionnelle avec l'augmentation de la température d'entrée, ainsi que la figure 21 montre que la largeur et la longueur de la flamme diminuent avec
- l'augmentation de la température d'entrée.
- D'autre part, axialement la vitesse devient nul rapidement quand la température augment.

IV.4.3 Effet de la vitesse d'entrée sur la flamme :

On veut mettre en évidence l'effet de la vitesse d'entrée du jet sur la structure de la flamme. On a varié la vitesse d'entrée du jet (syngas) en trois variables **(10 m/s, 40 m/s, 80 m/s)** et on fixe toutes les conditions initiales.

	La vitesse	**pression**	**température**	**Modèle de turbulence**
Coflow	0.7 m/s	1 atm	292 K	**k-ω**
Jet	10 m/s	1 atm	292 K	
	40 m/s			
	80 m/s			

IV.4.3.a Champ de la fraction massique de H2:

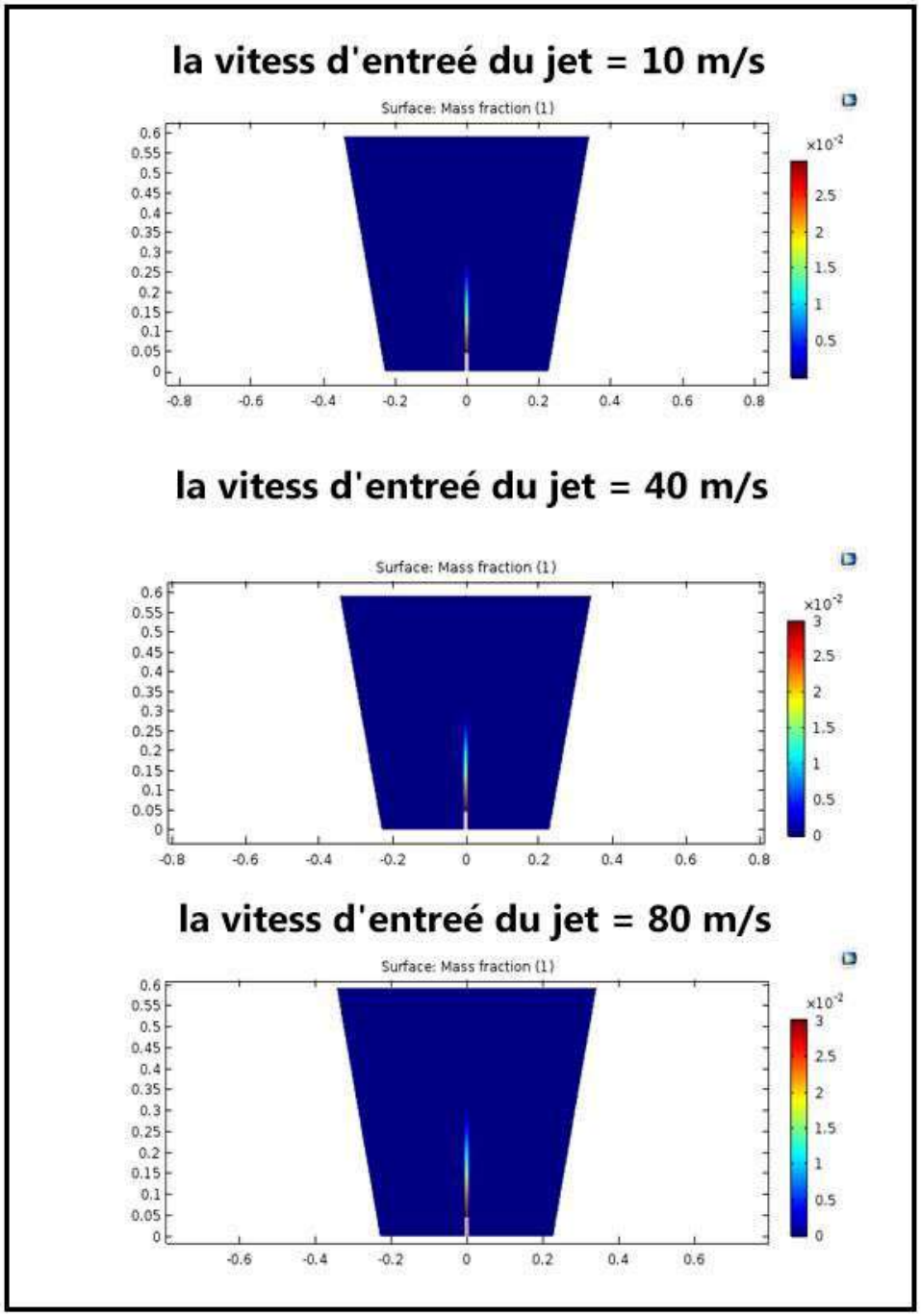


Figure IV.26: Champ de la fraction massique de H2 avec la variation de la vitesse d'entrée du jet.

Répartition de la fraction massique de H2 de le bruleur de différent Vitesse de fuel est montrée sur la figure précédant. On peut voir que, l'augmentation de la vitesse de fuel influencé sur l'existence de la fraction massique de CH4 telle que, sa fraction massique augmente progressivement jusqu'à une grand valeur.

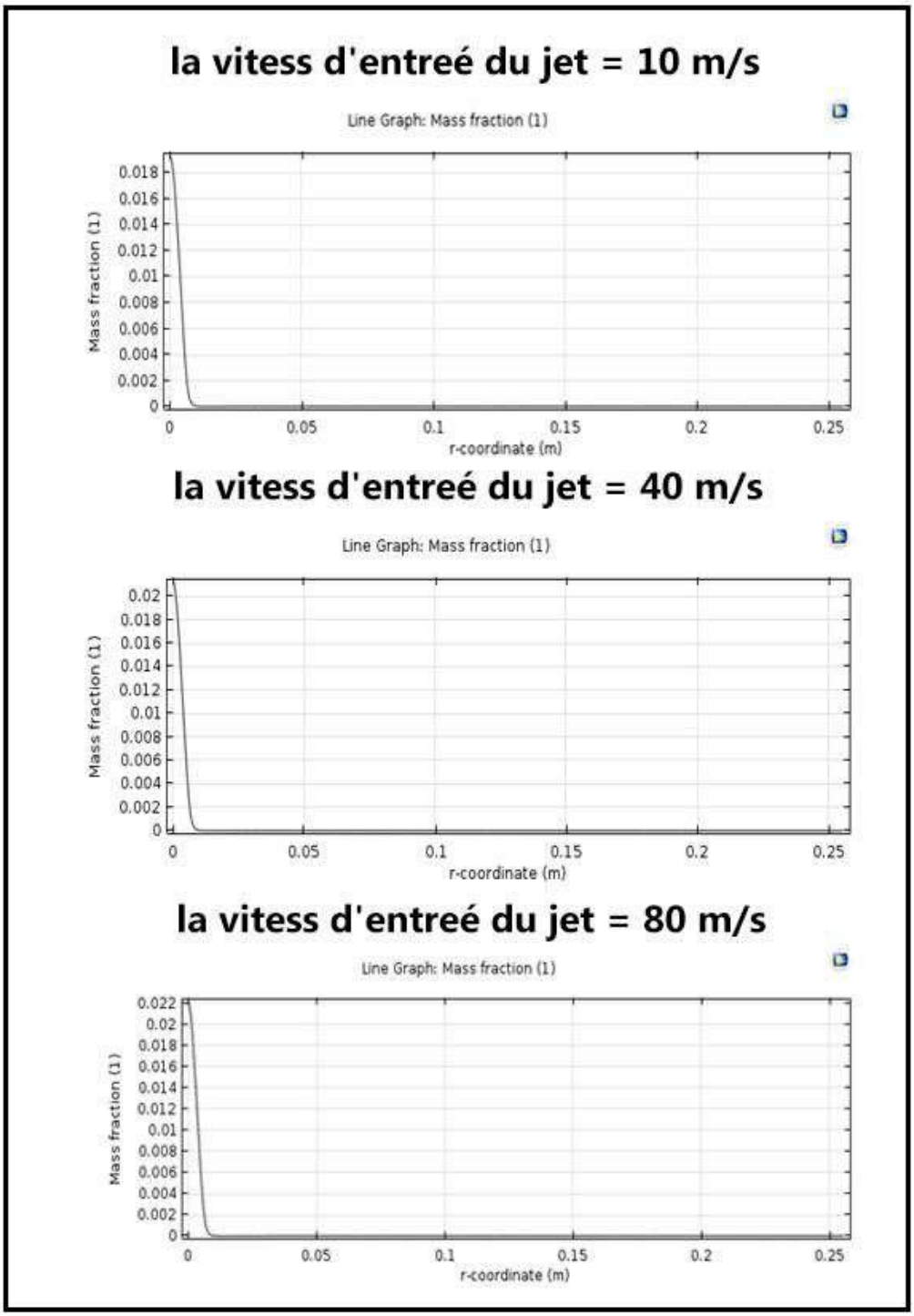


Figure IV.27 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la fraction massique H2 avec la variation de la vitesse d'entrée du jet.

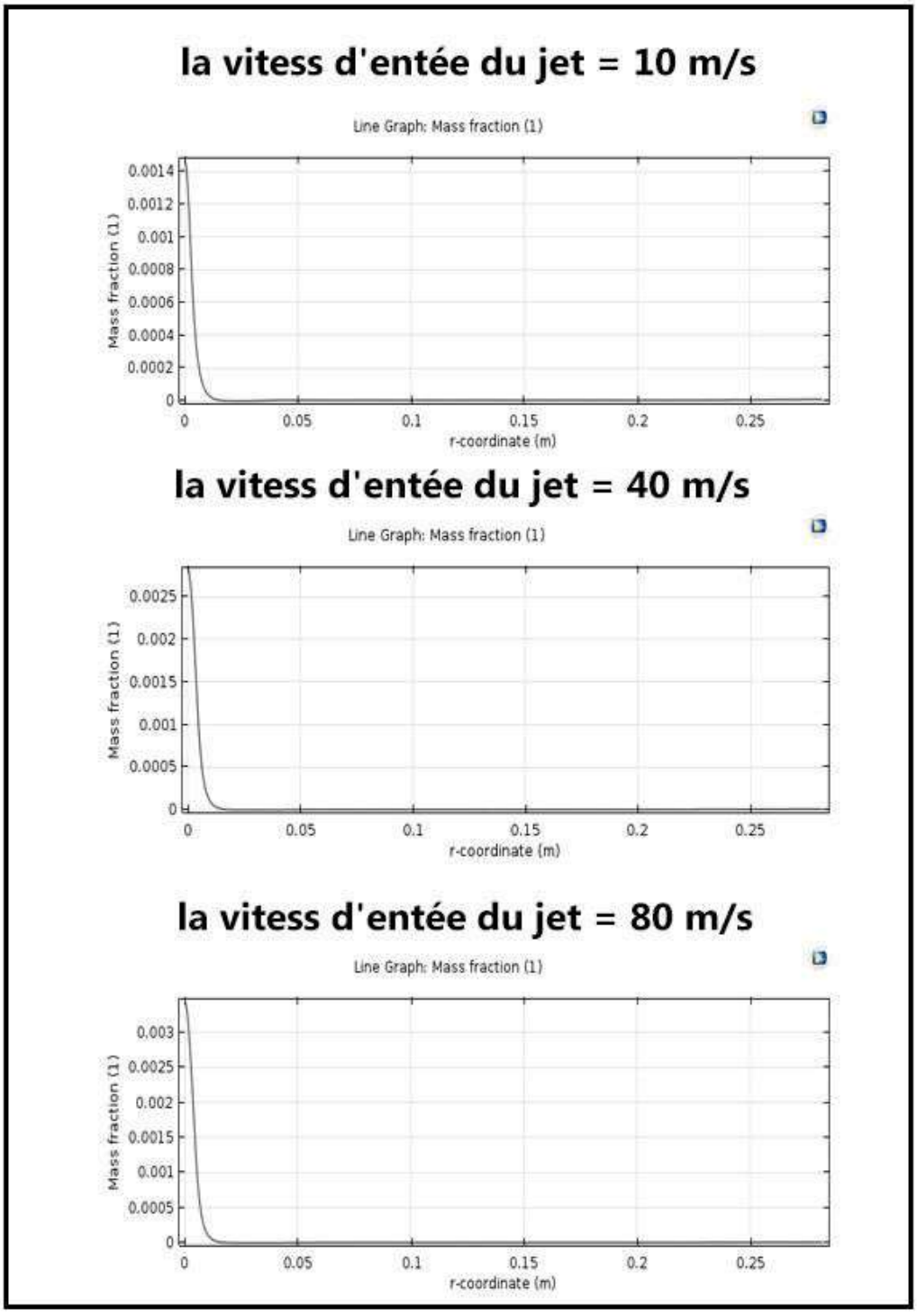


Figure IV.28 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la fraction massique H2 avec la variation de la vitesse d'entrée du jet.

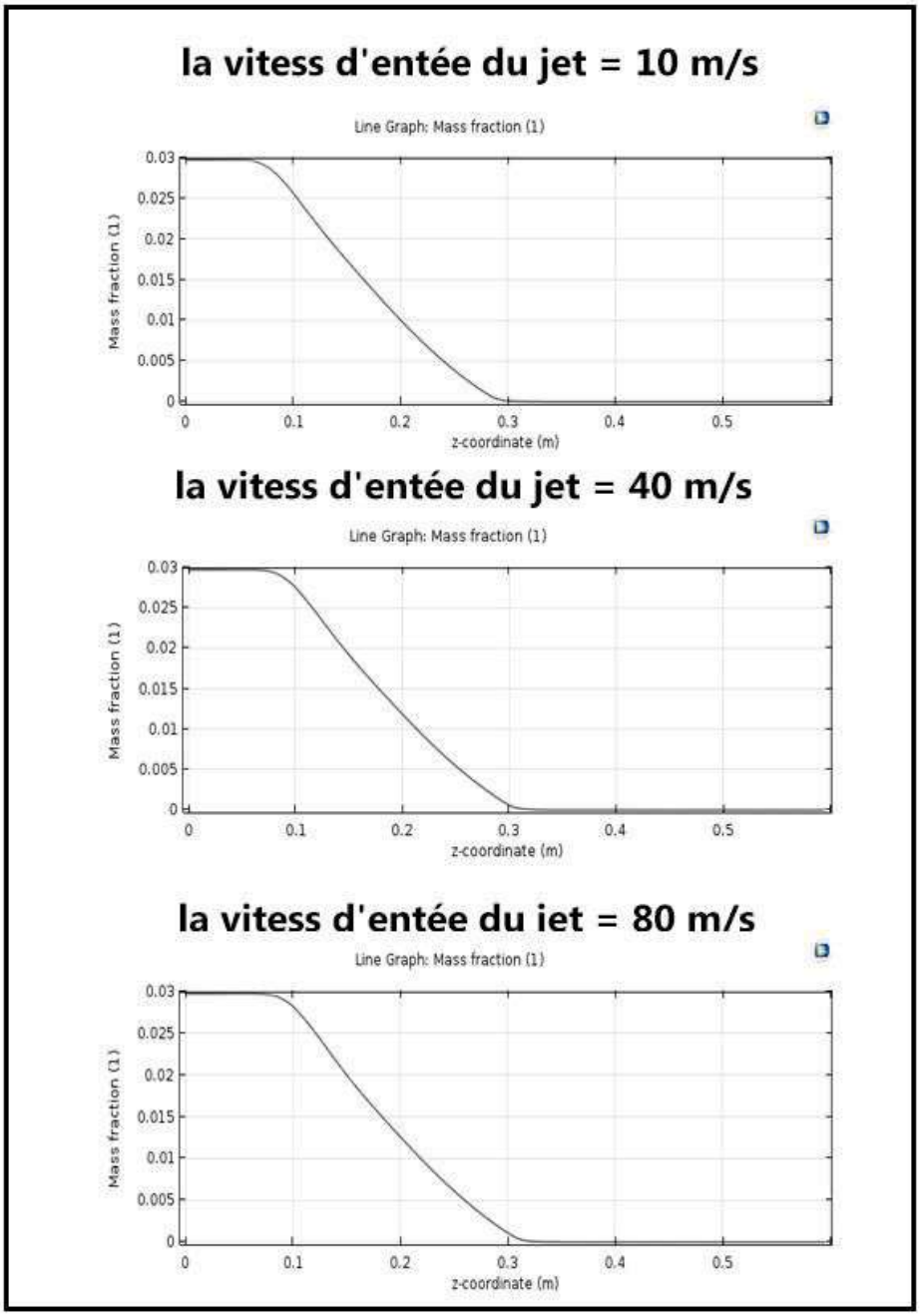


Figure IV.29 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la fraction massique H2 avec la variation de la vitesse d'entrée du jet.

L'augmentation de la vitesse d'entrée du jet implique l'augmentation de fraction massique de H2 dans le bruleur alors :

- Pour les line radiales on remarque que les graphs sans symétrie par rapport a l'axe de bruleur et peut voir une différent entre les résultats qui obtient dans les graphs tel que l'augmentation de la fraction massique de H2 est proportionnelle avec l'augmentation de la vitesse du jet.
- Pour la line axiale (figure IV.25) la fraction massique de H2 prendre une valeur maximal égale 0.03 et après sa diminue progressivement jusqu' à une valeur nul.

IV.4.3.b Champ de la température :

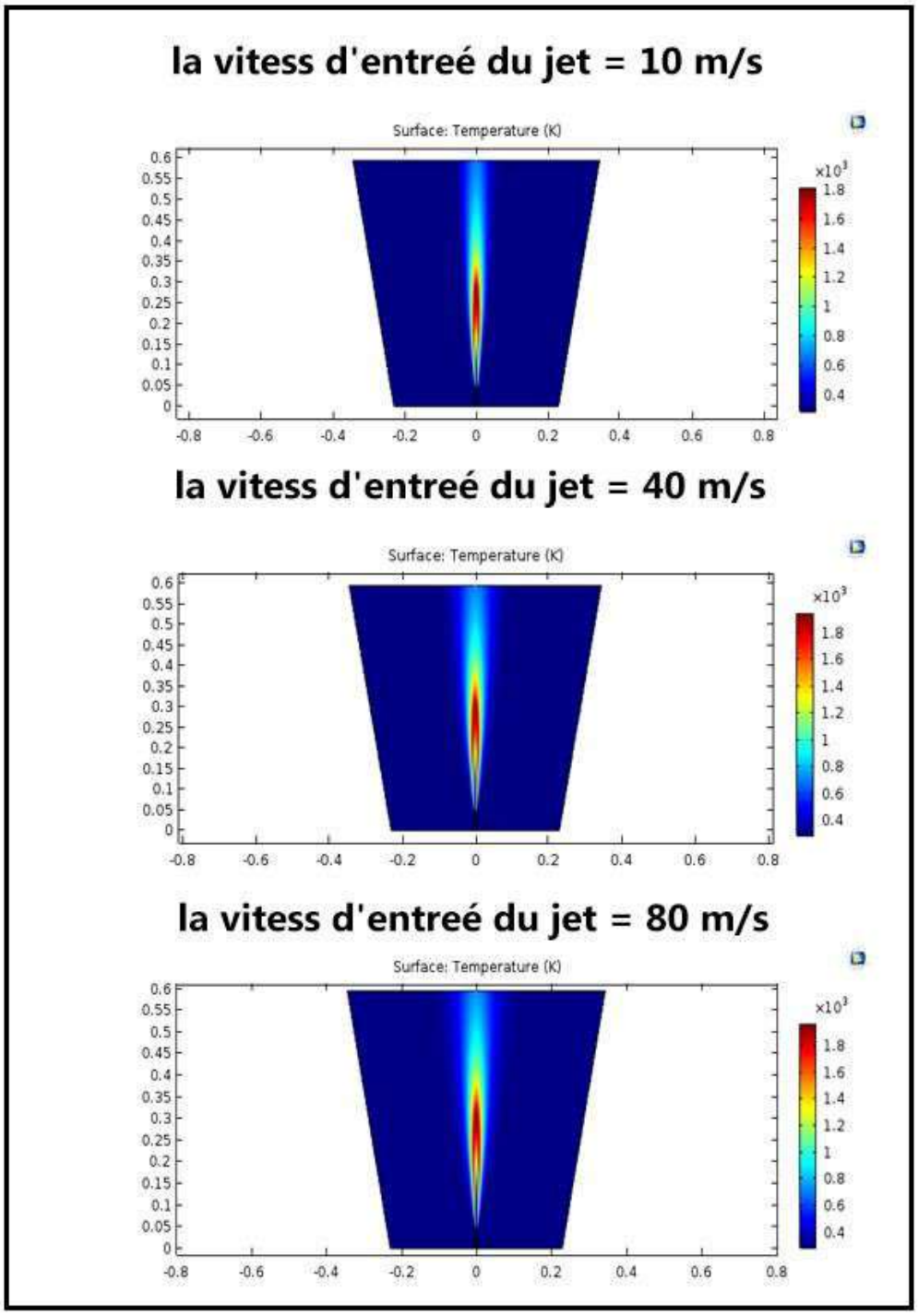


Figure IV.30 : Champ de la température avec la variation de la vitesse d'entrée du jet.

Répartition de la température de bruleur de différent Vitesse du jet est montrée sur la figure précédant la température maximale de la combustion dans la zone de réaction Prendre sa valeur maximale à l'ordre plus de 1800° [k].

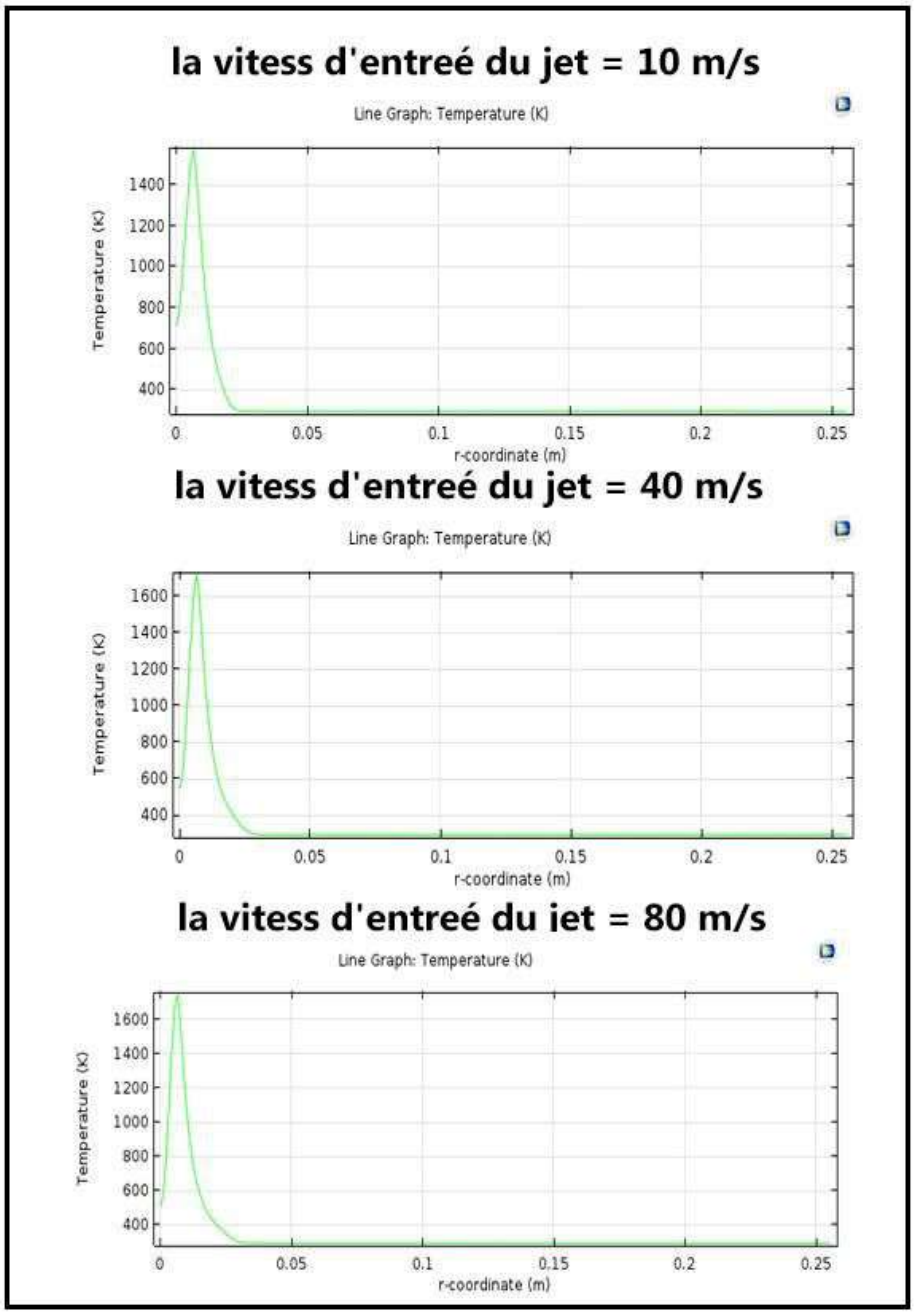


Figure IV.31 : Evolution radiale Cut Line 2D 1 de la température avec la variation de la vitesse d'entrée du jet.

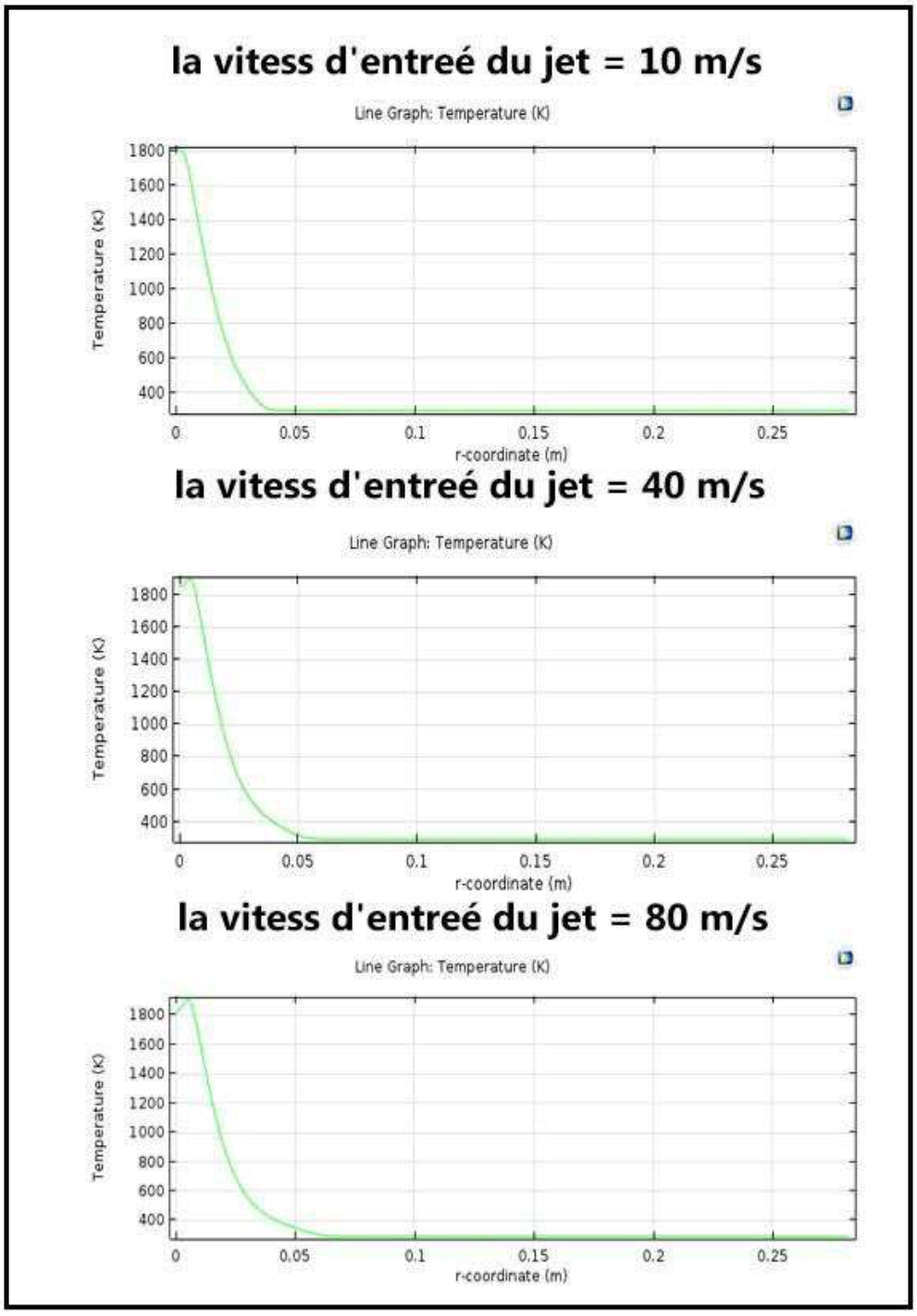


Figure IV.32 : Evolution radiale Cut Line 2D 2 de la température avec la variation de la vitesse d'entrée du jet.

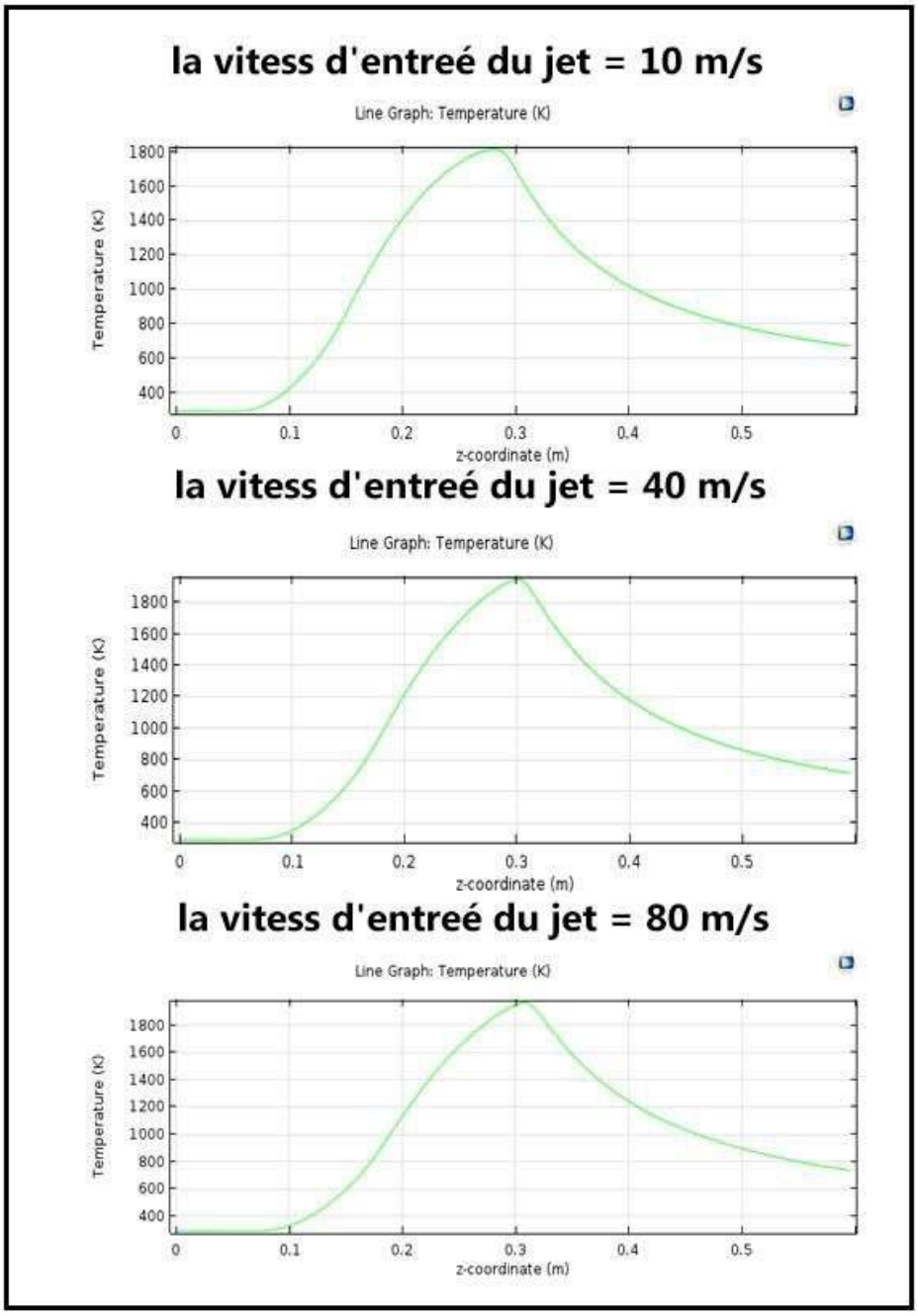


Figure IV.33 : Evolution axial Cut Line 2D 3 de la température avec la variation de la vitesse d'entrée du jet.

les évolutions radiale pour une vitesse d'entrée du jet égale 80 m/s la température prendre une valeur maximal égal a plus 1800° K loin de bec bruleur, tel que la largeur et la longueur de flamme sa sera très grand.

A d'autre par pours les évolutions axiales en remarque que l'augmentation de la température est proportionnelle avec l'augmentation de la vitesse d'entée du jet.

Conclusion générale

Le présent travail a porté essentiellement sur la simulation numérique du phénomène de l'aérothermochimie turbulente dans une flamme de non-pré-mélange, utilisant le code de calcul **COMSOL Multiphysics.** Le modèle de la turbulence adopté est le modèle de turbulence K-ω, avec un mécanisme de réaction réduit à une seule étape.

Dans ce travail, nous avons présenté les résultats obtenus par la modélisation d'un écoulement réactif dans un brûleur à jet rond. La configuration étudiée est basée sur un jet axial et turbulent, souvent rencontré dans les flammes de diffusion (non pré-mélange).

Ce travail s'inscrit dans le cadre des études fondamentales de combustion turbulente où l'objectif est de comprendre les mécanismes d'interaction entre la flamme et la turbulence. L'intérêt de ce dispositif réside dans le contrôle des conditions initiales (pression, température, richesse du mélange réactif) et des paramètres de la turbulence (intensité et échelle caractéristique de la turbulence).

Une étude paramétrique a été menée où on a examiné l'effet des conditions initiales sur la structure de la flamme en occurrence : la vitesse du co-écoulement (Air), la vitesse du jet central (syngaz) et la température d'entrée.

Les résultats de simulation obtenus permettent d'examiner l'évolution axiale et radiale de la température, de la pression, de la vitesse et des fractions massiques des espèces CO, CO_2, H_2, H_2O, N_2.

On peut synthétiser les principaux résultats de l'étude paramétrique menée dans les points suivants :

- La structure de flamme devient plus intense avec la diminution de la vitesse d'entrée de l'air (coflow). Ainsi, l'augmentation de cette vitesse provoque un refroidissement de la flamme et peut entrainer son extinction.
- Le taux de fraction massique du CO2 est inversement proportionnel à la valeur de la vitesse d'entrée de l'air. Cependant, on remarque que le contour de la fraction massique du CO2 est symétrique par rapport à l'axe central du bruleur.
- La taille de contour de la pression devient plus importante pour de faibles vitesses d'entrée d'air par contre la pression atteint une valeur plus importante (pic) quand la vitesse du jet est plus élevée.
- Radialement, pour une vitesse d'entrée du jet donnée, la température prend une valeur maximale d'environ1800°K. Cette valeur peut dépasser si on augmente le

débit du jet central loin du bec du bruleur. D'autre part, pour les évolutions axiales on remarque que l'augmentation de la température est proportionnelle avec l'augmentation de la vitesse d'entée du jet.

- La largeur et la longueur de la flamme sera très grande pour des grandes valeurs de débits.
- Les conditions thermodynamiques d'introduction du jet fuel ont été aussi examinées. On a remarqué que l'augmentation de la température d'entrée élève la valeur de la température maximale qui règne dans la chambre de combustion et peut atteindre 2200°K par contre la longueur axiale de la flamme se rétrécit et s'accroche au bec, ce qui peut représenter un risque de fusion du bec et destruction du bruleur. Un refroidissement par un jet d'air auxiliaire près des parois s'avère indispensable.

En perspectives, il est important d'étudier la variation de la composition du syngaz et tendre la composition vers une composition propre du point de vue impact sur l'environnement.

Références Bibliographie

[1]https://www.clarke-energy.com/fr/synthesis-gas-syngas/

[2] HIGMAN, C., ET VAN DER BURGT, M. gasification. Gulf professional publishing, 2nd édition 2008 .

[3]http://www.gazeification.info/

[4] FURIMSKY, E. La gazéification dans la raffinerie du pétrole du XXIe siècle. Oil&GasScience and Technology - Rev. IFP, 54(5), 597–618, 1999

[5] JEAN CAUDALE , « Simulation numérique du reformage autothermique du Methane", thèse de doctorat ,PARIS (2013).

[7] http://www.bepita.net/materiels/biomasse/gazeification.pdf

[8] D'après Observ'ER, Production d'électricité d'origine renouvelable (édition 2011).

[9] http://www.cea.fr/jeunes/themes/l_energie/l_energie/caracteristiques_des_diverses_energies

[10] http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/LET-danford-lake/documents/DQ13-1.pdf

[11]David Pavé , « Contribution à l'étude de la structure des flammes turbulentes de pré mélanges pauvres de méthane-air » ,thése de doctorat , Orléans (2005).

[12]Nial Mohamed « Caractérisation des paramètres de stabilisation d'une flamme d'un bruleur industriel : Applications aux fours de cimenterie » , Mémoire de Magistère, Chlef 2016

[13]Benzerouhk Abdelkader, simulation numérique du comportement d'une flamme non pré-mélangé hydrogène/air d'un milieu confiné, Mémoire de Master Université de Médéa, 2013.

[14]Guillaume Albouze, Simulation aux grandes échelles des écoulements réactifs non-Pré mélangés, thèse doctorat, université de Toulouse, France, 2009.

[15]BOUKHELEF Mohamed et ALLEG Karima, Etude du comportement de la flammed'Hydrogène dans des Canaux en utilisant une Approche CFD, Mémoire de Master Université de Médéa, 2014.

[16]P. Hollmuller, J.-M. Joubert, B. Lachal et K. Yvon, Les piles à combustible, état du développement : PRINGENT. Editions Technip, 2002

[17] R.Borghi, M.Destriau, « La combustion et les flammes » ,Edition Technip (1995)

[18]DAOUD Atallah et GACHI Allal, Etude de l'effet des conditions d'injection sur les caractéristiques thermiques de la flamme dans un système de combustion à géométrie complexe, Mémoire de MasterUniversité de Médéa,2015

[19]https://www.comsol.fr/comsol-multiphysics 20/09/2016

[20] KERDACHE Yahia Abdelhamid, Modélisation du problème de fissuration des tubes en acier 304L utilisés dans une centrale électrique.

[21]A. Cuoci, A. Frassoldati, , G. Buzzi Ferraris, T. Faravelli, E. Ranzi, "The ignition, combustion and flame structure of carbon monoxide/hydrogen mixtures. Note 2: Fluid dynamics and kinetic aspects of syngas combustion", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, 2007, pp. 3486 – 3500.

[22]R. S. Barlow, G. J. Fiechtner, C. D. Carter, J.-Y. Chen, "Experiments on the Scalar Structure of Turbulent CO/H2/N2 Jet Flames," *Comb. and Flame,* vol. 120, 2000*,*
pp. 549-569.

[23]M. Flury, *Experimentelle Analyse der Mischungstruktur in turbulenten nichtvorgemischten Flammen*, Ph.D. Thesis, ETH Zurich, 1998.

[24]R. S. Barlow et al., "Sandia/ETH-Zurich CO/H2/N2 Flame Data - Release 1.1,", www.ca.sandia.gov/TNF, 2002.

[25]B.F. Magnussen and B.H. Hjertager, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," *16th Symp.(Int.) on Combustion*. Comb. Inst., Pittsburg, Pennsylvania, pp.719–729, 1976.

[26]A. Frassoldati, T. Faravelli, and E. Ranzi, "The Ignition, Combustion and Flame Structure of Carbon Monoxide/Hydrogen Mixtures. Note 1: Detailed Kinetic Modeling of Syngas Combustion Also in Presence of Nitrogen Compounds," *Int. J.Hydrogen Energy*, vol. 32, 2007, pp. 3471 – 3485.