



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



Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de la technologie

\*\*\*\*\*

Mémoire de projet de fin d'études présenté en vue de l'obtention du Diplôme de

Master

**Spécialité : Génie Mécanique**

**Option : Energétique**

**Thème**

**Etude théorique et expérimentale de la  
flamme d'un brûleur à gaz manuel de cuisine**

**Réalisé par :**

SEKOUANI Mohammed

**Encadré par :**

Dr. B. KHELIDJ

UDBKM

Année Universitaire : 2020/2021

## Résumé

L'Algérie est un pays producteur de gaz naturel liquéfié (GNL). Son économie dépend de son exportation. Il est donc tout à fait naturel qu'on s'intéresse de plus près au développement de cette ressource vitale pour le pays. De plus la combustion du gaz naturel émet principalement de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en faible quantité. Une qualité qui lui permet de générer 30 à 50 % d'émissions de CO<sub>2</sub> en moins que les autres combustibles.

Le GNL représente donc une excellente alternative pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre et lutter contre le réchauffement climatique. En développant l'usage du GNL, nous contribuons activement à la protection de l'environnement. Mais au vu des normes à l'échelle internationale sur les émissions de gaz nocifs qui sont de plus en plus sévères, est-il possible de les réduire encore plus tout en utilisant le GNL ? Dans le but de répondre à cette problématique, nous nous sommes fixés, comme objectif dans ce travail, l'élaboration d'un modèle mathématique qui nous permet de simuler la combustion d'un mélange air / GNL.

C'est dans cette optique que nous nous sommes intéressé dans ce travail dans la partie étude théorique à développer un modèle mathématique qui nous permettra de faire de la simulation afin de voir l'influence de certains paramètres sur la flamme d'un brûleur à gaz. Dans un deuxième temps une étude expérimentale sur le brûleur à gaz s'impose avant toutes simulations pour valider notre modèle mathématique.

Les résultats de simulations nous ont permis d'acquérir un certain nombre d'informations comme par exemple de déterminer le pourcentage idéal d'air qu'il faut mélanger au GNL pour réduire encore plus les gaz polluants comme le CO<sub>2</sub> tout en utilisant le GNL.

**Mots-clés :** Flamme d'un brûleur à gaz ; Réduction des émissions ; Expérimentation ; Modélisation ; Simulation ; Fluent.

## Abstract

Algeria is a country producing liquefied natural gas (LNG). Its economy depends on its export. It is therefore only natural that we take a closer look at the development of this vital resource for the country. In addition, the combustion of natural gas mainly emits water vapor and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in small quantities. A quality that allows it to generate 30 to 50% less CO<sub>2</sub> emissions than other fuels.

LNG therefore represents an excellent alternative for reducing greenhouse gas emissions and combating global warming. By developing the use of LNG, we are actively contributing to the protection of the environment. But given the increasingly stringent international standards for harmful gas emissions, is it possible to reduce them even further while using LNG ? In order to respond to this problem, we have set ourselves, as an objective in this work, the development of a mathematical model that allows us to simulate the combustion of an air / LNG mixture.

It is in this perspective that we are interested in this work in the theoretical study part to develop a mathematical model that will allow us to do simulation in order to see the influence of certain parameters on the flame of a gas burner. . Secondly, an experimental study on the gas burner is required before any simulations to validate our mathematical model.

The simulation results have enabled us to acquire a certain amount of information such as determining the ideal percentage of air to be mixed with LNG to further reduce polluting gases such as CO<sub>2</sub> while using LNG.

Keywords : Flame of a gas burner; Reduction of emissions; Experimentation ; Modelization ; Simulation ; Fluent.

### ملخص

الجزائر بلد ينتج الغاز الطبيعي المسال (LNG). يعتمد اقتصادها على تصديرها. لذلك من الطبيعي أن نلقي نظرة فاحصة على تطوير هذا المورد الحيوي للبلد. بالإضافة إلى ذلك ، فإن احتراق الغاز الطبيعي ينبعث منه بخار الماء وثنائي أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) بكميات صغيرة. جودة تسمح لها بتوليد 30 إلى 50٪ أقل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون مقارنة بأنواع الوقود الأخرى.

لذلك يمثل الغاز الطبيعي المسال بديلاً ممتازاً لتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. من خلال تطوير استخدام الغاز الطبيعي المسال ، فإننا نساهم بنشاط في حماية البيئة. ولكن بالنظر إلى المعايير الدولية الصارمة بشكل متزايد لانبعاثات الغازات الضارة ، فهل من الممكن تقليلها بشكل أكبر أثناء استخدام الغاز الطبيعي المسال؟ من أجل الاستجابة لهذه المشكلة ، وضعنا لأنفسنا ، كهدف في هذا العمل ، تطوير نموذج رياضي يسمح لنا بمحاكاة احتراق خليط الهواء / الغاز الطبيعي المسال.

من هذا المنظور ، نحن مهتمون بهذا العمل في جزء الدراسة النظرية لتطوير نموذج رياضي يسمح لنا بالقيام بالمحاكاة من أجل رؤية تأثير معلمات معينة على لهب الموقد الغازي. ثانيًا ، يلزم إجراء دراسة تجريبية على الموقد الغازي قبل أي محاكاة للتحقق من صحة نموذجنا الرياضي.

لقد مكنتنا نتائج المحاكاة من الحصول على قدر معين من المعلومات مثل تحديد النسبة المئوية المثالية للهواء المراد خلطه مع الغاز الطبيعي المسال لتقليل الغازات الملوثة مثل ثاني أكسيد الكربون أثناء استخدام الغاز الطبيعي المسال. الكلمات المفتاحية: لهب موقد غاز. تقليل الانبعاثات؛ التجريب برنامج محاكاة fluent؛ تصميم.

# Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

À ma femme,

À mes enfants,

À toute ma famille,

Et à tous mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

SEKOUANI MOHAMMED

# Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné la force et le courage pour mener à bien la rédaction de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur, de mémoire de Projet de Fin d'études, le docteur B. KHELIDJ, qui a accepté d'être le promoteur de mon projet.

Je tiens aussi à lui exprimer toute ma gratitude pour la confiance, les encouragements et la liberté qu'il m'a accordé durant tout le temps de la réalisation de mon mémoire et pour les idées et les critiques très constructives qu'il m'a fournies ainsi que pour sa disponibilité.

J'exprime un immense merci à monsieur HEMIS Samain pour son aide très précieuse.

Je remercie également tous mes professeurs et en particulier ceux du département de la technologie.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui de près ou de loin m'ont apporté leur soutien et leur aide.

# Table des matières

Résumés	
Dédicaces	
Remerciements	
Table des matières	
Listes des figures et des tableaux	
Nomenclature	
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etude bibliographique</b>	
I.1 Introduction	3
I.2 Etat de l'art	4
I.3 Notions de combustion	5
I.4 Catégorie de combustible	7
I.5 Les comburants	7
I.6 Le triangle de feu	7
I.7 Les différents types de combustion	8
I.7.1 Combustion rapide	8
I.7.2 Combustion lente	8
I.7.3 Combustion complète	8
I.7.4 Combustion incomplète	9
I.7.5 Combustion stœchiométrique	9
I.8 Différence entre la combustion pré-mélangée et non pré-mélangée	9
I.8.1 La combustion pré-mélangée	9
I.8.2 La combustion non pré-mélangée	9
I.9 Les instabilité de combustion	10
I.10. Généralité sur la flamme	10
I.10.1 La flamme	10
I.10.2 La propagation de la flamme	11
I.10.3 Les différents types de la flamme	12
I.10.4 Les suis	13
<b>Chapitre II. Modélisation</b>	
II.1 Géométrie du problème	15
II.2. Equations de l'aérothermochimie	15
II.2.1. Equation de continuité	16
II.2.2. Equation de conservation de quantité de mouvement	16
II.2.3. Equation de conservation de l'énergie	17
II.2.4. Equation de conservation des espaces chimiques	18
II.3. Modélisation de la turbulence	18
II.3.1 Le modèle k-epsilon standard	18
II.4. Modélisation de la combustion	19
II.4.1. Le modèle EDM (Eddy dissipation model)	19

## Table des matières

<b>Chapitre III : Simulation et expérimentation</b>	
III.1. Simulation	21
III.1.1 Introduction	21
III.1.2. Conception de la géométrie et génération de maillage	21
III.1.2.1 Conception de la géométrie	21
III.1.2.2 Génération de maillage	22
III.1.3. Conditions aux limites	22
III.1.4. Choix des paramètres sous Fluent	23
III.2. Expérimentation	24
III.2.1 Introduction	24
III.2.2 Méthode expérimentale	24
III.2.3 Matériel	24
III.2.4 Calcul de vitesse à différents débits de gaz	26
<b>Chapitre IV : Résultats et discussion</b>	
IV.1 Introduction	29
IV.2 Résultats expérimentaux	29
IV.3. Résultats numériques	30
IV.3.1. Contours de température	31
IV.3.2. Contours des Fractions massiques	32
IV.3.3 Profil de température	40
IV.3.4 Profil de gaz butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	41
IV.3.5 Profil des fractions massiques	42
<b>Conclusion générale</b>	<b>45</b>
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Annexes</b>	
Annexe 1 : Certificat d'étalonnage balance électronique KERN	
Annexe 2 : Certificat d'étalonnage thermomètre FLUKE	

## Listes des figures et des tableaux

### Liste des figures

N° de figure	Titre	N° de page
<b>Fig. I.1.</b>	Le triangle du feu montrant l'association des trois éléments indispensables pour une combustion chimique.	7
<b>Fig. I.2.</b>	a) Flamme prémélangée, b) Flamme de diffusion	13
<b>Fig. I.3.</b>	Différents systèmes pratiques de combustions classées selon le type d'introduction des réactifs (prémélangée ou non) et la nature laminaire ou turbulente De l'écoulement.	14
<b>Fig. II.1</b>	Géométrie de de la chambre de combustion	15
<b>FigIII.1.1</b>	Géométrie de la chambre de combustion	21
<b>Fig. III.1.2</b>	Maillage de la géométrie	22
<b>FigIII.1. 3. a</b>	Conditions aux limites imposées (sur un schéma)	23
<b>Fig.III.1.3. b</b>	Conditions aux limites imposées (sur une coupe)	23
<b>Fig.III.1.4.</b>	Paramètres sous fluent	24
<b>Fig. III.2.1</b>	Brûleur à gaz manuel de cuisine avec flamme réglable	24
<b>Fig. III.2.2</b>	Balance digital	25
<b>Fig. III.2.3</b>	Composantes du brûleur TORCH-400	25
<b>Fig. III.2.4</b>	Outil de mesure de température	26
<b>Fig. III.2.5</b>	Thermocouple type-k	26
<b>Fig.III.2.6</b>	La vanne réglage de débit du brûleur	26
<b>Fig.III.2.7</b>	Mesure de poids de brûleur	27
<b>Fig. III.2.8</b>	Courbe d'étalonnage vitesse vs position de la vanne	28
<b>Fig.IV.1</b>	Flamme pour une ouverture de la vanne au minimum	29
<b>Fig. IV.2.</b>	Flamme pour une ouverture de la vanne à moitié	29
<b>Fig.IV.3</b>	Flamme pour une ouverture de la vanne au maximum	30
<b>Fig. IV.4</b>	Contour de température	32
<b>Fig. IV.5.</b>	Contour de butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	34
<b>Fig. IV.6</b>	Contour de O <sub>2</sub>	35



## **Listes des figures et des tableaux**

<b>Fig. IV.7</b>	Contour de CO <sub>2</sub>	37
<b>Fig. IV.8</b>	Contour de H <sub>2</sub> O	38
<b>Fig. IV.9</b>	Contour N <sub>2</sub>	40
<b>Fig.IV.10</b>	Profil de température dans la zone de flamme	40
<b>Fig.IV.11</b>	Profil de gaz de butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> dans la zone de la flamme	41
<b>Fig.IV.12</b>	Profil O <sub>2</sub> dans la zone de flamme	42
<b>Fig.IV.13</b>	Profil CO <sub>2</sub> dans la zone de flamme	42
<b>Fig.IV.14</b>	Profil H <sub>2</sub> O dans la zone de flamme	43
<b>Fig.IV.15</b>	Profil N <sub>2</sub> dans la zone de flamme	43

### **Liste des tableaux**

<b>N° de Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau V.1.</b>	Calcul de vitesse à différents débits	27

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
qm	Le débit massique	Kg/s
M	La masse	Kg
T	Température	K
qv	Débit volumique	m/s
T	Temps	S
S	Surface	m <sup>2</sup>
V	Vitesse	m/s
Re	Nombre de Reynolds	-
P	Pression statique	Pa
$\rho$	Masse volumique	Kg/m <sup>3</sup>
Ri	Taux de production de l'espèce par réaction chimique i	[Kg/m <sup>3</sup> .s]
R	Constante des gaz parfait	[J /mol.K]
Cp	Capacité calorifique à pression constante	[J/Kg K]
Cv	Capacité calorifique à volume constant	[J/Kg K]
Yi	Fraction massique	[-]
Sct	Nombre de Schmidt turbulent	[-]
Sc	Nombre de Schmidt	[-]
W	Masse moléculaire	[mol/Kg]
N	Nombre d'espèce	[-]
Pr	Nombre de Prandtl	[-]
Da	Nombre de Damköhler	[-]
u	La vitesse d'écoulement de mélange	[m/s]
W	La masse molaire du mélange	[kg]
x	Position axiale de la flamme	[mm]
X	Fraction molaire du mélange	[-]
y	Position radiale de la flamme	[mm]
Z	La variable de schewab-Zeldovich	[-]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	[W/ m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\lambda$	La conductivité thermique	[W/ m K]

# **Introduction Générale**

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude théorique et expérimentale de la flamme d'un brûleur à gaz, comme projet de fin d'étude car c'est un sujet d'actualité qui oppose la protection de l'environnement et la limitation de la combustion de produits fossiles par des normes de plus en plus sévères. Ceci nous concerne puisque notre pays est un producteur de ces combustibles.

Parmi les produits fossiles, le GNL représente déjà une excellente alternative pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre et lutter contre le réchauffement climatique. En développant l'usage du GNL, nous contribuons certainement à la protection de l'environnement. Cependant les normes à l'échelle internationale sur les émissions de gaz à effet de serre ne cessent d'être de plus en plus sévères. Est-il donc possible de réduire encore plus les émissions de gaz à effet de serre tout en utilisant le GNL comme combustible ? Toujours dans un contexte de transition énergétique, la recherche d'alternatives aux carburants traditionnels est indispensable, notamment dans le secteur des transports routiers qui émet une importante quantité d'émissions nocives. Le GNL est-il l'avenir des carburants routiers ?

La combustion est un phénomène très répandu dans la nature et qui remonte à des temps particulièrement anciens. C'est en grande partie grâce à ce phénomène que l'activité humaine a pu se développer de manière aussi importante. Elle comprend trois principaux aspects : un aspect chimique mettant en jeu de nombreuses réactions ayant lieu simultanément pendant les processus de combustion, un aspect thermique comprenant les transferts de chaleur (conduction de chaleur, rayonnement, diffusion...) matérialisés par la flamme, et un aspect mécanique comprenant les transferts de masse (mouvements de convection et de diffusion) [1]. La flamme d'une bougie, représente un exemple concret réunissant ces trois aspects [2]. Même si le méthane est le constituant principal du gaz naturel, l'éthane, le propane et les alcanes supérieurs, présents en faible quantité dans le gaz naturel, peuvent jouer un rôle important sur sa combustion [3]. Des auteurs ont établi que la longueur de flamme visible (longueur de combustion) dans le cas d'une flamme-jet non pré mélangée constitue un indicateur important du mélange global carburant/oxydant, puisque la longueur moyenne de la flamme est égale à la distance longitudinal (axe de l'injecteur) nécessaire pour diluer la fraction massique de carburant sur l'axe jusqu'à la stœchiométrie [4 ; 5]. La vitesse de combustion laminaire de prémélange est une grandeur caractéristique intrinsèque d'un mélange combustible et sa connaissance s'avère essentielle pour de nombreuses applications et pour de nombreuses études expérimentales, numériques et théoriques [6 ; 7 ; 8]. En effet, la

vitesse de combustion laminaire joue un rôle primordial dans l'étude de la combustion turbulente car elle contient un grand nombre d'informations fondamentales liées à la réactivité et à la diffusivité du mélange combustible. Du fait des problèmes de pollution atmosphérique rencontrés ces dernières décennies et précédemment évoqués, un intérêt croissant pour les biocarburants (et en particulier pour le bioéthanol dans le cas des essences) s'est développé, au détriment des carburants issus de ressources fossiles [9]. Un biocarburant est un carburant obtenu à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse. Deux filières principales permettent actuellement d'en obtenir : la filière huile et dérivés (comme le biodiesel ou biogazole) et la filière alcool, à partir de sucres, d'amidon, de cellulose ou de lignine hydrolysées [10]. Cette synthèse bibliographique, nous a permis de fixer les idées pour mener à bien notre travail.

L'objectif de notre travail, d'une part, est de développer un modèle mathématique qui nous permettra de faire de la simulation afin de voir l'influence de certains paramètres sur la flamme d'un brûleur à gaz. D'autre part de faire une étude expérimentale sur le brûleur à gaz afin de valider notre modèle mathématique.

Le présent document est subdivisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons une étude bibliographique sur la combustion en général.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du modèle mathématique que nous avons utilisé dans cette étude.

Dans le troisième chapitre nous présentons l'étude expérimentale et la simulation à l'aide du logiciel Fluent.

Dans le quatrième chapitre nous présentons l'essentiel des résultats expérimentaux et numériques.

Enfin, nous terminons la rédaction de ce mémoire de fin d'études par une conclusion générale.

# **Chapitre I :**

## **Etude bibliographique**

## I.1 Introduction

La combustion est, aujourd'hui, un des principaux moyens de conversion de l'énergie. Elle est utilisée dans de nombreux systèmes, aussi bien pour produire de la chaleur (chaudières ou fours domestiques et industriels), de l'électricité (centrales thermiques), que pour le transport (moteurs automobiles et aéronautiques, moteurs fusées . . .) ou encore la destruction de déchets (incinérateurs). La combustion peut être définie comme étant une (ou des) réaction (s) irréversible (s) fortement exothermique (s) entre un combustible et un comburant (ou oxydant), selon le schéma global suivant :



Plus précisément, cette réaction induit un fort dégagement de chaleur dans une zone très mince (les épaisseurs typiques de flamme sont de l'ordre de 0,1 à 1 mm) conduisant à des gradients thermiques très élevés (le rapport des températures entre réactifs et produits de combustion est couramment de 6 à 8) et à de larges variations de la masse volumique. Le taux de réaction est rapide et fortement non linéaire (loi d'Arrhenius). Les combustibles les plus divers (gazeux, liquides ou solides) peuvent être utilisés : bois, charbon, méthane, butane, propane, essence, gasoil, kérosène, fuel, hydrogène, etc., et le comburant est généralement l'oxygène de l'air, plus exceptionnellement de l'oxygène pur (moteurs - fusées, certains fours industriels) qui permet d'atteindre des températures plus élevées et d'éviter le stockage d'azote inerte. Différents mécanismes de couplage interviennent en combustion.

Les transferts de masse (par diffusion moléculaire ou transport convectif des différentes espèces chimiques) sont des éléments importants des processus de combustion. Le dégagement d'énergie dû à la réaction chimique induit des transferts thermiques intenses par conduction, convection ou rayonnement, tant au sein de l'écoulement qu'avec son environnement (parois du brûleur, etc.). Cette énergie thermique est ensuite soit utilisée directement, soit convertie en énergie mécanique dans des turbines à gaz ou des moteurs à piston. Bien évidemment, la combustion requiert la description de l'écoulement (mécanique des fluides). Dans certains systèmes, d'autres aspects sont à considérer. Deux phases (combustibles ou comburants liquides) ou trois phases (Combustibles solides, particules) peuvent interagir. Des phénomènes tels que la formation de sprays, la vaporisation, la combustion de gouttes, etc. doivent alors être pris en compte. La formation de suies génère des particules de carbone qui seront ensuite transportées par l'écoulement.

## I.2 Etat de l'art

Une méthodologie pour déterminer l'émissivité d'un feu dans une cuve d'hydrocarbure dans le régime transitoire et turbulent, en utilisant la thermographie infrarouge, a été proposée par Eulalie Planas [11], L'expérience a été faite pour des diamètres de (0,13 m, 0,18 m, 0,5 m), avec de l'huile de diesel et la gazoline comme combustible. Une corrélation a été développée pour estimer l'émissivité.

Char et Yeh [12], proposent une technique pour mesurer la température de la flamme de propane, au moyen d'une caméra thermique infrarouge qui montre un bon accord avec la température mesurée par thermocouples. En outre, une corrélation empirique pour prédire l'émissivité de la flamme a été obtenue. Riniri et al [13], proposent une méthode de mesure de la température d'une flamme au moyen d'une caméra infrarouge. La méthode utilise la conversion des niveaux numériques, fournis par une caméra infrarouge en température est découlé d'un formalisme issu de la loi de Planck. Ils ont proposé une relation simplifiée reliant ces niveaux numériques aux températures expérimentales, mesurées par thermocouple. Cette dernière prend en compte la distance entre la flamme et la caméra. Le modèle proposé donne des résultats meilleurs que ceux obtenus par la méthode classique. Les principaux de cette approche résident dans le calibrage de la caméra infrarouge.

Ghia [14], a utilisé la technique de la thermographie pour rechercher et tester des gouttelettes d'huile de combustible, dans le but de déterminer la qualité de combustion (formation des polluants CO, NOx...).

Qiaq et al [15], ont travaillé sur la flamme de diffusion des cuves de feu, dans le but de comparer l'accord entre la température mesurée par la caméra infrarouge et les thermocouples. L'étude a été faite pour 5 différents diamètres (5 cm, 10 cm, 30 cm, 60 cm, et 1.2m) en testant 4 différents hydrocarbures (hexane, toluène, l'huile diesel, et l'huile lourde). Le diamètre de 5cm correspond au régime laminaire, le diamètre de 1.2 m au régime turbulent, par contre les diamètres de (10 cm, 30 cm et 60 cm) au régime de transition.

Dupuy et al [16], étudient la transmission et l'émission des flammes de 1m et 2m de longueur dans des cylindres avec de (Pinus pinaster aiguilles) comme combustible, avec des diamètres de (20, 28 et 40 cm).

La mesure de la température au moyen d'un thermocouple peut être faussée car on mesure la température en un point. Manaca et Rovaglio [17], ont fait une étude pour mesurer la température d'une chambre de combustion en utilisant la caméra thermique infrarouge.



Yamaguchi et Tajim [18], ont trouvé que l'émissivité est calculée raisonnablement comme une fonction des trois variables identifiées (la température de piscine, la température du gaz et la fraction molaire d'oxygène dans l'air). Le modèle proposé peut être employé facilement dans l'analyse du feu du sodium pour l'évaluation de la sécurité.

Chun et al [19], ont utilisé une caméra thermique pour tracer le profil de la température d'une flamme de diffusion turbulente, puis ont comparé ces résultats avec la simulation numérique pour des diamètres de 1,2m et 3m, 4m en utilisant le di-tert-butyl peroxide, le kérosène, et d'autres carburants.

Novozhilov et Koseki [20], ont fait de la simulation numérique pour déterminer la température de feu des hydrocarbures en phases (gaz-liquide), La combustion a été modélisée en utilisant Eddy break-up, avec un régime instationnaire. Les équations de Navier-Stokes sont modélisées en utilisant la moyenne de Favre.

Philippe Vachet [21], traite les caractéristiques en émission et transmission d'une flamme axi-symétrique. Il montre les différentes procédures informatiques de mise en forme et d'analyse des données venant de la caméra infrarouge.

Dans le cadre de la mise en œuvre d'actions locales significatives dans la maîtrise de l'énergie et la réduction des gaz à effet de serre, la communauté urbaine de Dunkerque [22], a engagé une grande opération de sensibilisation du public et des professionnels à la gestion de l'énergie en réalisant une opération de thermographie aérienne infrarouge des principales aires urbaines de son territoire. Considérant que près de 30% des déperditions thermiques d'un bâtiment s'effectuent par la toiture, la thermographie aérienne infrarouge permet d'afficher le niveau de déperditions de chaque bâtiment suivant une échelle de couleurs et de restituer l'analyse sous forme de cartes [23].

### **I.3. Notions de combustion**

La combustion est une réaction chimique, globalement exothermique, au début lente mais pouvant devenir ensuite rapide et même violente, avec émission de rayonnement et élévation de température qui peut être traduite par un dégagement de chaleur. Elle se produit dans un système « ouvert » ou dans un système « fermé », autrement dit avec ou sans échange de matière et d'énergie entre le système et le milieu extérieur. Les réactions chimiques ne peuvent se produire que si des espèces chimiques, atomes, ions, radicaux, molécules, commencent par s'interagir ou du moins se trouver assez près pour se modifier mutuellement.

La réaction de combustion est globalement une réaction d'oxydoréduction où l'oxydant est appelé comburant (oxygène pur ou dilué ozone, chlore, nitrates, etc.) et le réducteur est appelé combustible ( $H_2$ , CO, hydrocarbure, etc.) se déroulant suivant un mécanisme complexe, comprenant un grand nombre de réaction dites « élémentaires », les unes contre les autres libérant de la chaleur, le dégagement de chaleur prenant le pas sur la consommation. Si cette réaction oxydait de façon maximale le combustible, on pourrait écrire, globalement.



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

La thermodynamique raisonne essentiellement sur des grandeurs comme la température ou les concentrations qui n'ont de sens que pour les systèmes contenant des individus en nombre assez grand pour se prêter aux considérations statistiques. Les symboles chimiques, H,  $H_2O$ ,  $CH_4$ , ... etc. y désignent donc sans la moindre ambiguïté des moles et non des atomes ou des molécules.

Comme c'est déjà dit que la flamme ne met pas en œuvre seulement des phénomènes chimiques, mais aussi des phénomènes physiques et mécaniques de transport de gaz par diffusion et par convection. La combustion est une réaction chimique d'oxydation d'un combustible par un comburant,

Les produits de combustion s'appellent aussi gaz brûlés ou fumées. La combustion fournit de l'énergie calorifique et émet généralement de la lumière. Le développement de la société industrielle moderne et la sauvegarde de l'environnement se fondent sur la maîtrise de cette réaction de combustion. Dans un phénomène de combustion, les corps en présence sont les suivants :

- Le combustible
- Le comburant
- Les produits de combustion

Les combustibles sont des corps susceptibles de se combiner à l'oxygène par une réaction d'oxydation exothermique.

L'oxydation doit être assez vive pour se poursuivre normalement après amorçage.

#### I.4. Catégories de combustibles

- combustibles solides
- combustibles liquides
- combustibles gazeux

Cependant, quelle que soit la nature du combustible, la réaction de combustion proprement dite ne peut avoir lieu que lorsque les réactifs sont sous forme gazeuse, Si le combustible n'est pas à l'Etat gazeux, il se vaporise ou se sublime préalablement (éventuellement après décomposition chimique).

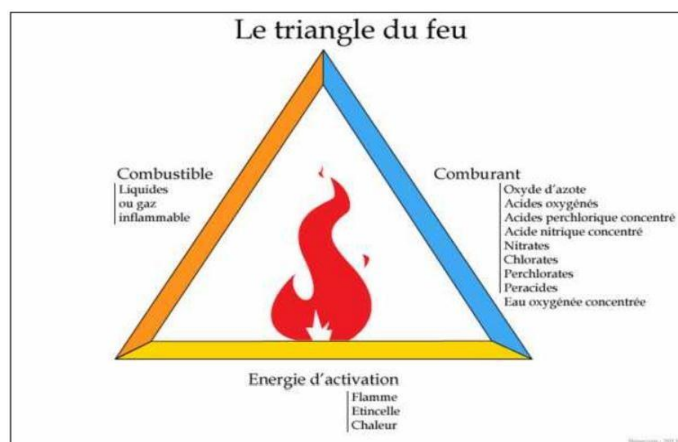
#### I.5. Les comburants

Les plus fréquemment utilisés sont :

- L'air qui comprend principalement de l'oxygène, de l'azote, de la vapeur d'eau et du  $\text{CO}_2$ .
- L'oxygène pur ; Ils peuvent être incorporés préalablement au combustible soit :  
Sous forme d'alliage chimique, Sous forme d'air ou d'oxygène liquide, comme par exemple dans les explosifs et dans les carburants pour fusées [24].

#### I.6. Triangle du feu

Une combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments que l'on nomme de façon symbolique le triangle du feu :



**Fig. I.1. : Le triangle du feu montrant l'association des trois éléments indispensables pour une combustion chimique. [24]**

### **I.6.a. Un combustible (réducteur)**

C'est une substance qui peut brûler en présence d'un comburant, est souvent un produit organique, c'est-à-dire composé principalement de carbone et d'hydrogène (ex : méthane, essence, alcool...), Dans notre étude nous utiliserons comme combustible le butane.

### **I.6.b. Un comburant (oxydant)**

Généralement l'air environnant et particulièrement le dioxygène, c'est un bon comburant.

### **I.6.c. Une énergie d'activation**

Généralement la chaleur ou une flamme, par exemple celle produite par une étincelle.

## **I.7 Les Différents types de combustion**

### **I.7.1 Combustion rapide**

La combustion rapide est une forme de combustion au cours de laquelle de grandes quantités de chaleur et d'énergie sous forme de lumière sont relâchées, donnant naissance au feu. Elle est utilisée dans certaines machines telles que les moteurs à combustion interne ou les armes thermobariques.

### **I.7.2 Combustion lente**

La combustion lente est une réaction qui entraîne un faible dégagement de calories avec peu d'élévation de température et une absence de flammes.

### **I.7.3 Combustion complète**

Lors d'une combustion complète, le réactif réagira avec le comburant jusqu'à former des Produits qui ne pourront plus être oxydés avec le comburant : les produits ont atteint un degré de stabilité qu'une réaction de combustion ne peut modifier.

Dans le cas d'un hydrocarbure réagissant avec le dioxygène, les produits de combustion sont le dioxyde de carbone un produit de combustion stable, ainsi une combustion complète fournit les mêmes produits de réactions quels que soient les réactifs. Une

combustion complète permet d'obtenir la quantité maximale d'énergie disponible étant le pouvoir calorifique.

#### **I.7.4 Combustion incomplète (en défaut d'air)**

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

#### **I.7.5. Combustion stœchiométrique**

La combustion stœchiométrique aura lieu lorsque la quantité d'oxygène introduite dans le réacteur est exactement égale à la quantité nécessaire à une combustion totale du butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) dans ces conditions, les produits de la combustion complète sont essentiellement le dioxyde de carbone, l'azote et la vapeur d'eau.



### **I.8 Différence entre la combustion prémélangée et non prémélangée**

#### **I.8.1 La combustion prémélangée**

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

#### **I.8.2 La combustion non-prémélangée**

La combustion turbulente non-prémélangée se rencontre dans l'industrie le plus souvent dans les brûleurs à gaz. La turbulence joue un rôle indispensable pour mélanger le plus rapidement possible les gaz en présence. Elle est due essentiellement aux forts gradients de vitesse qui existe entre l'air et le gaz. Pour la combustion non-pré mélangée, la fraction de mélange basée sur des modèles semblent offrir la description la plus efficace de la chimie.

## **I.9 Les instabilités de combustion**

Les instabilités de combustion sont des problèmes important rencontrés lors de la conception des chambres de combustion et des systèmes propulsifs en général. Elles se caractérisent par de grandes oscillations des paramètres de l'écoulement (débit, pression, etc.) et de la combustion (dégagement de chaleur). Pour beaucoup d'installations il s'agit d'un phénomène indésirable dont les effets sont gênants:

- Oscillations mécaniques de la structure du système.
- Augmentation du transfert de chaleur aux parois (pouvant conduire à la dégradation de celles-ci).
- Déstabilisation de la flamme.

Les instabilités de combustion proviennent de l'interaction de deux ou plusieurs phénomènes physiques. Un processus initial génère une perturbation de l'écoulement qui va interagir avec la flamme. Un processus de retour couple, la variation de taux de réaction au processus initial. En général le processus retour relie l'écoulement aval à l'amont où les perturbations sont initiées. Ce couplage est réalisé par les ondes acoustiques remontant l'écoulement (Ce couplage peut être aussi réalisé par les vibrations de la structure.). En pratique on distingue trois types d'instabilités de combustion.

- 1-Les instabilités des systèmes
- 2- Les instabilités propres au foyer
- 3- Les instabilités intrinsèques

## **I. 10. Généralités sur la flamme**

### **I.10.1. La flamme**

La caractéristique principale des flammes est l'émission de lumière ; c'est la partie visible des réactions d'oxydation vive en phase gazeuse. C'est cette propriété qui est principalement utilisée dans l'étude des flammes. Suivant la nature des gaz de combustion, la lumière diffère en quantité et en qualité. Certaines flammes, telles celles émises par la combustion de l'hydrogène dans de l'air pur peuvent n'être pratiquement pas lumineuses.

Une autre caractéristique essentielle des flammes est l'élévation rapide de température qu'elles génèrent : souvent au-delà de 1 000 °C, elles atteignent 2 500 °C pour un mélange hydrogène-oxygène. Là encore, la température diffère suivant la nature des gaz inflammables. Certains hydrocarbures donnent, dans certaines conditions de température et de pression, des « flammes froides ». Pour des mélanges proches de la limite inférieure d'inflammabilité, la température la plus élevée se situe vers le bas et dans l'axe de la flamme ; pour des mélanges proches de la limite supérieure, les températures les plus élevées sont atteintes au pourtour de la flamme, là où le mélange se combine avec l'air.

### **I.10.2. La propagation de la flamme**

Le mécanisme de la propagation de la flamme résulte à la fois de l'échange thermique entre la zone de réaction et les gaz frais et de la diffusion d'une partie des radicaux libres présents dans le front de flamme vers le mélange de gaz frais. La propagation de la flamme constitue, à la manière d'une onde, l'entrée en réaction chimique successive des couches de gaz frais.

Pour que la flamme puisse se propager de façon autonome, il faut que la vitesse d'accroissement de volume du front de flamme reste inférieure à celle de l'accroissement de volume des produits de combustion.

La vitesse d'une flamme dépend notamment de la richesse du mélange, du degré de dilution, de la pression et de la température initiale des gaz frais. La vitesse « fondamentale » d'une flamme est maximale aux environs de la stœchiométrie ; elle décroît vers les compositions riches et pauvres du mélange. La température initiale du mélange a une influence considérable sur la vitesse normale de propagation de la flamme. Dans le cas, par exemple, d'un mélange air-méthane, elle passe de 30 cm par seconde à température ambiante à environ 340 cm/s si le mélange est chauffé à 1 000 °C. La présence de gaz inertes en dilution dans le mélange diminue la vitesse de la flamme.

Les vitesses normales de déflagration sont de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de centimètres par seconde. Si la flamme est fixe, il est possible de mesurer sa surface et le débit du mélange gazeux. La vitesse est donnée par l'équation : vitesse = débit / surface.

Dans le cas d'un front de flamme parfaitement perpendiculaire au sens de la propagation, la vitesse de propagation de la flamme sera égale à la vitesse « fondamentale » (ou « normale ») de la flamme.

Dans le cas de turbulences existant au sein du mélange, la vitesse de propagation de la flamme sera généralement augmentée. C'est le phénomène rencontré au cours des incendies. Si l'on considère les cas extrêmes, un accroissement important du débit du mélange peut conduire à l'extinction (soufflage de la flamme). Une réduction de la vitesse d'écoulement ramène la flamme au point d'entrée de l'air et provoque un retour de flamme.

### **I.10.3. Les différents types de flammes**

On distingue deux sortes de flammes : la flamme de pré-mélange et la flamme de diffusion.

#### **I.10.3.1. Flamme de prémélange**

Le gaz arrive, mélangé de comburant dans des proportions plus ou moins voisines de la concentration stœchiométrique. La flamme obtenue est sensiblement neutre. Sa dimension se stabilise de telle sorte que la vitesse d'écoulement du gaz est égale à la propagation du front de flamme. La flamme semble quasiment immobile. C'est la flamme du bec Bunsen ou des appareils de cuisson à gaz. La flamme obtenue a une forme conique et donne une lumière bleutée.

#### **I.10.3.2. Flamme prémélangée et flamme de diffusion**

Le combustible et le comburant n'étant pas mélangés au préalable, la propagation des flammes est gouvernée essentiellement par des phénomènes d'inter-diffusion de chaleur et de radicaux libres. La combustion se poursuit au fur et à mesure du mélange du gaz combustible avec l'air dont la richesse passe d'une valeur très élevée au niveau du front de flamme à une valeur très faible. Le combustible est souvent décomposé par la chaleur avant de se mélanger à l'oxygène et ils se trouvent séparés par des produits de combustion intermédiaires au sommet de la flamme. L'oxygène et le gaz auront tendance à augmenter leurs concentrations au-delà de la valeur stœchiométrique, puis, instantanément à les ramener à l'équilibre. La

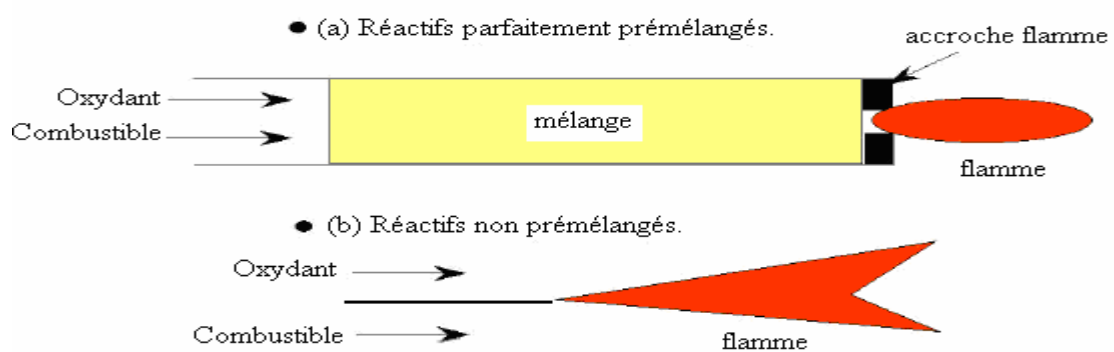


vitesse de la réaction étant nettement supérieure à celle du phénomène de diffusion, l'équilibre sera maintenue sur le front de flamme.

La zone de réaction d'une flamme de diffusion est plus épaisse que celle d'une flamme de prémélange et sa température est rapidement très proche du maximum. La flamme de diffusion a une forme moins bien définie que la flamme produite au moyen d'un combustible et d'un comburant mélangés préalablement. L'exemple le plus courant d'une flamme de diffusion est celle produite par une bougie.

En pratique, dans les incendies, les flammes sont essentiellement des flammes de diffusion, mais on distingue souvent, à la base, des flammes bleutées de prémélange. Ceci est d'autant plus vrai que la flamme est en régime turbulent.

Suivant la taille des particules, la combustion d'aérosols peut donner des flammes de prémélange ou de diffusion.



**Fig. I.2 : a) Flamme prémélangée, b) Flamme de diffusion [24]**

#### **I.10.4. Les suies**

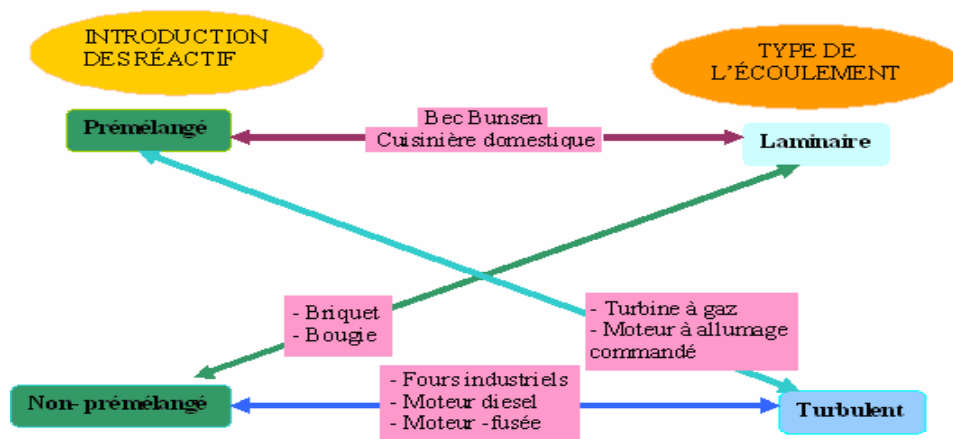
L'émission lumineuse de flammes jaunes est due à un spectre continu provenant de fines particules de suie contenues dans les gaz brûlés. Les premières particules de suie émises sont à l'état radicalaire, puis elles se regroupent pour former, par polymérisation ou condensation, des particules de carbone-suie dont le poids moléculaire varie en fonction du temps. Quelle que soit la nature du combustible, la suie est essentiellement composée de carbone (elle contient aussi de, un à quelques pour cent d'hydrogène en poids - ce qui est loin d'être négligeable - et une infime quantité d'autres éléments tels que soufre, azote...). La quantité de suie produite est d'autant plus importante que le mélange est riche en combustible, et que ce dernier est riche en carbone.

Pour des petites flammes, la zone bleue est à l'extérieur de la zone carbonée et atteint le sommet de la flamme. Pour des flammes plus grandes, cette zone bleue n'apparaît que dans la moitié inférieure, laissant la zone carbonée exposée à l'air. Pour des très grandes flammes, le centre de la flamme peut refroidir jusqu'à une température à laquelle l'oxydation des particules de carbone diminue, ces particules formant la fumée.

D'autres phénomènes engendrés par les flammes tels la chimionisation (réaction chimique donnant naissance à des espèces électriquement chargées) ou l'émission de sons ne sont pas actuellement utilisés pour la détection d'incendies, mais existent dans certaines conditions.

Nous pouvons également classer les flammes en fonction de la nature de l'écoulement :

- **Flammes laminaires** : l'étude de ces flammes permet de comprendre la structure fine de flamme et l'influence relative des différents phénomènes intervenant dans les écoulements réactifs. En particulier, l'impact des mécanismes cinétiques et des modèles de diffusion sont usuellement évalués sur ce type de flamme, qui sont facilement analysables expérimentalement.
- **Flammes turbulentes** : dans les configurations réelles, la turbulence modifie de manière importante le mélange et les caractéristiques locales de la flamme (courbure, étirement...).



**Fig. I.3.** : Différents systèmes pratiques de combustions classés selon le type d'introduction des réactifs (prémélangées ou non) et la nature laminaire ou turbulente de l'écoulement. [24]

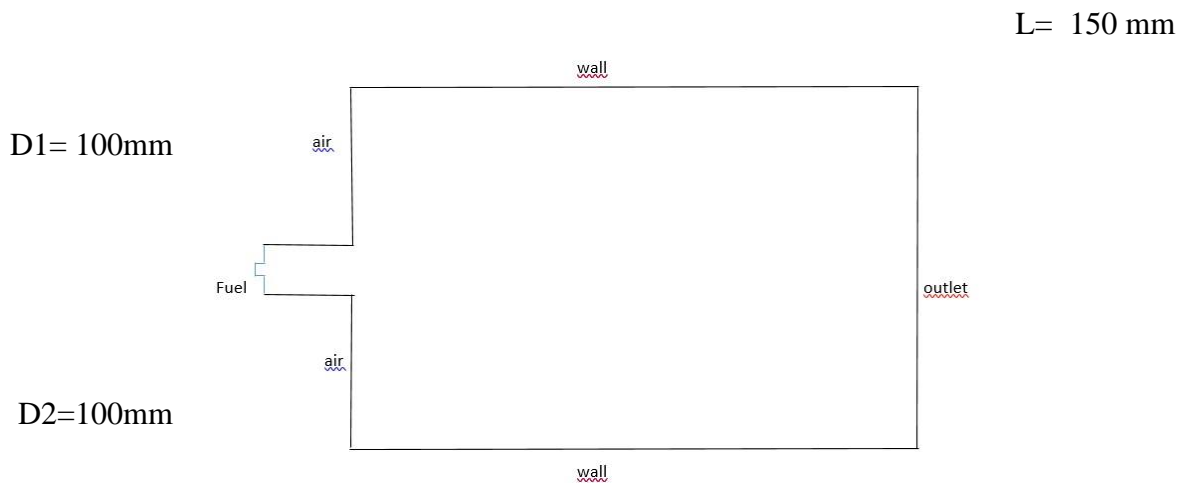
**Chapitre II :**  
**Modélisation**

Dans ce chapitre, nous rappelons les équations modélisant le problème traité dans ce mémoire. Ces équations mettant en évidence le comportement des fluides en combustion (turbulente). Elles sont fondées selon les lois physiques. La modélisation mathématique générale des écoulements des fluides avec transport d'une concentration d'une espace et avec transfert thermique est faite par les équations tels que les équations de conservations (la masse, la quantité de mouvement, les espaces chimiques).

## II. 1. Géométrie du problème

La géométrie de configuration considérée (figure III.1) est une chambre de combustion de diamètre extérieur égale à 200 mm et de longueur  $L=150$  mm. Le tube centrale apporte le combustible qui pour raison de simplification est supposé unique (gaz butane  $C_4H_{10}$ ) avec une vitesse de 0.55 ,1.88 et 3.45 m/s (trois cas différents).

L'écoulement périphérique est un écoulement d'air en amont avec une pression atmosphérique (le diamètre entrée de l'air). Cet écoulement est pleinement turbulent, et son intensité initiale est égale a 10 %. Le domaine d'étude est basé dans sa globalité sur la zone de développement du jet (zone de flamme). Dans ce travail, la supposition d'une réaction globale a une seule étape a été adoptée.



**Fig. II.1 Géométrie de la chambre de combustion**

## II. 2. Equations de l'aérothermochimie

Les éléments de la thermodynamique et la cinétique chimique, nous permettant de modéliser l'aspect énergétique (énergie d'origine chimique) d'un milieu réactif en posant l'équation de conservation des espaces et l'équation de conservation d'énergie. Ils interviennent aussi les équations permettant de résoudre l'aspect dynamique de l'écoulement via la masse volumique du mélange et l'influence des forces extérieures qui varient en fonction des espèces chimiques composant le mélange. Tout problème de modélisation en combustion de base sur les équations, de l'aérothermochimie présentées ci-dessous sous leur forme générale.

L'écoulement est considéré comme permanent dans notre étude.

$\frac{\partial}{\partial t} = 0$	(II.0)
-----------------------------------	--------

### II.2.1 Equation de continuité

En tenant compte du fait que la masse est conservée au cours de réaction chimique, donc l'équation qui exprime la conservation de masse est donnée comme suit :

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$	(II.1)
-----------------------------------------------------------------------------------	--------

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

L'équation de conservation de masse pour l'espace  $k$  écrit :

$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho (u_i + V_{k,i}) Y_k) = \dot{\omega}_k$	(II.2)
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------

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

### II.2.2. Equation de conservation de quantité de mouvement

L'équation de quantité de mouvement moyennées de Navier Stokes, sont pour un fluide incompressible et newtonien données par :

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j)}_{\text{transport convectif}} = \underbrace{-\frac{\partial p}{\partial x_i}}_{\text{force dues au pression}} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho F_i$	II.3
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

Avec :

$\tau_{ij} = \underbrace{\left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right]}_{\text{force de viscosité}}$	II.4
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

Si l'écoulement est turbulent :

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j)}_{\text{transport convectif}} - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}}_{\text{force dues au pression}} + \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}}_{\text{force de viscosité}} + \rho F_i + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j})}_{\text{force générés par la turbulence}}$	II.5
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

On constate

$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}$	II.6
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

### II. 2.3 Equations de conservation de l'énergie

L'équation de conservation d'énergie pour un écoulement réactif peut s'écrire avec la formulation de l'enthalpie comme suit :

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_t) + \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho h_t u_j) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial J_j^h}{\partial X_j} + \frac{\partial (u_i \tau_{ij})}{\partial X_j}$	II.7
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

Avec :

$J_j^h = -\frac{\mu_l}{P_r} \left[ \frac{\partial h}{\partial X_j} + \sum_{k=1}^N \left( \frac{P_r}{S_{ck}} - 1 \right) h_k \frac{\partial Y_k}{\partial X_j} \right]$	II.8
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

La combustion fait apparaître et disparaître des espèces chimiques. Dans notre étude c'est la combustion de butane – air qui fait diminuer la fraction massique  $C_4H_{10}$ ,  $O_2$  et fait apparaître les produits de combustion ( $CO_2$ ,  $2H_2O$ ).

La combustion fait aussi intervenir plusieurs espèces qui réagissent à travers plusieurs réactions élémentaires (mécanismes réactionnel). Ces espèces sont caractérisées par leurs fractions massiques.

#### II.2.4. Equations de conservation des espaces chimiques

La détermination de la fraction massique pour chaque espèce ;  $Y_i$ , se fait par la solution de l'équation de transport d'espèce, qui a la forme suivante :

$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho v Y_i) = - \frac{\partial^2}{\partial X_i^2} \left[ \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) Y_i \right] + R_i$	II.9
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

### II.3. Modélisation de la turbulence

Les équations précédentes appliquées aux phénomènes turbulents ne peuvent pas être résolues directement. Cela nous a poussés à utiliser la modélisation numérique. Le développement des moyens de calcul numérique permettant d'étudier la plupart des phénomènes physiques en particulier les cas turbulents est basé sur la modélisation.

Il y a plusieurs modèles de turbulence dans le code de fluide ; pour notre simulation en régime turbulent, on a utilisé le modèle k-epsilon standard qui est le plus largement utilisé et qui donne, en général, de bons résultats dans la configuration simple.

#### II.3.1. Le modèle k-epsilon standard

Pour le traitement de la turbulence, on a utilisé le modèle k-epsilon standard inclus dans le package de fluide version 6.3. Ce modèle est composé de deux équations et il permet de déterminer à la fois, la longueur de turbulence et l'échelle de temps en faisant la résolution de deux équations de transport distinctes. Il a été proposé par Launder B.E and Spalding, sa robustesse et son économie en moyens de calcul le rendant largement répandu dans les applications industrielles qui traitent les écoulements complexes sa précision raisonnable lui permet le traitement d'une large gamme d'écoulements turbulents il s'agit d'un modèle semi-empirique ; et la variation des équations du modèle repose sur des considérations phénoménologiques et empiriques [23].

L'énergie cinétique de turbulence  $K$  et son taux de dissipation  $\epsilon$  sont obtenus à partir des équations de transport suivantes :

- Equation de transport de l'énergie cinétique est donnée comme suit :

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_K + G_b - \rho \epsilon$	II.10
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

- Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente :

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \underbrace{C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_K + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}}_{\text{terme source}}$	II.11
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

## II.4. Modélisation de la combustion

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

### II.4.1. Le modèle EDM (Eddy dissipation model)

Ce travail traite sur la problématique des flammes turbulentes non pré mélangées (Diffusion). Ce modèle a donc été utilisé pour la modélisation des taux de réaction. Il suppose que les réactions chimiques sont très rapides. Il permet ainsi d'éviter le calcul des taux cinétiques très onéreux en termes de temps de calcul. Toutefois son domaine de validité se restreint à la combustion turbulente. Ce modèle a été développé par Spalding [23].

Le taux de réaction est supposé être déterminé par le taux de mélange réactif-combustible à une échelle moléculaire, c'est-à-dire par le taux de dissipation des tourbillons. Le taux de dissipation des structures tourbillonnaires est pris comme étant proportionnel au rapport entre la dissipation de l'énergie cinétique de turbulence et l'énergie cinétique de turbulence k-epsilon. Le taux de réaction s'exprime donc par :

$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right)$	II.12
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \left( \frac{\sum_P Y_P}{\sum_J^N v'_{j,r} M_{w,j}} \right)$	II.13
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

Où



$v'_{i,r}$  : Coefficient stœchiométrique du réactif i dans la réaction r.

$v''_{j,r}$  : Coefficient stœchiométrique du produit j dans la réaction r.

A et B sont des constantes empiriques qui ont respectivement 4 et 0.5 pour valeur.

## **Chapitre III :**

### **Simulation et expérimentation**

## III.1. Simulation

### III.1.1. Introduction

La simulation numérique tend à prendre de plus en plus d'importance dans le développement des projets scientifiques actuels étant moins onéreuse et plus flexible. Cette étude comporte les caractéristiques d'une chambre de combustion ; l'application du logiciel GAMBIT pour tracer et mailler la chambre de combustion. Le but de cette simulation est d'analyser et de comparer les résultats (les champs de températures, vitesses et la fraction massique des espèces chimiques).

### III.1.2. Conception de la géométrie et génération de maillage

Le premier travail à accomplir dans une simulation numérique est la conception de la géométrie et le choix du maillage adopté à la nature de l'écoulement en particulier. Le maillage doit être fin dans zones où l'on atteint des gradients très importants des grandeurs physiques.

Une connaissance à priori de ces grandeurs tirées des expériences sur les écoulements similaires est donc utile pour l'établissement du maillage.

La construction de la géométrie a été faite suivant les étapes suivantes :

#### III.1.2.1. Conception de la géométrie

- Génération des points
- Génération des lignes
- Génération des surfaces

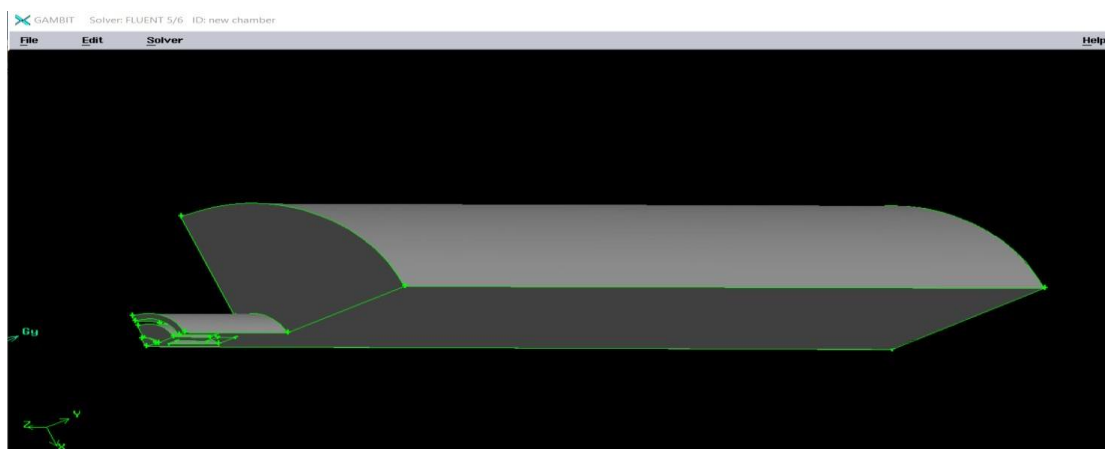


Fig. III.1.1. : Géométrie du domaine de combustion

### III.1.2.2. Génération des maillages

Le maillage quadratique a été utilisé dans ce travail.

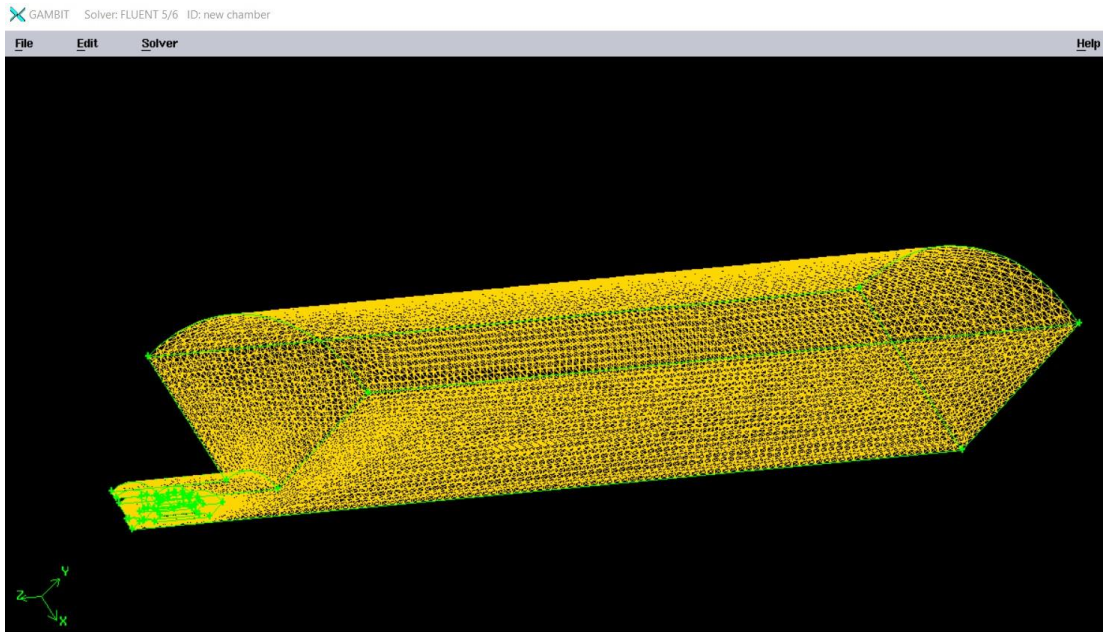


Fig. III.1.2 : Maillage de la géométrie

### III.1.3. Conditions aux limites

La résolution numérique de l'équation de transport nécessite la définition des conditions initiales et aux limites. On définit les conditions aux limites suivant :

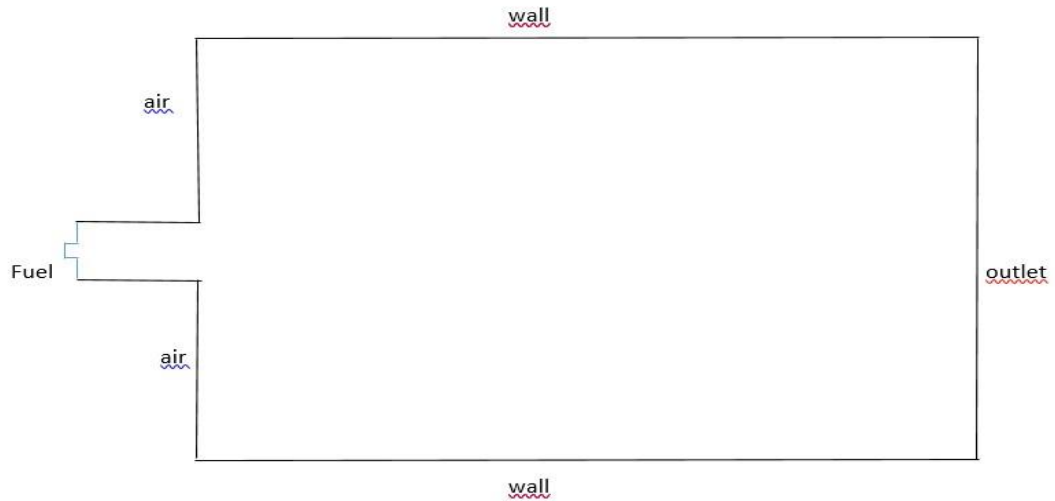
- l'entrée du combustible (butane) :
  - L'entrée du combustible est liée au débit ou à la vitesse du gaz. Les valeurs utilisées sont : (0.55 et 1.88 et 3.45) m/s. Nous avons donc imposé la condition « velocity inlet », et une température d'écoulement entrant de **300 K**.
- Sortie combustible (butane).

Par contre à la sortie la flamme est à l'air libre ; la condition « Pressure outlet » « a été choisie ».
- Entrée de l'oxydant (air)

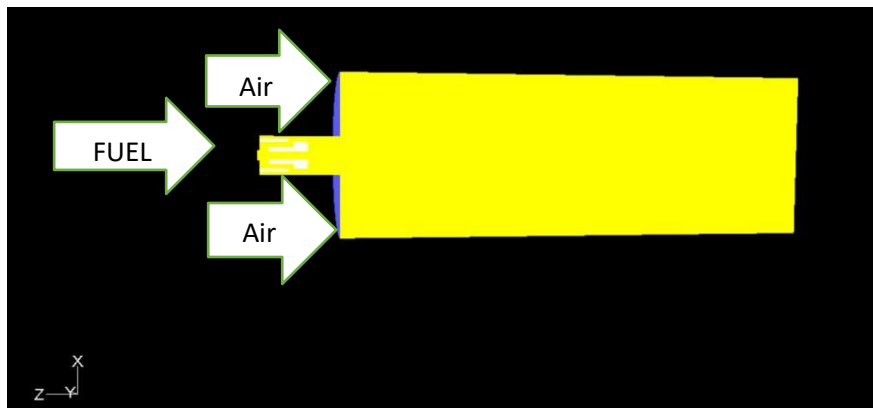
l'air est ouvert à l'atmosphère  $P_a = 1$  bar, par conséquent la condition « pressure inlet » a été imposée et la température de l'écoulement de l'air entrant a été fixée à **300 K**
- Sortie de l'oxydant (air)

La sortie est ouverte à l'atmosphère, la condition « pressure outlet » a été imposée.

- Nous avons initialisé les paramètres de calcul par rapport aux limites choisies.



**Fig. III.1.3.a : Conditions aux limites imposées (sur un schéma)**



**Fig. III.1.3.b : Conditions aux limites imposées (sur une coupe)**

#### III.1.4. Choix des paramètres sous Fluent

Dans le présent travail, on utilise un modèle géométrique en 3D et des équations régissant l'écoulement en régime turbulent ; l'algorithme SIPMLE est adoptée pour le couplage « vitesse –pression »

Modèle	Options
Géométrie	3D
Discretisation temporelle	Stationnaire
Modèle de turbulence	Turbulent
Couplage vitesse pression	Simple

**Fig. III.1.4 : Parameters sous Fluent**

## III.2. Expérimentation

### III.2.1. Introduction

L'élément central de notre dispositif expérimental, utilisé dans cette étude, est présenté sur la figure (III.2.1). Il s'agit d'un brûleur à gaz manuel de cuisine avec un cadran de débit de gaz qui peut facilement ajuster la flamme et avec un verrou de sécurité qui évite l'allumage accidentel.



**Fig. III.2.1 : Brûleur à gaz manuel de cuisine avec flamme réglable**

### III.2.2. Méthode expérimentale

Dans cette partie nous allons mesurer la vitesse pour trois positions de vanne régulatrice du débit du brûleur (max ;  $\frac{1}{2}$  ; min), puis nous allons mesurer la température à ces positions et les comparer avec celles de la simulation.

### III.2.3. Matériel

#### a. La balance

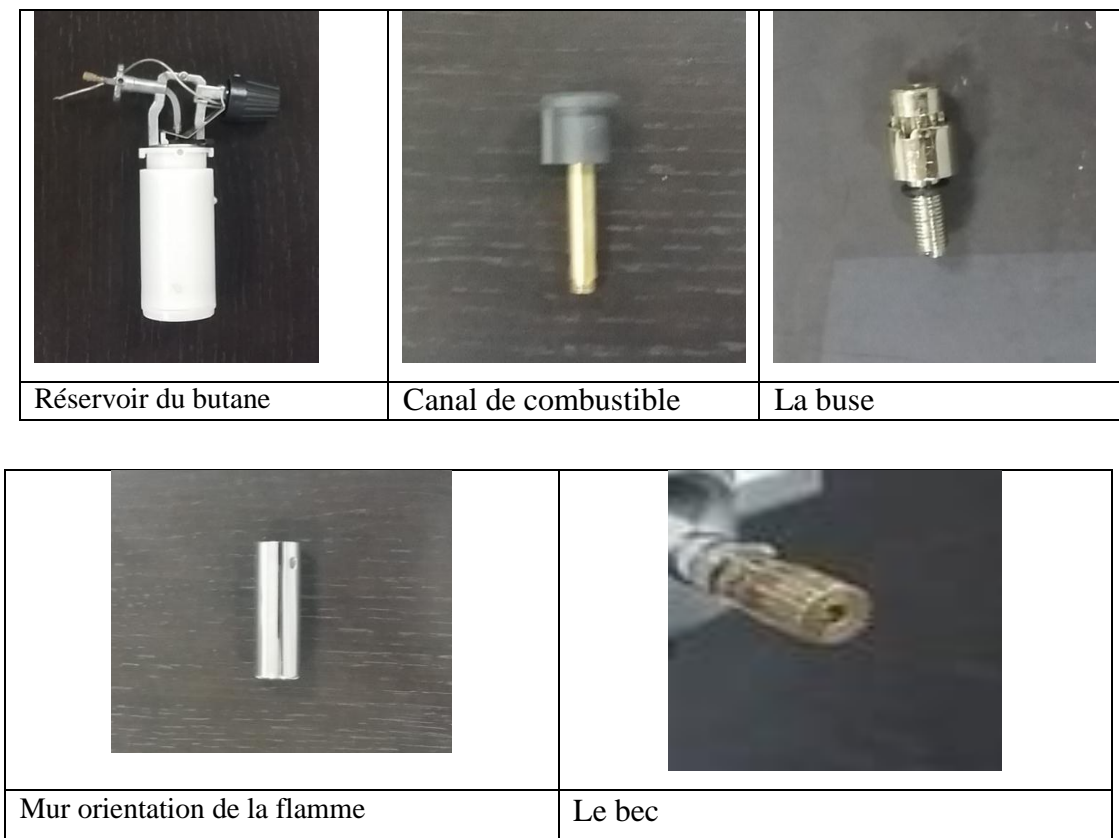
Nous avons utilisé une balance de précision comme le montre la figure (III.2.2.) et un chronomètre pour mesurer le débit massique de gaz à la sortie du brûleur.



**Fig. III.2.2 : Balance digitale KERN**

**b. Composants du brûleur : TORCH-400**

La figure (III.2.3) montre les différents composants du brûleur que nous avons utilisé dans notre étude.



**Fig.III.2.3 : Composants du brûleur torch-400**

### c. L'outil de mesure de températures

Pour les mesures de températures, nous avons utilisé appareil de mesure de température Fluke comme le montrent les figures (III.2.4) et (III.2.5) et qui fonctionne soit par laser soit par thermocouple.



**Fig.III.2.4 : Outil de mesure de température Fluke**



**Fig.III.2.5. Thermocouple type -k**

### III.2 .4 . Calcul de la vitesse à différents débits de gaz

Pour déterminer la vitesse à différents débits de gaz, nous avons fixé la vanne de réglage du débit de gaz à trois positions différentes (min(-), 1/2, max(+)) comme le montre la figure (III.2.6).



**Fig. III.2.6 : La vanne réglage de débit du brûleur**



Nous commençons par remplir le réservoir avec du gaz butane  $C_4H_{10}$  tout en mesurant son poids (1), puis nous fixons le régulateur à un débit (min ;  $\frac{1}{2}$  ; max) et nous allumons le brûleur à un temps de mesure ; enfin nous prenons le poids (2) du brûleur.



**Fig. III.2.7 : Mesure du poids de brûleur**

A partir des relations suivantes :

$$q_m \text{ (kg/s)} = m \text{ (kg)} / T \text{ (s)}$$

$$q_m = q_v \text{ (m}^3\text{/s)} \times (\text{kg/m}^3)$$

$$q_v = V \text{ (m/s)} \times S \text{ (m}^2)$$

Avec :

$q_m$  : débit massique

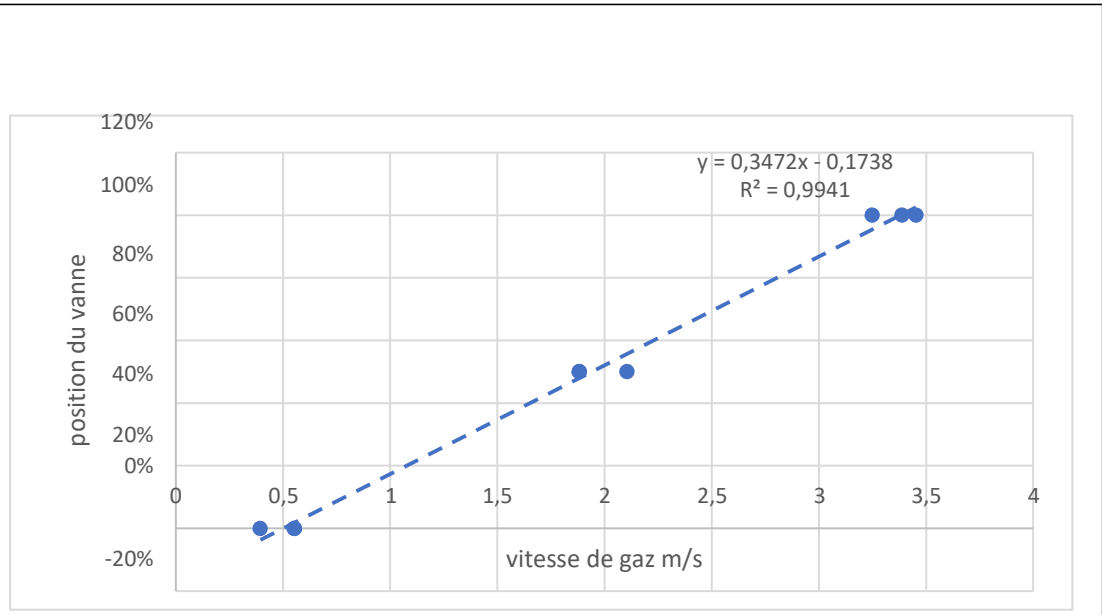
$q_v$  : débit volumique

$\rho$  : la masse volumique du butane liquide =  $573 \text{ kg/m}^3$

Et le diamètre du bec (sortie du gaz) qui vaut 0.13 mm, nous calculons les vitesses du gaz pour différents débits.

Vitesse (m/s)	$q_m$ (Kg/s)	Temps (s)	La masse	Poids 2	Poids1	Position de la vanne
0,393900745	2,96296E-06	540	0,001	185,2	183,6	min
0,553922923	4,16667E-06	120	0,000	185,1	184,6	min
0,553922923	4,16667E-06	120	0,000	185,1	184,6	min
1,883337939	1,41667E-05	120	0,001	185	183,3	50%
2,104907108	1,58333E-05	120	0,001	185	183,1	50%
1,883337939	1,41667E-05	120	0,001	184,8	183,1	50%
3,249681149	2,44444E-05	90	0,002	184,8	182,6	max
3,388704942	2,54902E-05	102	0,002	185,1	182,5	max
3,453026014	2,5974E-05	77	0,00	184,7	182,7	max

**Tableau III.2 : Vitesses du gaz pour différents débits**



**Fig. III.2.8 : Courbe d'étalonnage de la vitesse du gaz vs position de la vanne**

## **Chapitre IV :**

### **Résultats et discussion**

## IV.1. Introduction

Les résultats des mesures expérimentales et numériques réalisées sur notre brûleur à gaz sont présentés et discutés dans cette partie. Ces résultats concernent particulièrement la flamme à différents débits ainsi et le profil de températures et les différentes fractions massiques dans le domaine.

## IV.2. Résultats expérimentaux

Dans ce qui suit nous avons observé la flamme pour trois positions d'ouverture de la vanne se gaz de notre brûleur.



**Fig. IV.1 : Flamme pour une ouverture de la vanne au minimum**

- Sur la figure IV.1, la flamme est bleu ce qui signifie que la combustion est complète.



**Fig. IV.2 : Flamme pour une ouverture de la vanne à moitié**



**Fig. IV.3 : Flamme pour une ouverture de la vanne au maximum**

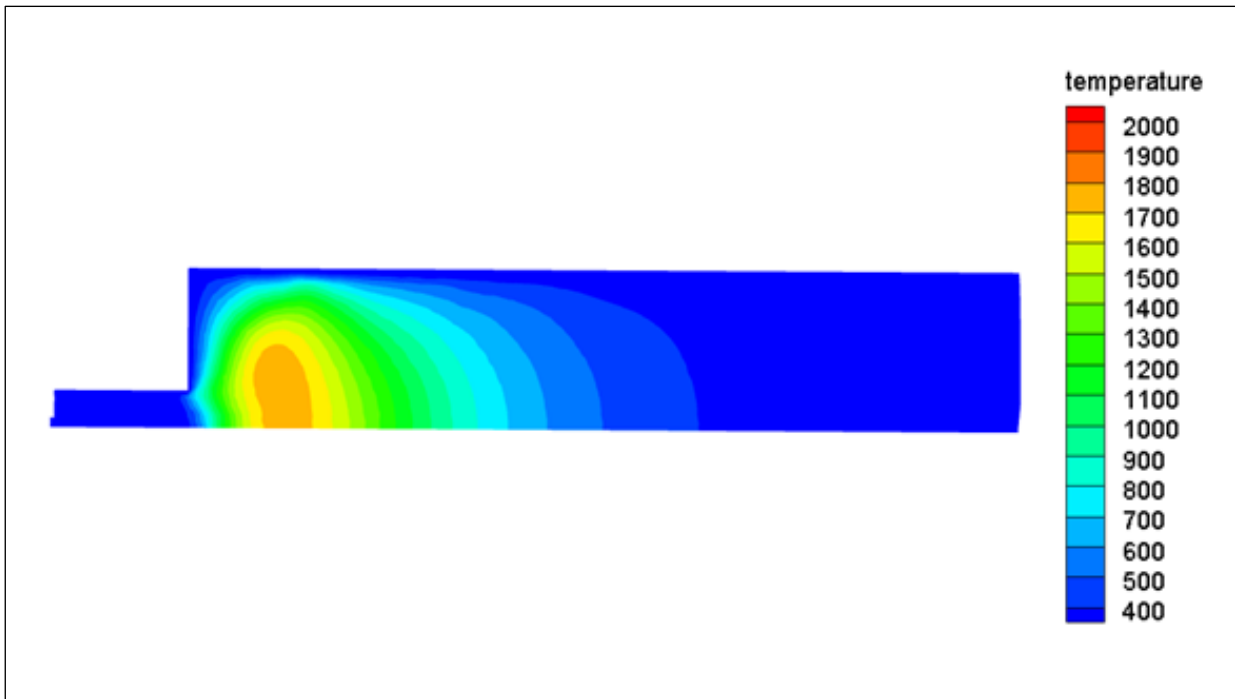
- Sur les figures IV.2 et IV.3 la flamme est rouge ce que signifie que la combustion est incomplète.
- Vue le manque de moyens pour mesurer le débit à la sortie du jet ; nous étions contraints d'utiliser une méthode innovante (la méthode des poids), qui peut être entachée d'erreurs, mais comparé aux références et aux recherches dans ce domaine, les résultats obtenus nous semblent cohérent et proche de la réalité.
- Pour la validation de notre modèle on a mesuré avec un thermocouple la température à un point situé à une distance  $x = 115$  mm dans l'axe de la flamme (Fig. IV.3) qui nous a donné une valeur de température près de 780 K et le résultat est proche de celui de la simulation (800 K) voir (Fig. IV.10) ;
- Les résultats montrent que plus la vitesse du carburant, est élevée et plus la température est élevée. Cependant ; il est clair que le meilleur processus de combustion pour ce brûleur est avec la vitesse la plus faible comme le montre la figure (IV.1), la combustion est complète à la vitesse 0.55 m/s.
- Pour les vitesses 1.88 m/s et 3.45 m/s la combustion est incomplète voir les figures (IV.2) et (IV.3).
- Nous concluons que plus la vitesse de gaz est élevée plus que le facteur de protection est faible par rapport à ce qui est requis pour l'usage domestique.

### **IV.3. Résultats numériques**

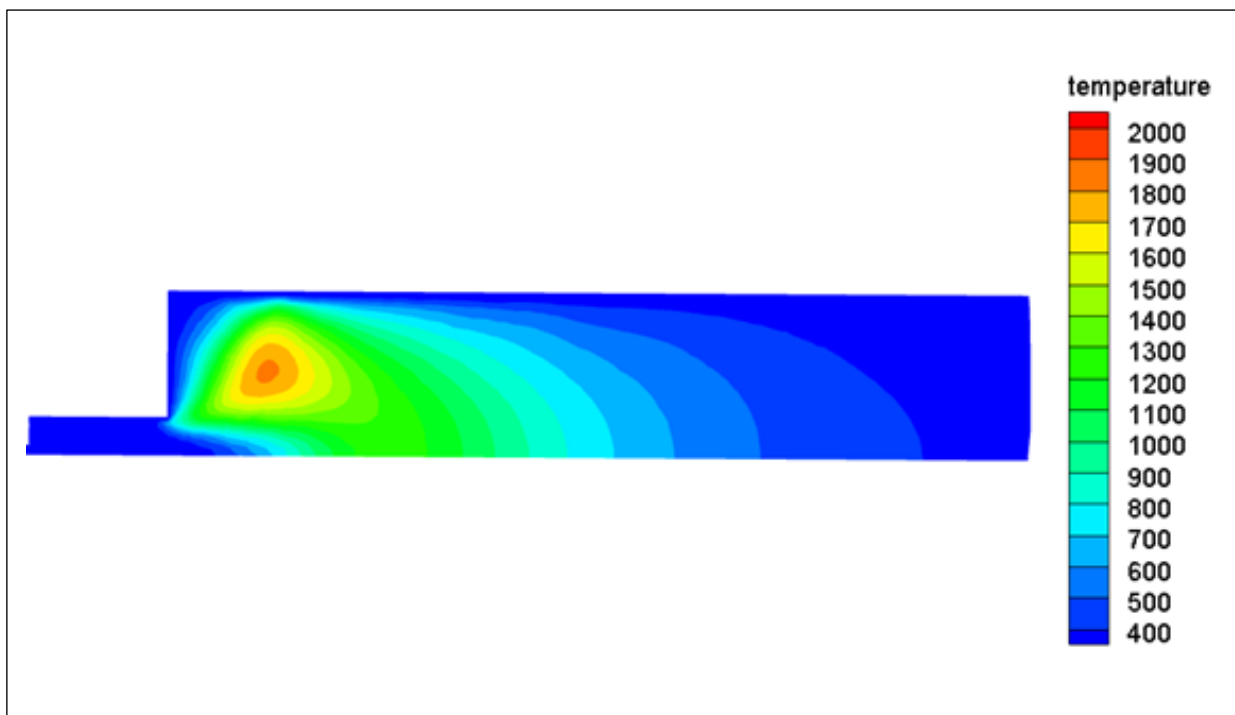
Nous présentons ici les résultats de la simulation numérique de la flamme de diffusion turbulente butane / air.

### IV.3.1 Contours de températures

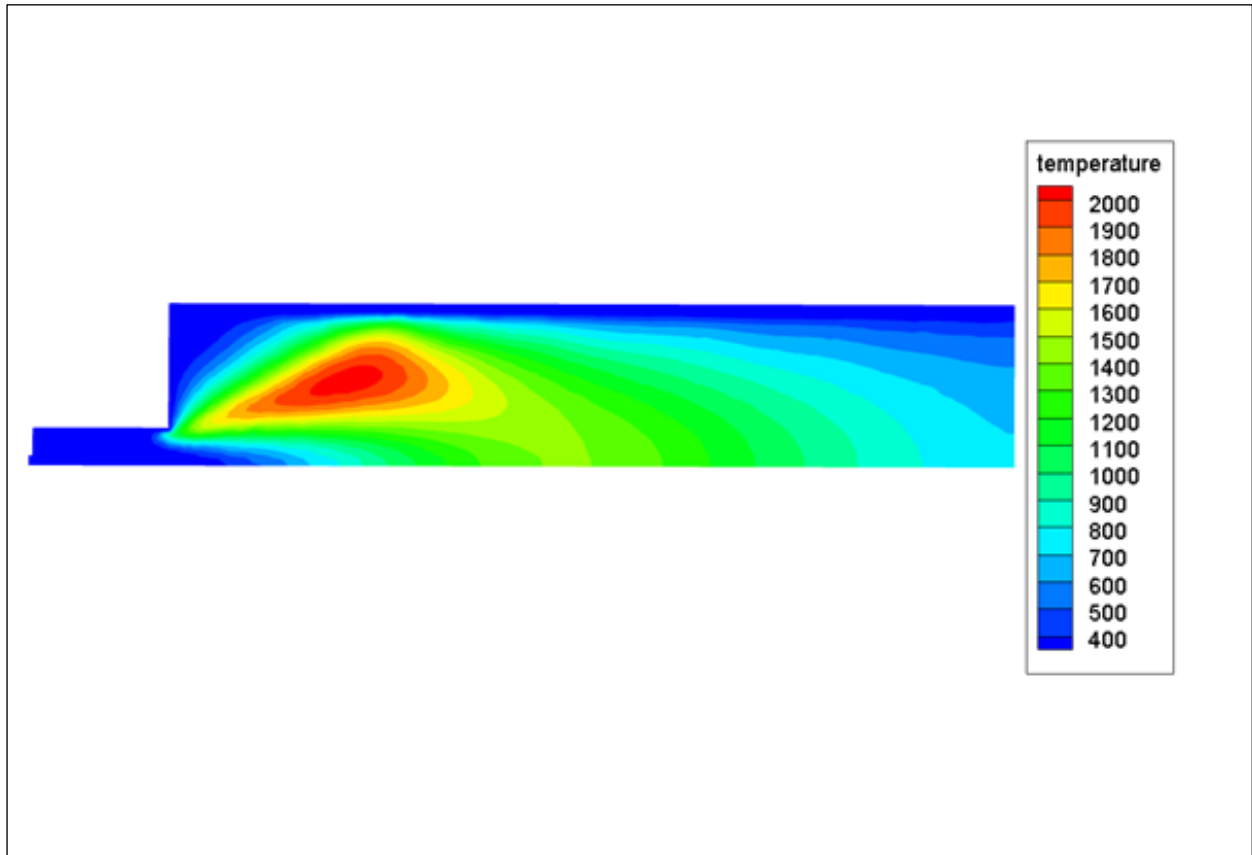
La variation de température est clairement proportionnelle sur la figure (IV.4) ; on remarque qu'il y a croissance de la température avec la croissance de vitesse de combustible, dans le cas  $V_{\text{butane}} = 0.55 \text{ m/s}$  la température atteint  $1764 \text{ K}$ , dans le cas  $V_{\text{butane}} = 1.88 \text{ m/s}$  on atteint les  $1793 \text{ K}$ , dans le cas  $V_{\text{butane}} = 3.45 \text{ m/s}$  la température atteint les  $2067 \text{ K}$ . En aval du front de la flamme, la concentration de ces espèces diminue puisqu'elle se mélange avec l'air environnant.



$V_{\text{fuel}} = 0.55 \text{ m/s}$ ,  $T = 1764 \text{ K}$ ,



$V_{\text{fuel}} = 1.88 \text{ m/s}$ ,  $T = 1793 \text{ K}$



$V_{\text{fuel}} = 3.45 \text{ m / s}$  ;  $T = 2067 \text{ K}$

**Fig. IV.4 : Contour de température**

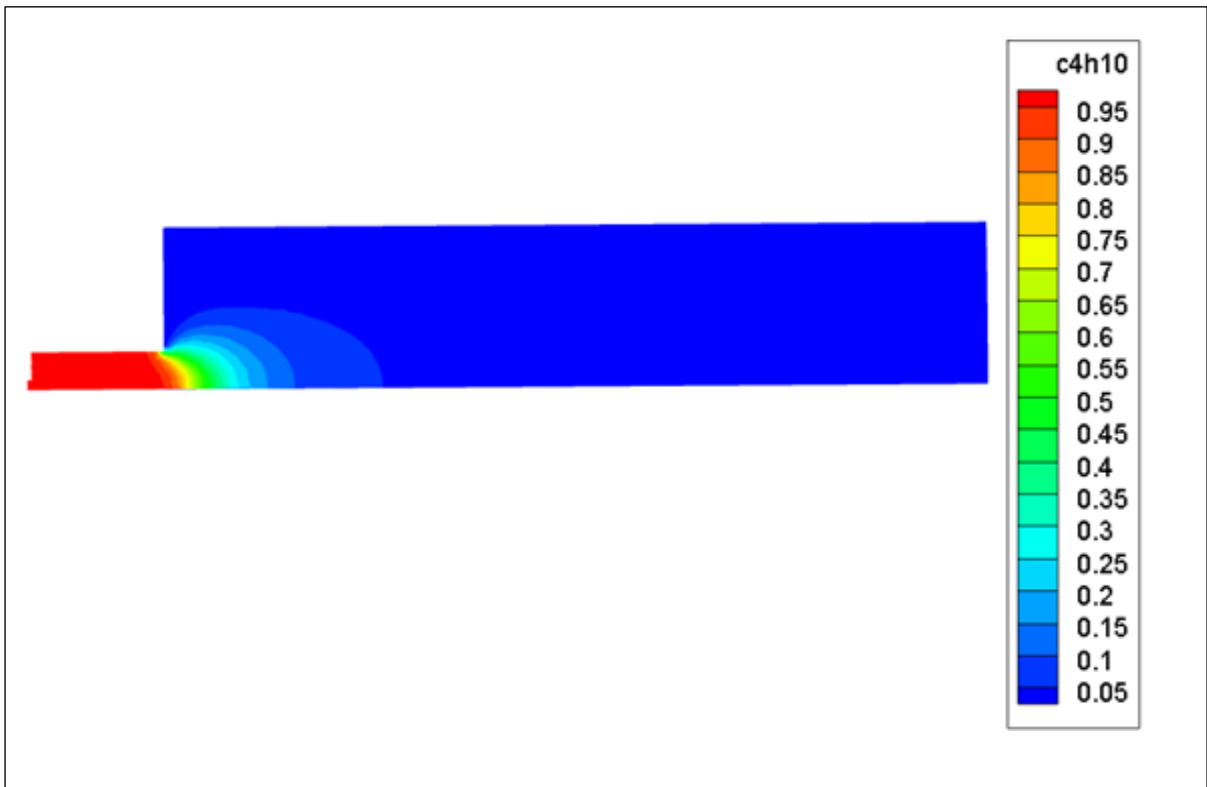
### IV.3.2. Fractions massiques

La consommation du combustible est clairement illustrée sur la figure (IV.5.). En effet, la fraction massique diminue progressivement de la valeur initiale (en sortie de jet) pour disparaître complètement à la fin de la zone de réaction.

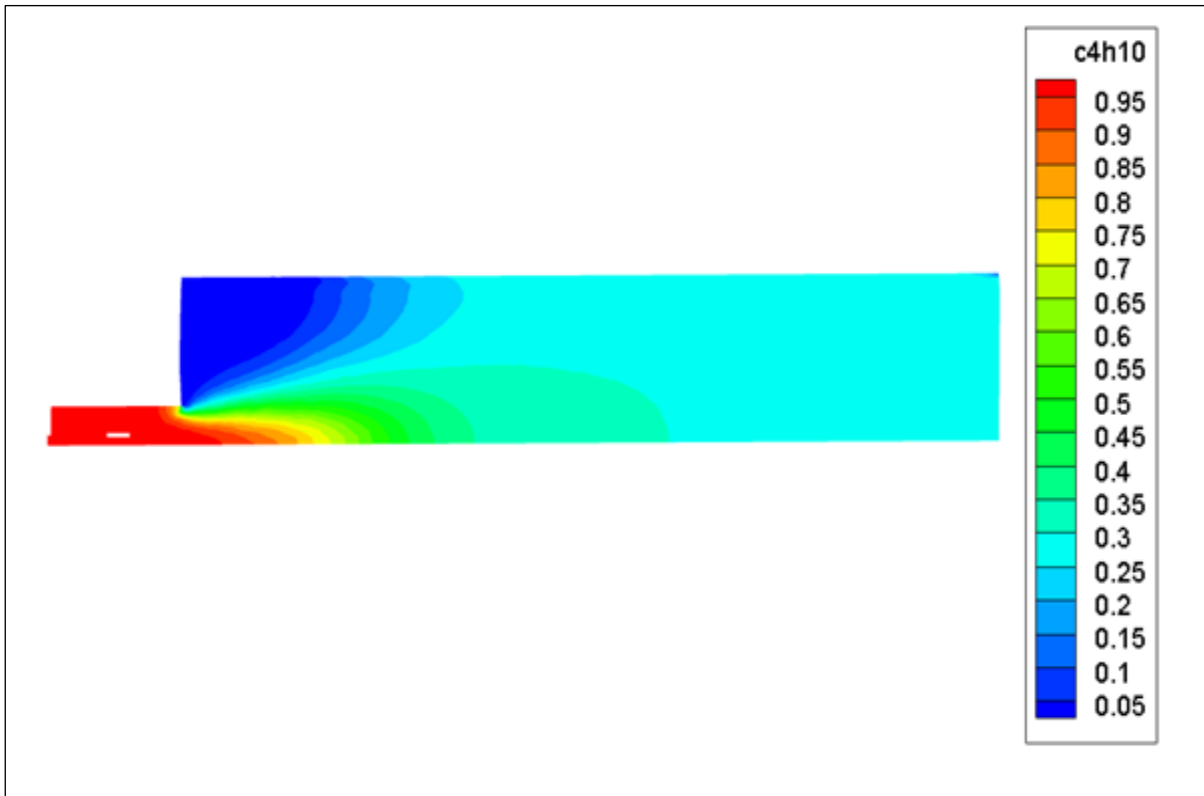
On observe près de la sortie de jet de butane que le centre de jet est froid et riche en  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ . La zone de température élevée (zone de la flamme) occupe un espace annulaire qui sépare la zone riche en butane et celle extérieure, riche en oxygène.

La fraction massique de  $\text{O}_2$  sur l'axe de jet est totalement nulle c'est à dire dans la zone de flamme.

Les produits de combustion, inexistant dans le mélange, vont progressivement apparaître et augmenter pour atteindre des valeurs maximales dans la zone de réaction, pour le dioxyde de carbone voir la figure (IV.7) et pour le  $\text{H}_2\text{O}$  voir figure (IV.8) , on remarque le comportement similaire de ces fractions.

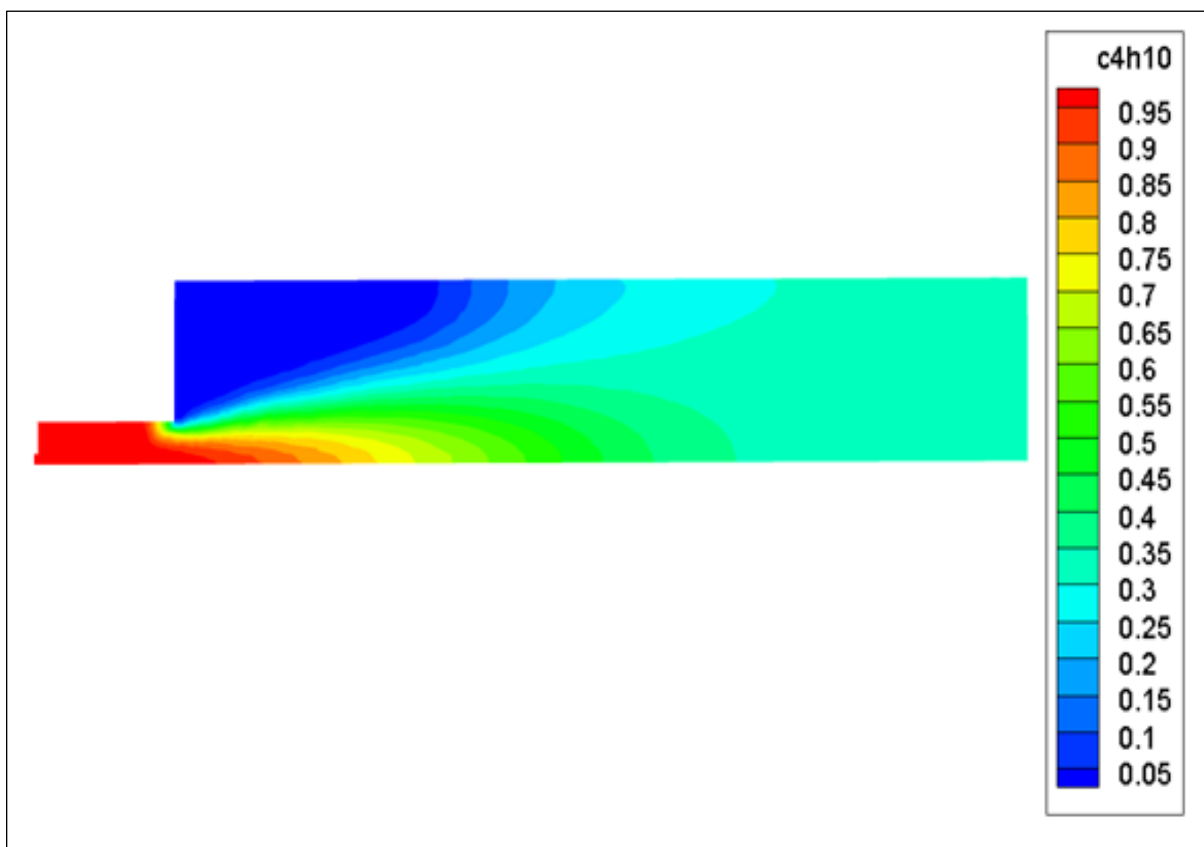


$V_{fuel} = 0.55 \text{ m/s}$



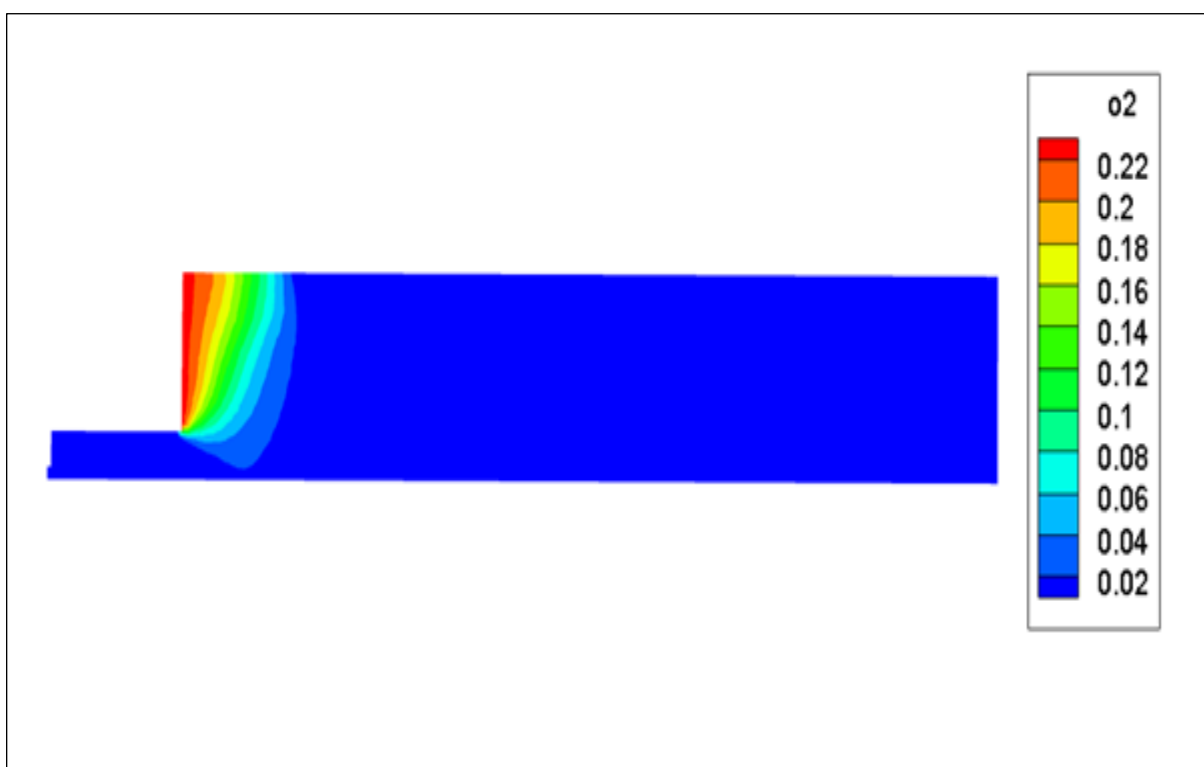
$V_{fuel} = 1.88 \text{ m/s}$



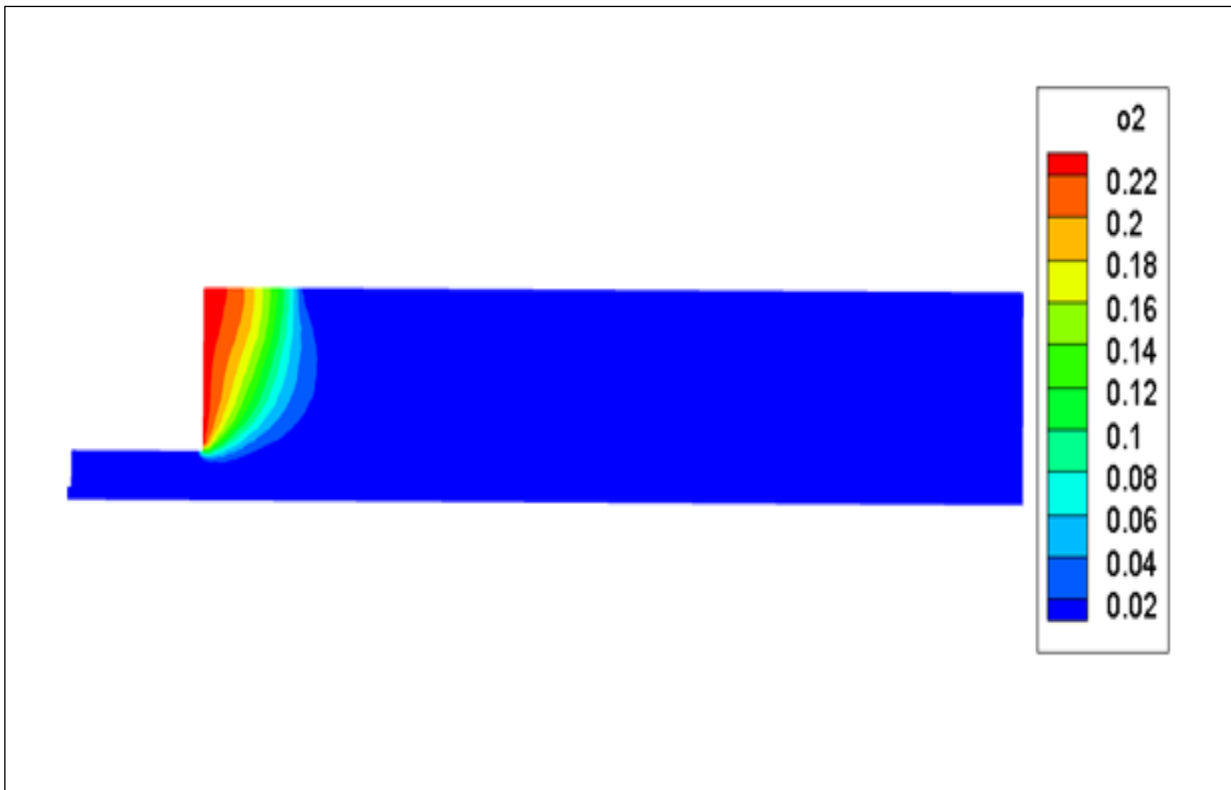


$V_{fuel} = 3.45 \text{ m/s}$

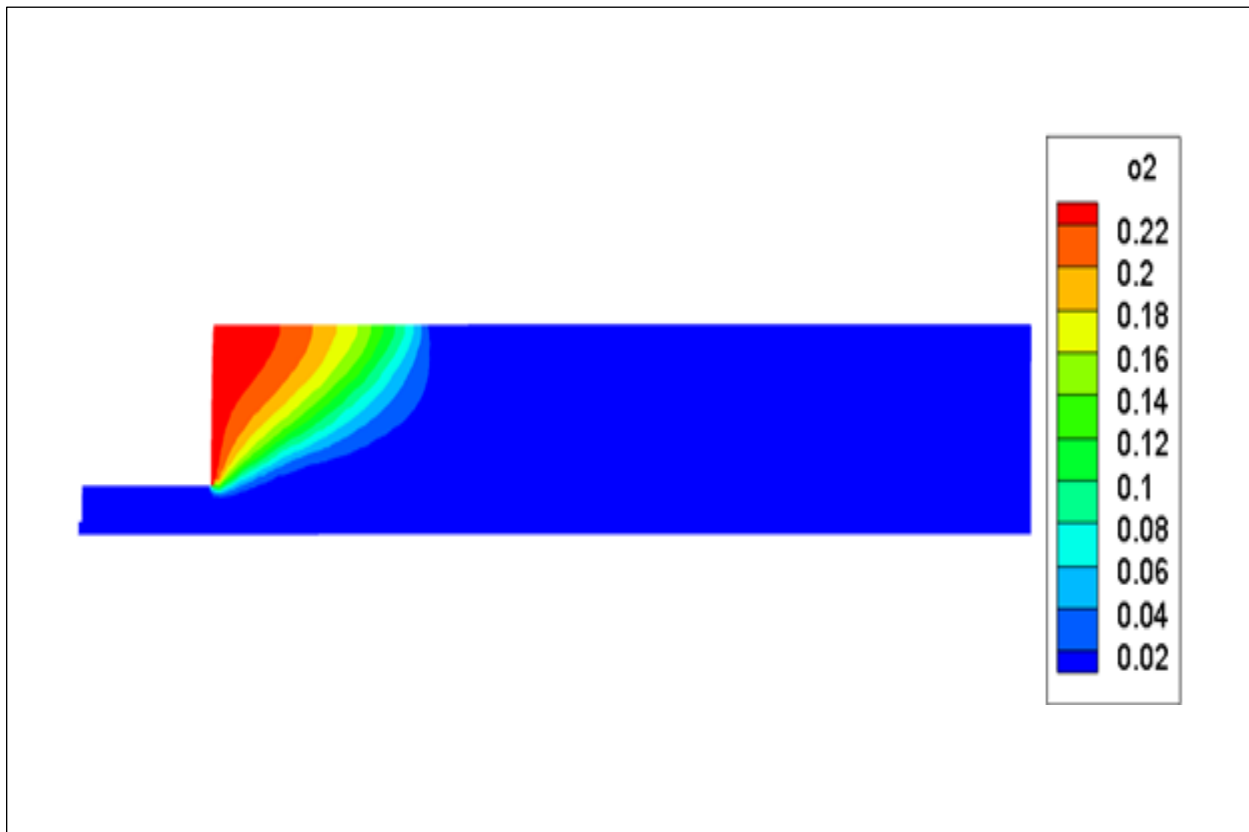
**Fig. (IV.5.) : Contours de fraction de masse de butane  $C_4H_{10}$**



$V_{fuel} = 0.55 \text{ m/s}$

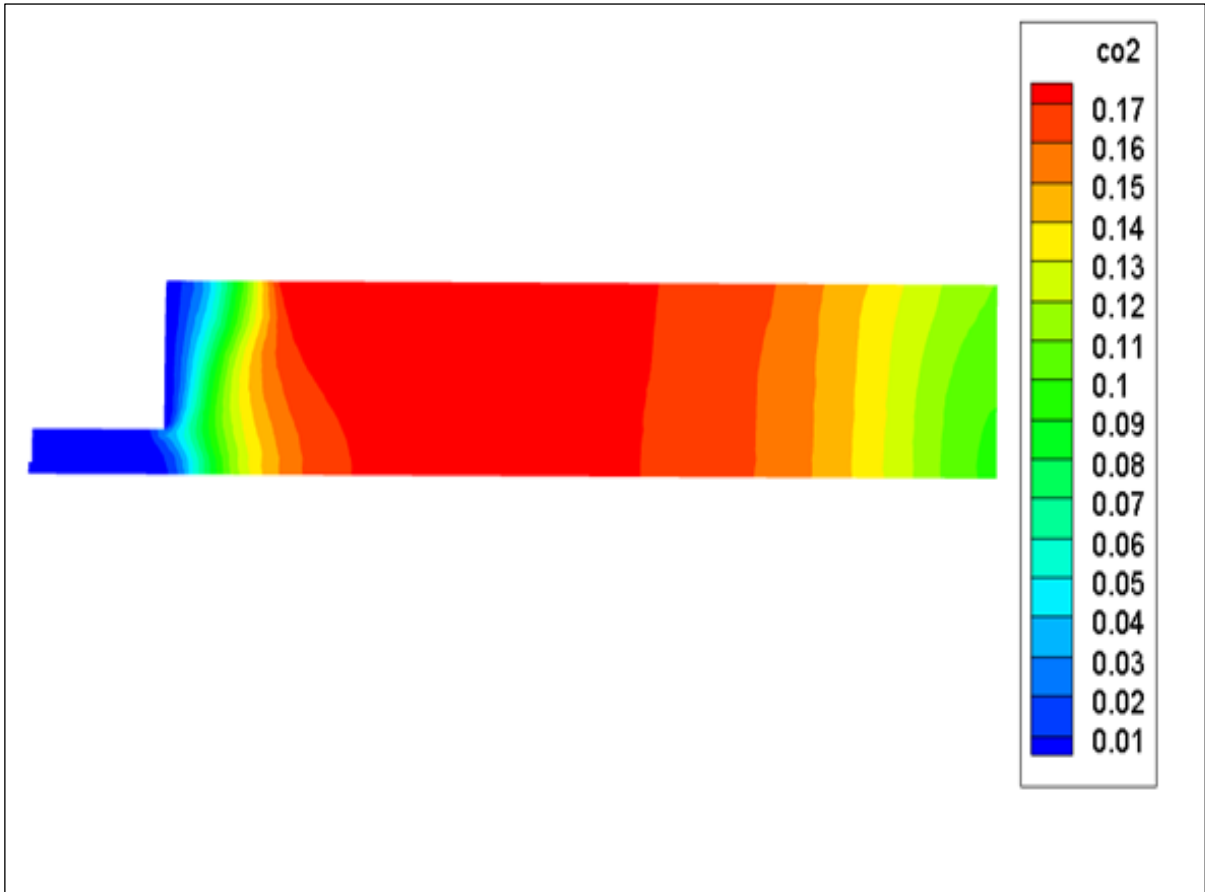


V fuel = 1.88 m/s

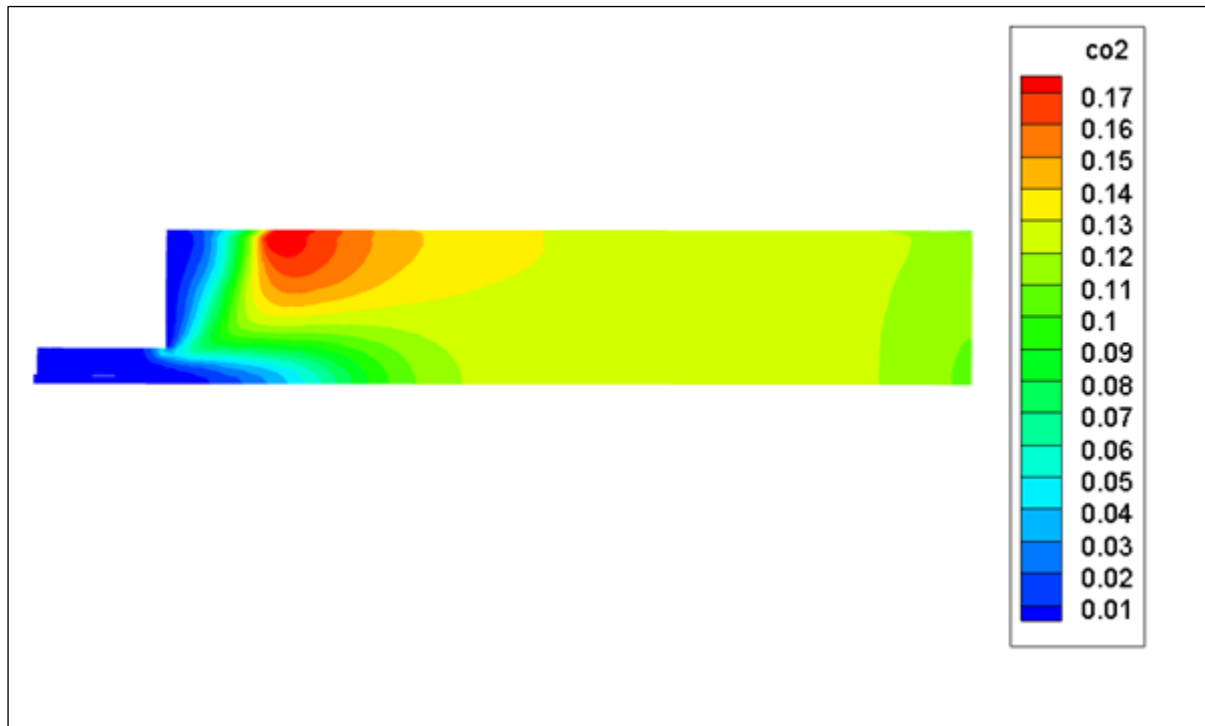


V fuel = 3.45 m/s

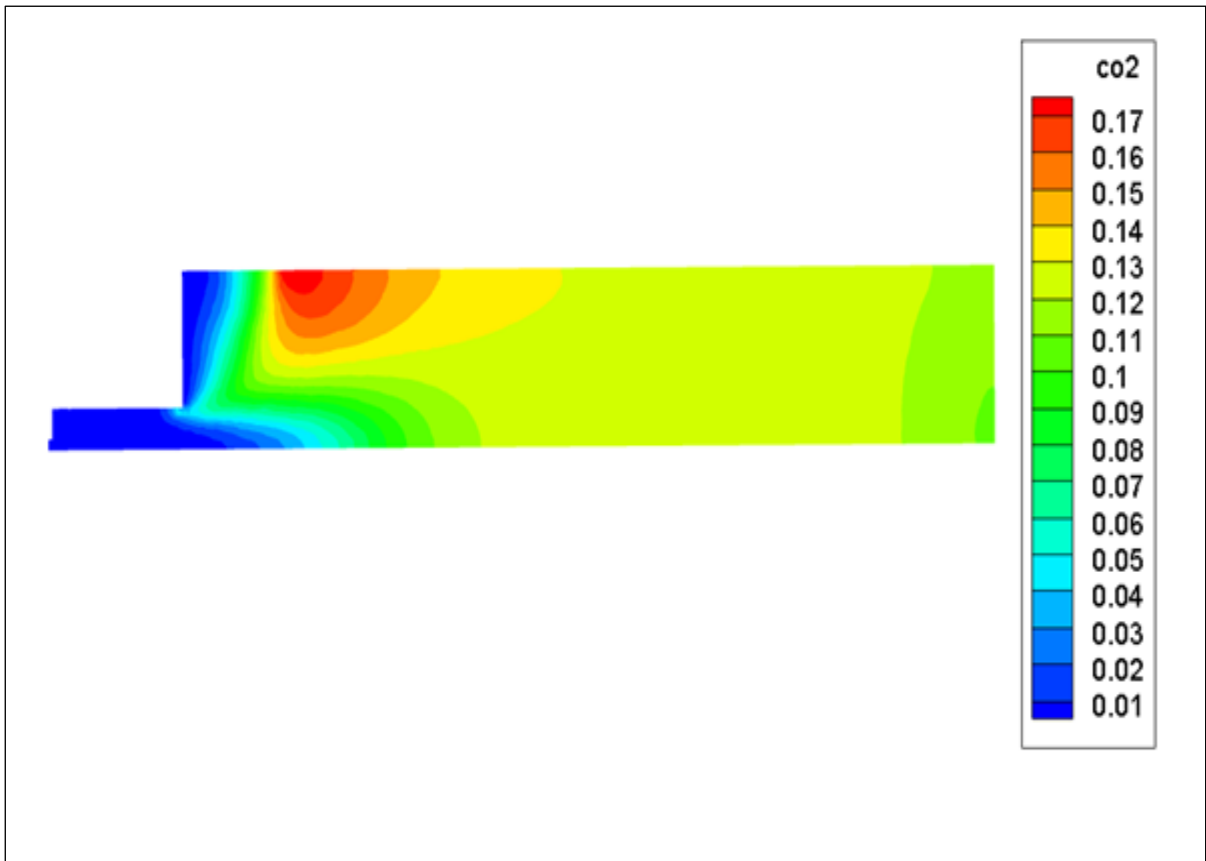
**Fig. (IV.6) : Contour de fraction de masse d'O<sub>2</sub>**



$V_{\text{fuel}} = 0.55 \text{ m/s}$

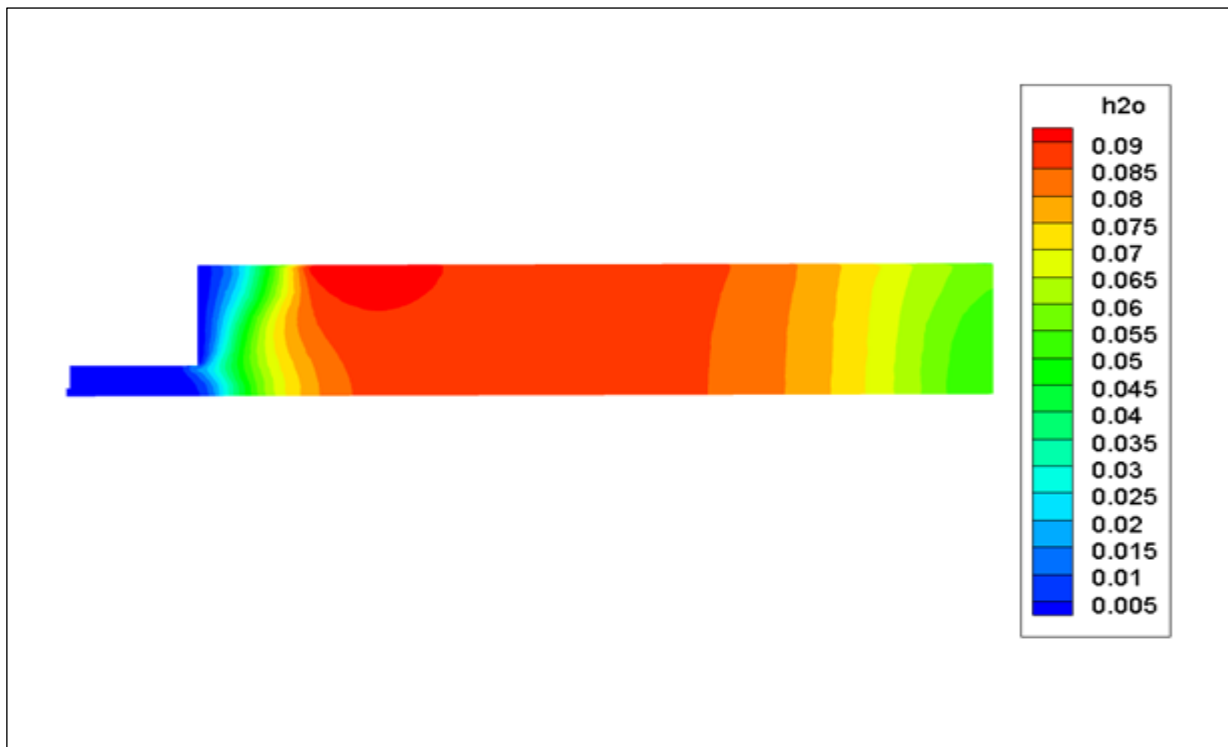


$V_{\text{fuel}} = 1.88 \text{ m/s}$

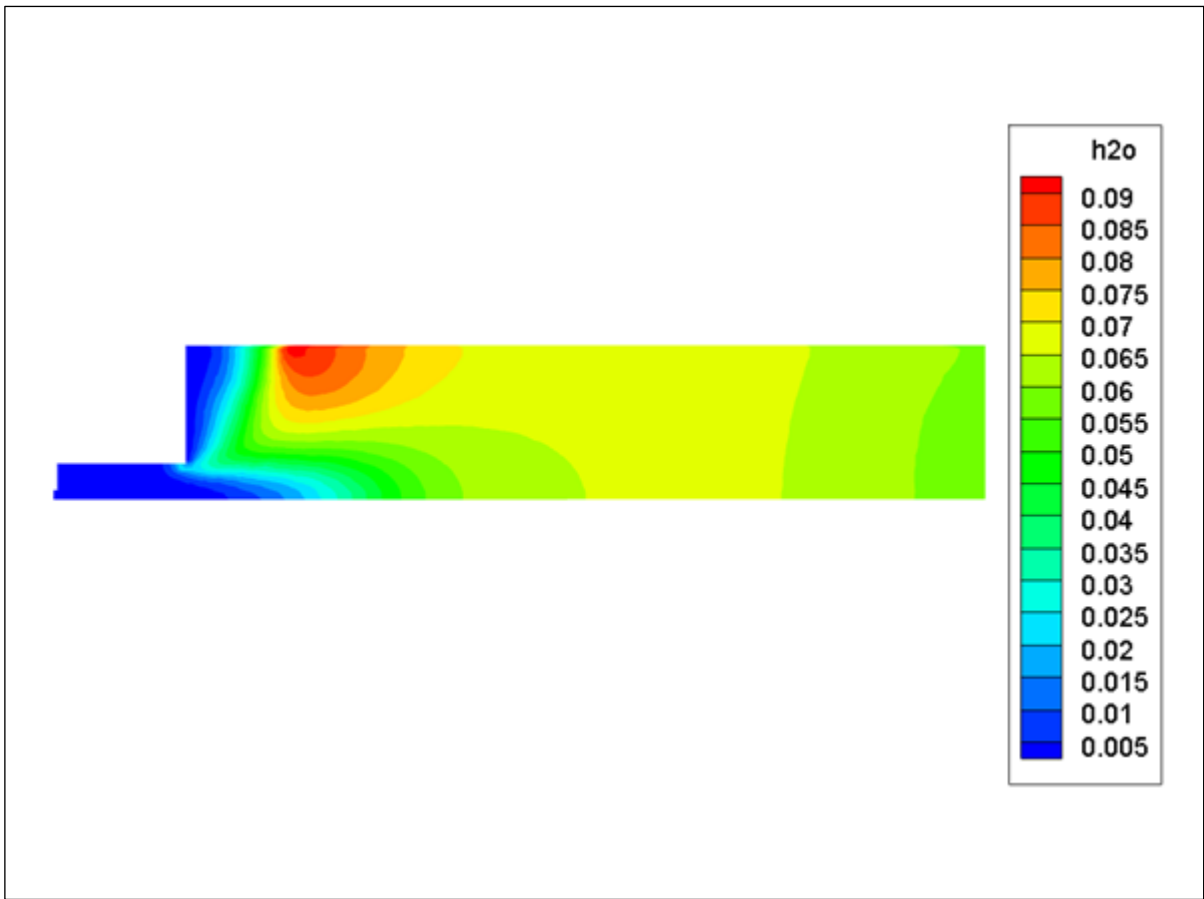


$V_{\text{fuel}} = 3.45 \text{ m/s}$

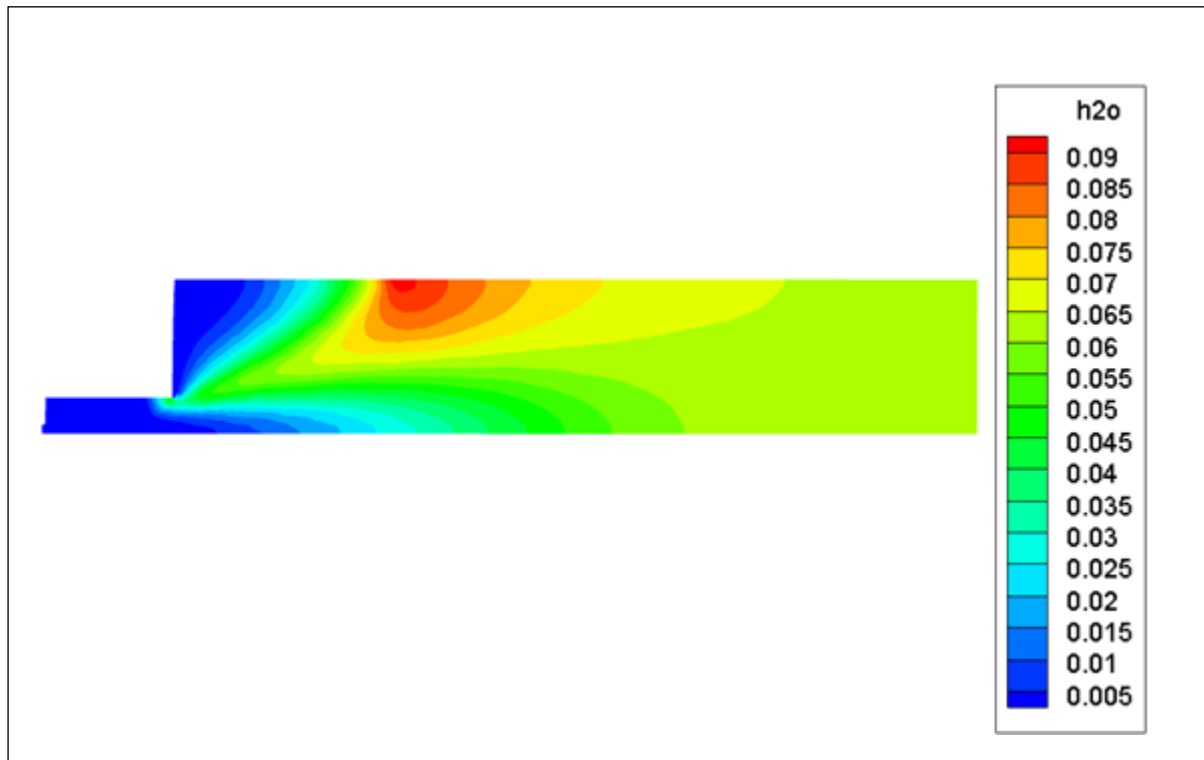
**Fig. (IV.7) : Contour de fraction de masse de  $\text{CO}_2$**



$V_{\text{fuel}} = 0.55 \text{ m/s}$

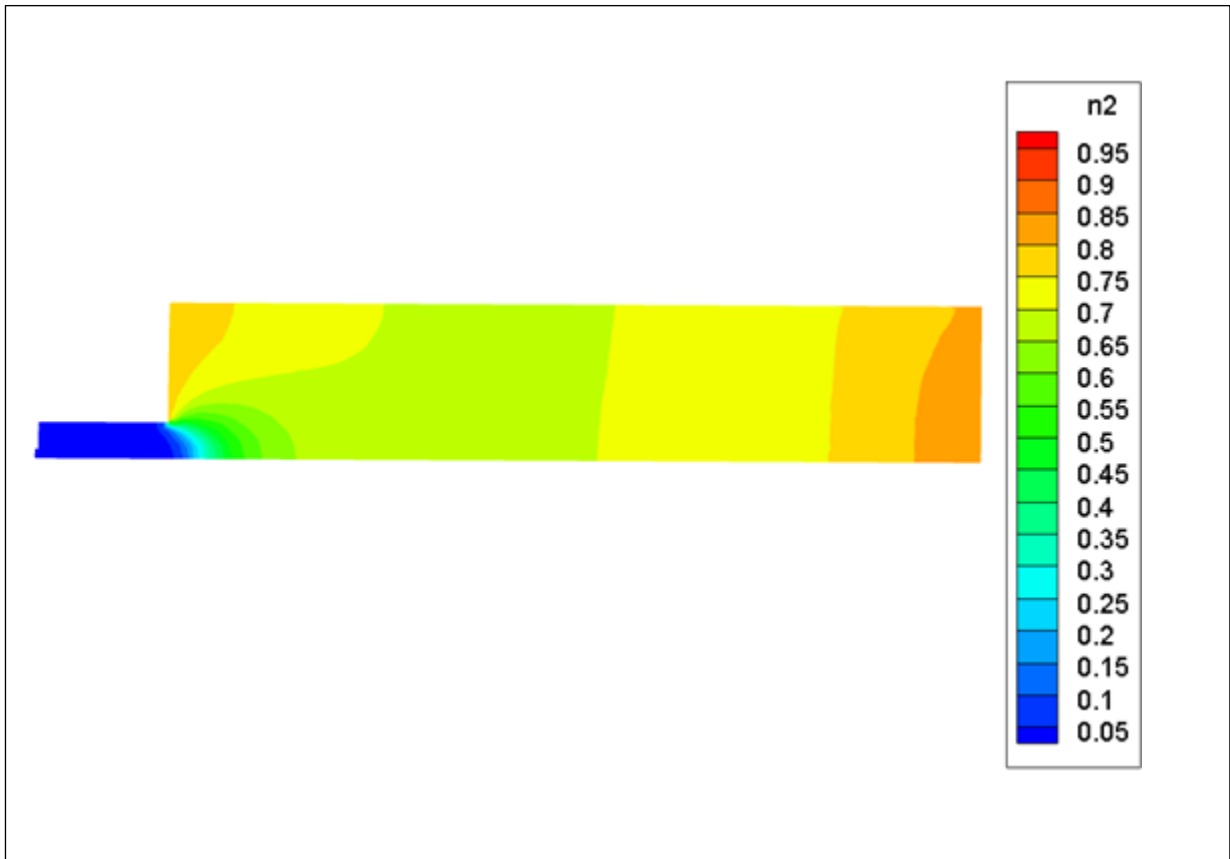


$V_{\text{fuel}} = 1.88 \text{ m/s}$

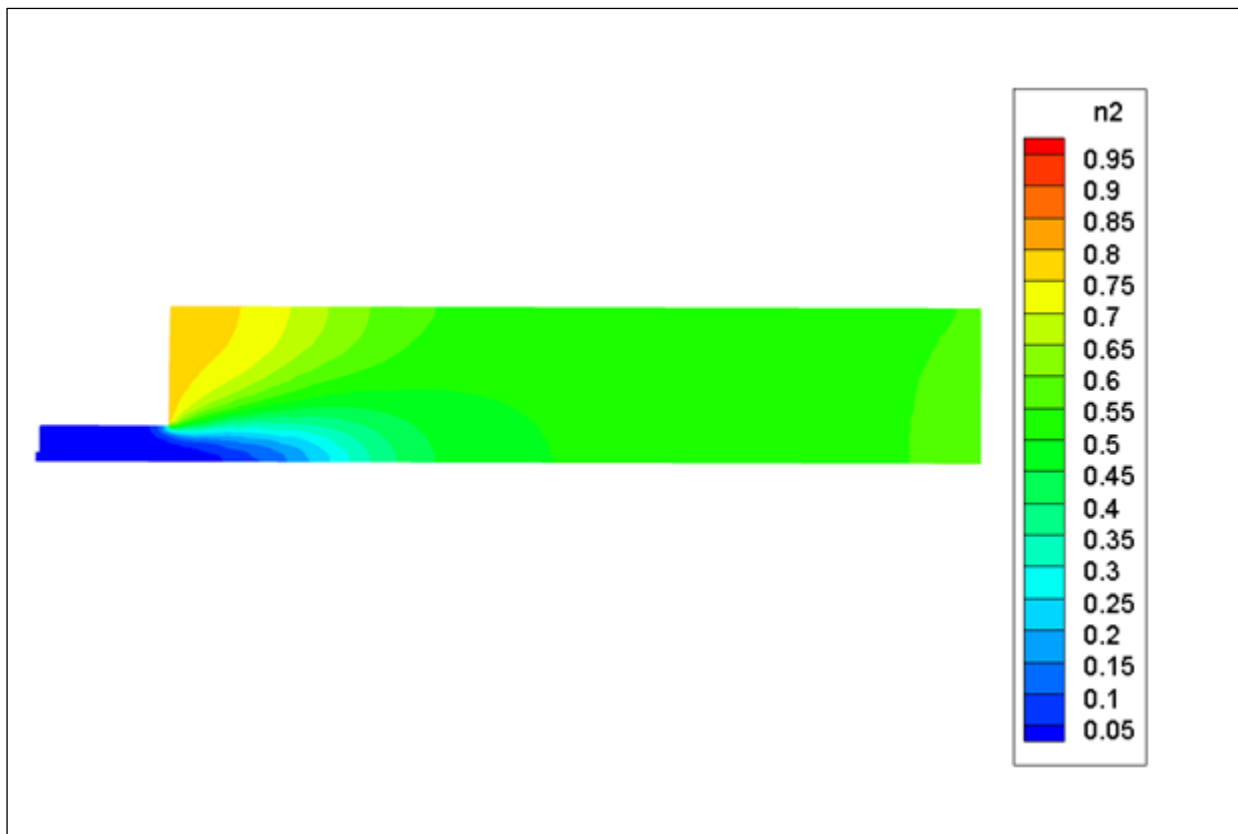


$V_{\text{fuel}} = 3.45 \text{ m/s}$

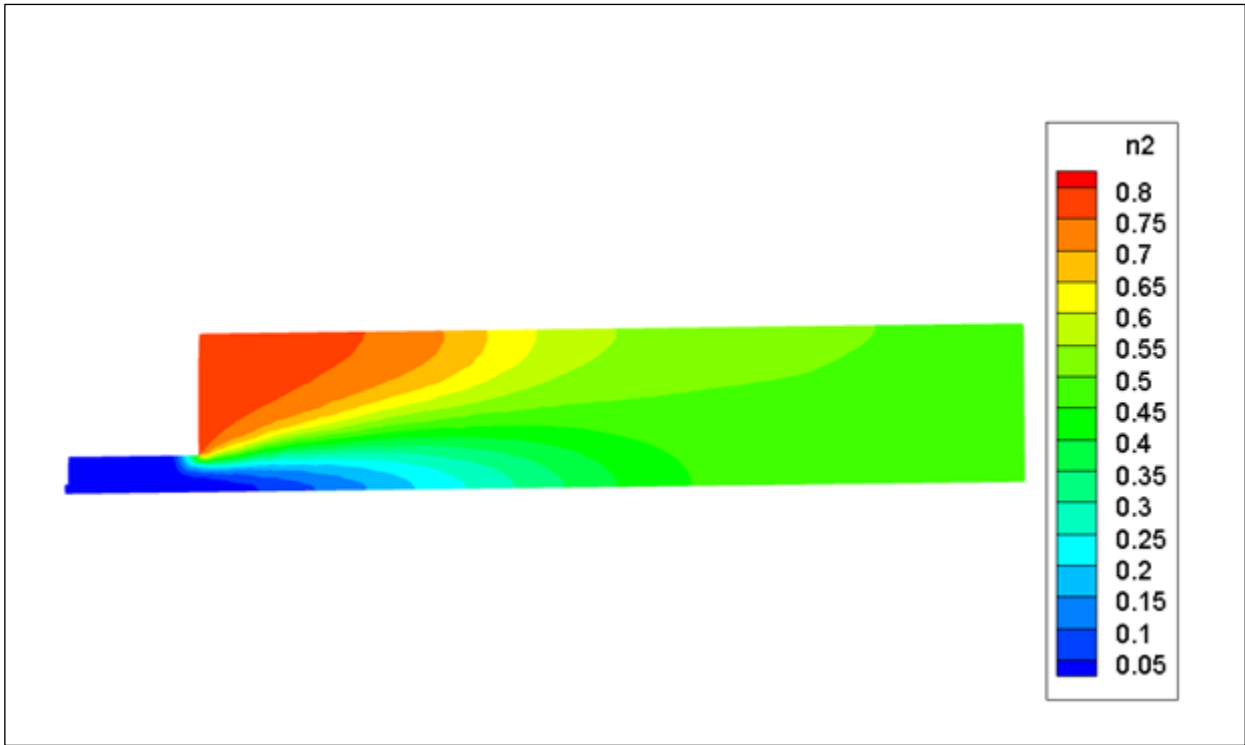
**Fig. (IV.8) : Contour de fraction de masse de H<sub>2</sub>O**



$V_{\text{fuel}} = 0.55 \text{ m/s}$



$V_{\text{fuel}} = 1.88 \text{ m/s}$

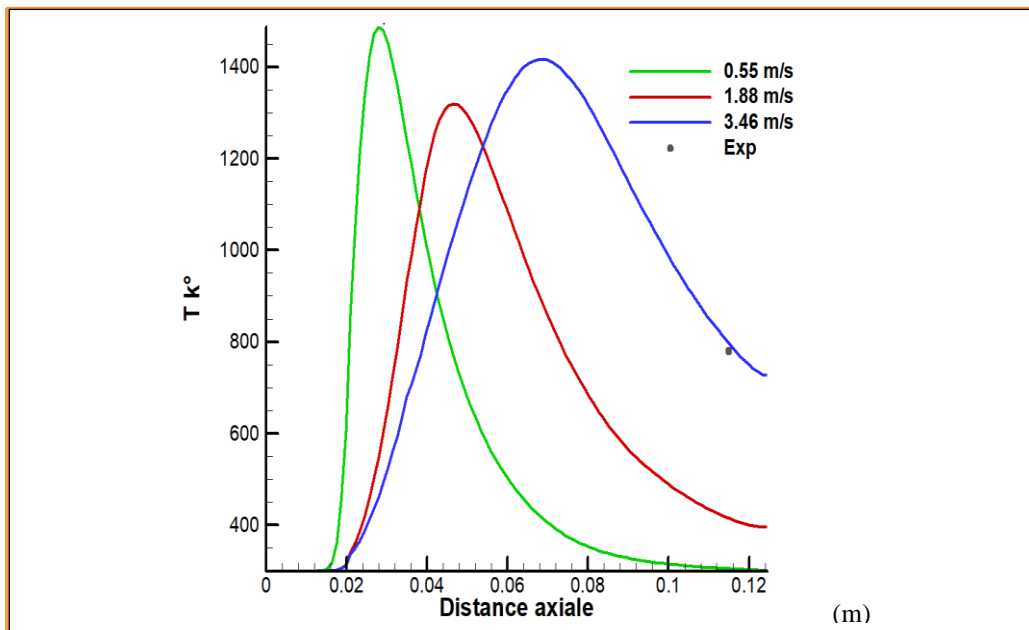


$V_{\text{fuel}} = 3.45 \text{ m/s}$

**Fig. (IV.9) : Contour de fraction de masse de  $N_2$**

### IV.3.3 Profil de températures

On trace le profil de température pour les trois vitesses (0.55 ; 1.88 ; 3.45) le long du volume de contrôle, car on n'a pas assez d'informations sur les coordonnées expérimentales qui peuvent coïncider avec les coordonnées numériques.



**Fig. IV.10 : Profil de températures dans la zone de flamme**

La figure IV.10 représente le profil de températures dans la zone de flamme  $C_4H_{10}/air$ .

- De  $x = 0$  à 20 mm on remarque que la température est de 300 K, on constate que cette zone correspondant à la zone de gaz pur.
- la zone de combustion (réchauffement) :
  - \* De  $x = 20$  à 30 mm pour la vitesse du gaz 0.55 m/s,
  - \* De  $x = 20$  à 50 mm pour la vitesse du gaz 1.88 m/s.
  - \* De  $x = 20$  à 30 mm pour la vitesse du gaz 3.45 m/s.
- on remarque que le corps chauds pour les trois courbes pousse vers avant de l'axe , avec l'augmentation de débit de carburant
- on présente aussi une validation par rapport a un mesure expérimentale ou le résultats est en argument

#### IV.3.4 Profil de fraction de masse de gaz butane $C_4H_{10}$

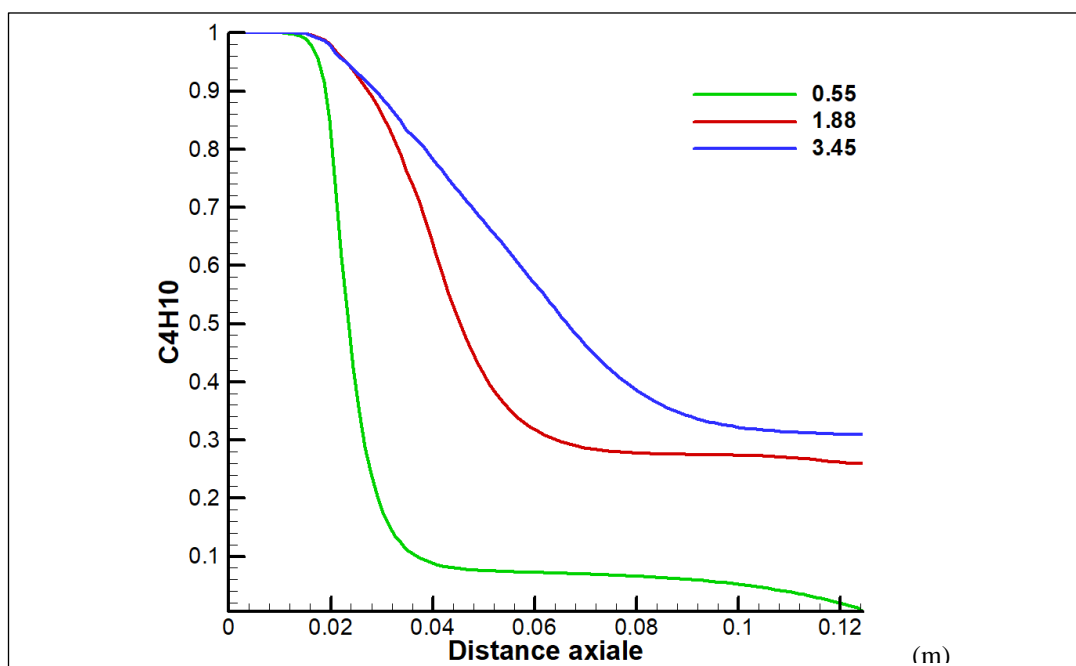


Fig. IV.11 : Profil de fraction de masse de gaz butane  $C_4H_{10}$  dans la zone de flamme

Sur la figure IV.11 nous avons représenté le profil de la fraction de masse de gaz dans la zone de flamme du  $C_4H_{10}/air$ .

- De  $x = 0$  à 20 mm la concentration en butane est au maximum, on constate qu'il s'agit d'une zone de gaz pur.



- De  $x = 20$  à  $100$  mm la fraction massique de butane diminue progressivement de la valeur initiale pour disparaître complètement à la fin de la zone réaction.
- On remarque que pour les débits élevés la combustion est riche en carburant, par contre pour de faible débit le carburant est rapidement consommé.

### VI.3.5 : Profil des fractions massiques

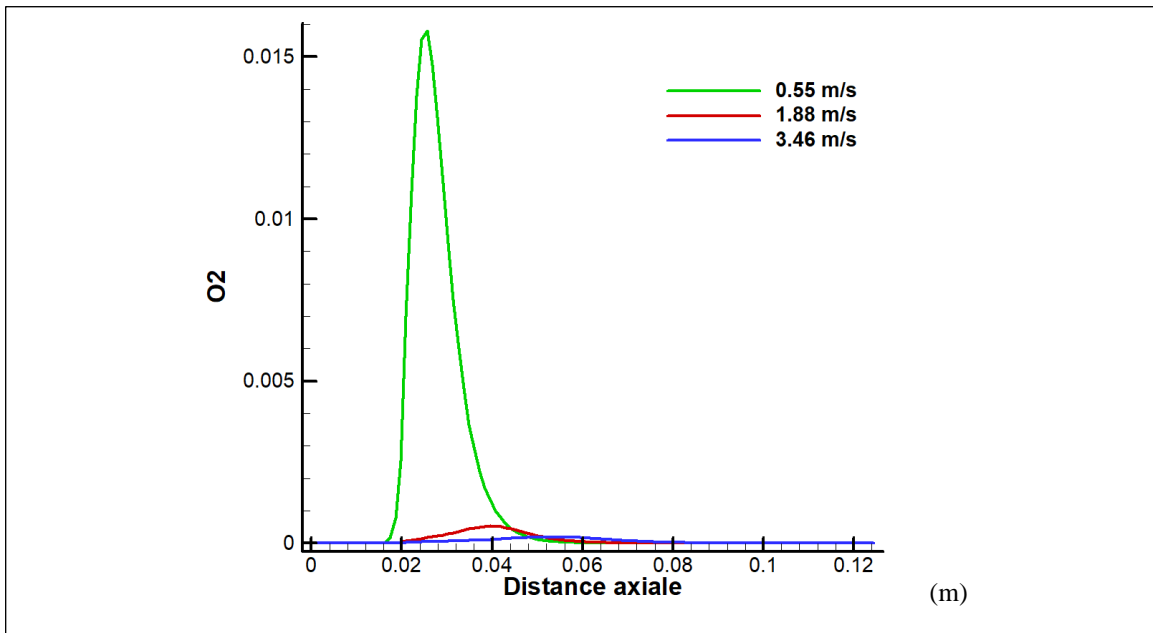


Fig. IV.12 : Profil d'O<sub>2</sub> dans la zone de flamme

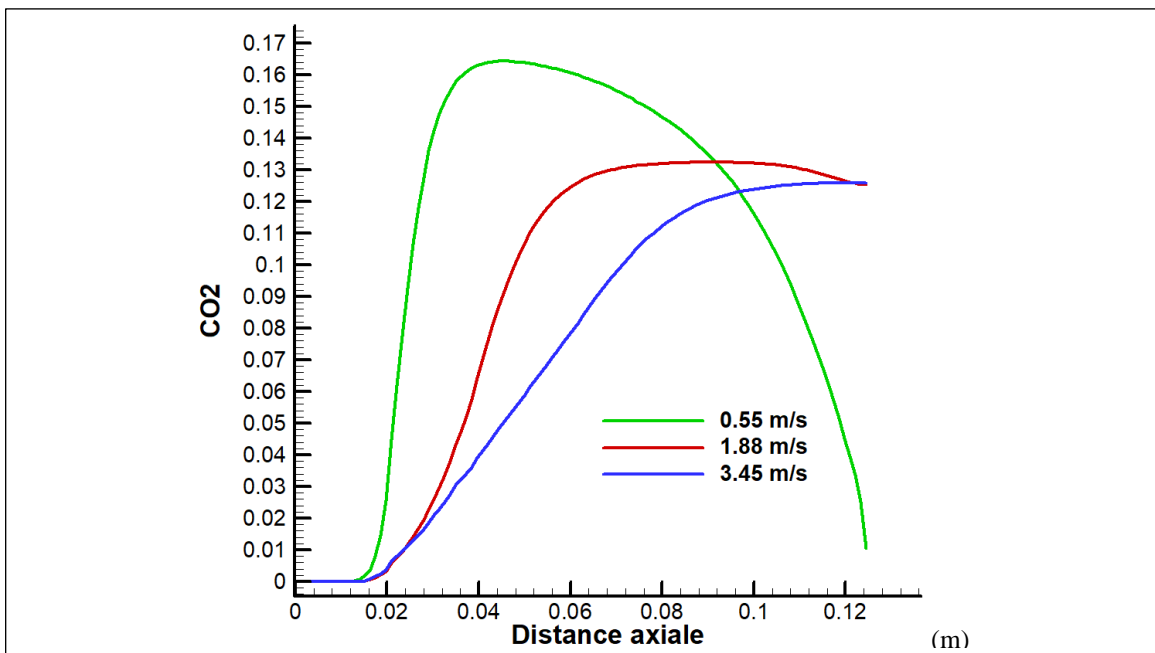


Fig. IV.13 : Profil de CO<sub>2</sub> dans la zone de flamme

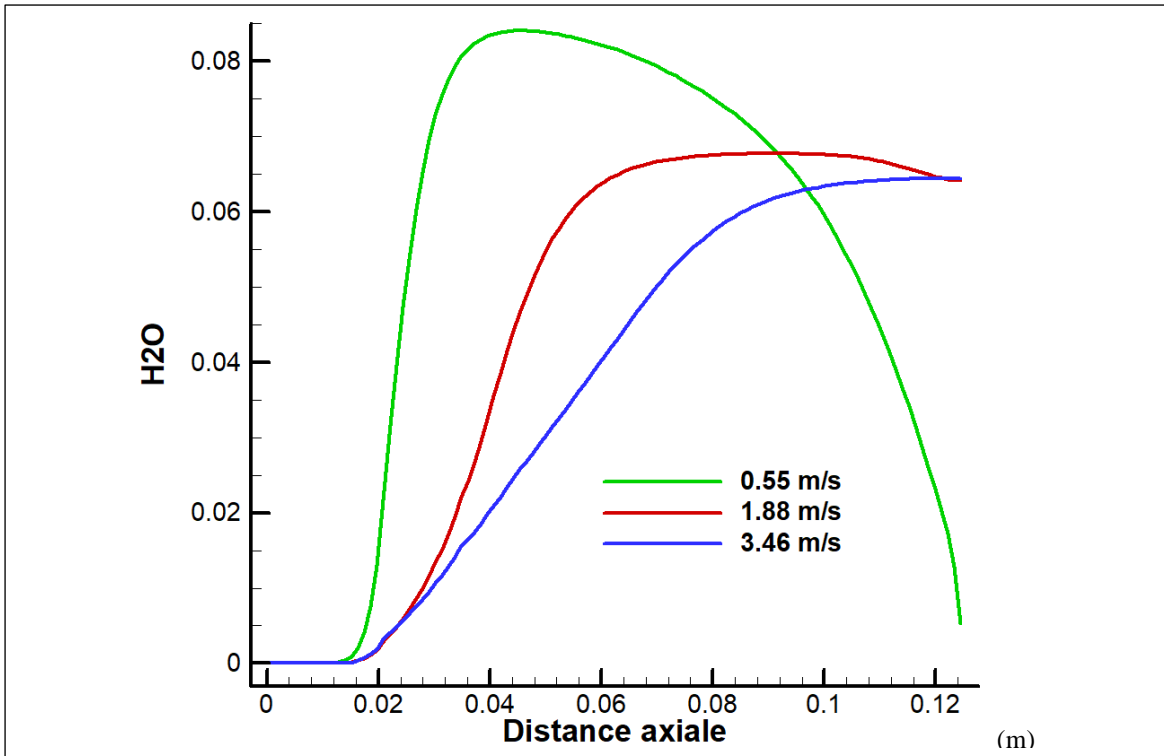


Fig. IV.14 : Profil de H<sub>2</sub>O dans la zone de flamme

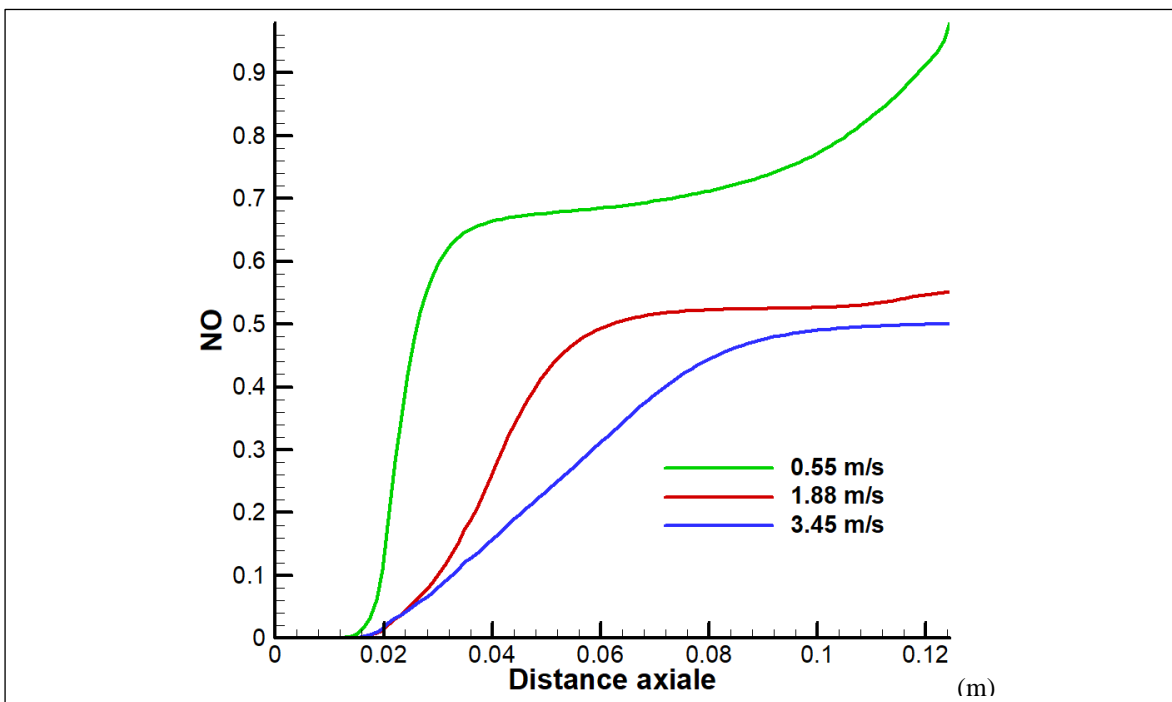


Fig. IV.15 : Profil de N<sub>2</sub> dans la zone de flamme

- Les produits de combustion ; inexistant dans la mélange ( $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) vont progressivement apparaître et augmenter pour atteindre des valeurs maximales dans la zone de réaction.
- De  $x = 0$  à  $x = 20$  mm les produits ( $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) sont nul signifier qu'il n'y a pas de réaction
- De  $x = 20$  mm à 120 mm les produits ( $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) augmentent au maximum, c'est la zone de réaction.
- De  $x = 0$  à 20 mm le  $O_2$  est nul c'est la zone de gaz pur (Fig. IV.12).
- On remarque que pour le faible débit ( 0.55 m/s) on a assez de  $O_2$  que on peut augmenter la richesse en carburant

## **Conclusion générale**

Le sujet sur lequel on a travaillé avec mon promoteur dans le cadre de mon projet de fin d'études, porte sur l'étude théorique et expérimentale de la flamme d'un brûleur à gaz. C'est un sujet d'actualité qui oppose la protection de l'environnement à la limitation de la combustion de produits fossiles par des normes de plus en plus sévères. Dans ce travail nous avons cherché à répondre à la problématique : Est-il possible de réduire encore plus les émissions de gaz à effet de serre tout en utilisant le GNL comme combustible ?

Durant la préparation de mon projet et après mes recherches bibliographiques sur la combustion des hydrocarbures d'une part et la simulation des phénomènes de combustion d'autre part, j'ai commencé par me perfectionner à la simulation à l'aide du logiciel Fluent entre autres. Cette première étape m'a permis de faire le point pour la suite de l'évolution de mon travail.

Parmi les questions que nous avons à traiter, d'une part la réalisation du montage de l'expérience sur un brûleur à gaz manuel de cuisine afin de pouvoir faire les mesures nécessaires à l'avancement de mon travail. Cette étape nous a permis de récolter un certain nombre d'informations utiles à la validation de notre modèle mathématique. La simulation à l'aide du logiciel Fluent nous a permis d'étudier l'influence d'un certains nombres de paramètres inaccessibles par l'expérience.

Les résultats obtenus ont montré qu'il est possible de réduire encore de façon significative les émissions de polluants. Enfin, nous pensons aussi que ces résultats contribueront à l'avenir à une meilleure utilisation de ce combustible fossile.

Pour terminer ce projet me semble bien intéressant et qu'il mérite bien d'être poursuivi dans l'avenir.

## **Références bibliographiques**

[1] **P. Dirrenberger**, Etude expérimentale et théorique des vitesses de flammes laminaires d'hydrocarbures. Thèse, 2014.

[2] **Borghi R.**, Destriau M. : La combustion et les flammes. Technip, 1995.

[3] **A. Turbiez** ; Etude expérimentale et modélisation de la combustion du gaz naturel dans des flammes laminaires prémélangées. Thèse, 1998.

[4] **Hawthorne, W.R., D.S. Weddell, and H.C. Hottel**, "Mixing and combustion in turbulent gas jets", Third International Symposium on Combustion, Flame and Explosion Phenomena, Williams and Wilkins Co., Baltimore, 1949, pp.266-288.

[5] **J. F.Driscoll, H. Huh, Y. Yoon, J. Donbar**, Measured lengths of supersonic hydrogen-air jet flames-Compared to subsonic flame lengths-and analysis, Combustion and Flame vol 107, 1996, p. 176-186

[6] **Poinsot T. and Veynante D.**, Theoretical and Numerical Combustion, 2nd ed., R.T. Edwards, 2005.

[7] **Turns S. R.**, An Introduction to Combustion, McGraw-Hill, New-York, 1996.

[8] **Williams F. A.**, Combustion Theory, 2nd ed., Perseus Books Reading, Massachusetts, 1985.

[9] **Agarwal A.K.**: Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, vol. 33, p. 233-271.

[10] **Lange J.-P., Price R., Ayoub P.M., Louis J., Petrus L., Clarke L., Gosselink H.**: Valeric biofuels: a platform of cellulosic transportation fuels. Angewandte Chemie International Edition, 2010, vol 49, p. 4479-4483.

[11] : **E.Planas-Cuchi, J.Ma-Chatris, C. Lopez, J. Arnaldos**, « Determination of Flame Emissivity in Hydrocarbon Pool Fires Using Infrared Thermography », fire technology , 39, 261-273, 2003.

[12] : **J.Ming-Char, J-Hsein-Yeh** « The mesurment of open propane flame température using infrared thechnique »Aeronautical Engineering Department, February 1996.

[13] : **F. RINIERI** « Mesure de la température dans une flamme au moyen d'une caméra infrarouge », Université de CORSE, France. Nouvembre 2005.

[14] : **Victor V. Ghiea (Ghia)** « Method using infrared thermography for combustion testing of fuel oil » Polytechnic University of Bucharest, Thermo-Mechanical Engineering Dep, 313 Spl. Independentei, Sector 6, Romania, p.219 – 228,2002.

[15] : **C. Qiaq-Ghassan Tashtoush, A. Ito, K. Saito** « Structure of large scale pool fires» International Conference on Fire Research and Engineering, September 10-15,1

[16] : **J.Luc-Dupuy, Ph.Vachet, J.Marechal, J.Melendez, Antonio J. de Castro** « Emission-transmission measurements in flames using an infrared camera, Forest Ecology and Management, Madrid, Spain, 2006. .

[17] **D. Manaca , M. Rovaglio** « Infrared Thermographic Image Processing for the Operation and Control of Heterogeneous Combustion Chambers», Dipartimento di Chimica, Materialie Ingegneria Chimica “G. Natta”, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, March, 2002.

[18] **Akira Yamaguchi, Yuji Tajim** « A numerical study of radiation heat transfer in sodium pool combustion and response surface modling of lamininous flame emissivity »nuclear engineering and design, 236,1179-1191,2006.

[19] : **H. Chun, K.D-Wehrstedt, I. Vela, A. Schonbucher**, «Thermal radiation of di-tert-butylperoxide pool fires -experimental investigation and CFD simulation», Journal of Hazardous Materials, 2008.

[20] :**V. Novozhilov , H. Koseki** « Computational fluid dynamics prediction of self-sustained pool fire combustion »,Journal of The Institution of Engineers, Singapore Vol.1,2004.

[21] **Philippe Vachet** «Emission et transmission d’une flamme axi-symétrique », Institut National de la Recherche Agronomique, Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes, 2003.

[22] : **Valérie DESPREZ** « Thermographie aerienne infrarouge de l’agglomération », Presse,Dunkerque, le 16 mars 2004.

[23] : Etude numérique et expérimental de la flamme non prémelangee malika ladjani 2009

Magister

[24] : Applied Mathematical Modelling ; C.D. Argyropoulos ; N.C. Markatos 2015

[25] J. Schluuter, „Consistent Boundary Conditions for Integrated LES/RANS Simulations : LES Inflow Conditions“, Annual Research Briefs, Center for Turbulence Research, pp. 143 - 154, 2002,



# **ANNEXES**

## ANNEXE 1:

Laboratoire Algérien de Métrologie, Essai et Mesure  
Etalonnage et vérification des appareils de mesure  
Mohammadia - Algérie



المختبر الجزائري للميتروولوجيا، التجاريد و القيس  
معايرة و فحص اجهزة القيس  
المعمودية - الجزائر

**LAMEM**

### CERTIFICAT D'ETALONNAGE CALIBRATION CERTIFICATE N°: CE-036/040-20

DELIVRER A : **ELSEWEDY ELECTRIC**  
DELIVERED TO : ZONE INDUSTRIELLE D'AIN DEFLA,  
WILAYA D'AIN DEFLA  
ALGERIE

#### INSTRUMENT ETALONNEE CALIBRATED INSTRUMENT#0

**DESIGNATION** : Balance électronique 15 kg  
*DESIGNATION*

**EMPLACEMENT** : LABORATOIRE  
*LOCALISATION*

**CONSTRUCTEUR** : KERN  
*MANUFACTURER*

**TYPE / MODELE** : 572-49  
*TYPE*

**N° DE SERIE** : W061555  
*SERIAL NUMBER*

**N° ID** : QL 06  
*IDENTIFICATION*

Ce certificat d'étalonnage comprend 4 pages  
*THIS CALIBRATION CERTIFICATE INCLUDES 4 PAGES*

**DATE D'EMISSION:** 25 Novembre 2020  
*DATE OF ISSUE*

*La reproduction de ce certificat n'est autorisée que sous forme de FAC-SIMILE photographique intégral  
This certificate may not be reproduced other than in full by photographic process*

LE DIRECTEUR GENERAL  
THE GENERAL MANAGER



**SARL LAMEM** -- 09, Rue FERRAOUI Abdellah, LES PINS MARITIMES, MOHAMMIDIA 1058, ALGER - ALGERIE  
RC N° : 16/00 0990177B14 NIF : 001416099017797 AI : 16293634028  
RIB N° : 026 05301 0002749 500 43 - ARAB BANK - Place El Qods - Hydra - Alger - Algérie  
Mobile : 0560407255 - 0560406810 - 0560406880 - 0560407341 Fax : 0982401907  
Email : contact@sarl-lamem.com / sarl.lamem@gmail.com  
Site Web : www.sarl-lamem.com

## ANNEXE 1 :

CERTIFICAT D'ETALONNAGE N° : CE-036/040-20  
CALIBRATION CERTIFICATE

Page 2 sur 4  
PAGE 2 of 4

### 1. CONDITIONS D'ETALONNAGE – CALIBRATION CONDITIONS

ÉTALONNAGE RÉALISÉ PAR : RIAHI Hedi  
*CALIBRATION PERFORMED BY*  
DATE D'ETALONNAGE : 16 Novembre 2020  
*CALIBRATION DATE*  
DATE DE PROCHAINE ETALONNAGE : 15 Novembre 2021  
*DUE CALIBRATION*  
LIEU D'ETALONNAGE : SUR SITE CLIENT  
*CALIBRATION AERA*  
TEMPERATURE AMBIANTE : 20,0 °C  
*AMBIENT TEMPERATURE*  
HUMIDITE AMBIANTE : 53,3 %HR  
*AMBIENT HUMIDITY*

### 2. ETALONS UTILISES – CALIBRATIONS STANDARDS

N° IDENTIFICATION <i>IDENTIFICATION</i>	DESIGNATION <i>DESCRIPTION</i>	N° CERTIFICAT D'ÉTALONNAGE <i>CALIBRATION CERTIFICATE</i>	DATE DE RE- ÉTALONNAGE <i>CALIBRATION DUE DATE</i>
ET-T-PE-03	Coffret de masse, FUYUE, Type 1 mg à 500 g, Classe E2	MA-2019-12-012 MA-2019-12-011	23.12.2020
ET-T-PE-04	Masse étalon 5 kg	MA-2019-12-008	23.12.2020
ET-T-PE-05	Masse étalon 10 kg	MA-2019-12-009	23.12.2020
ET-T-PE-06	Masse étalon 20 kg	MA-2019-12-010	23.12.2020

Remarque : Les étalons utilisés sont raccordés à la chaîne internationale

### 3. DOCUMENTS DE REFERENCE – REFERENTIEL DOCUMENTS

- Norme d'étalonnage : FD X 07-017-2 / Guide technique COFRAC : LAB-GTA-95
- Procédure d'étalonnage : DT-PR-001-00 : « Etalonnage des balances électroniques et mécanique à fonctionnement non automatique »

### 4. INSTRUMENT DE MESURE A ETALONNER – INSTRUMENT TO CALIBRATE

- Plage de mesure : Max 15 kg
- Résolution (d) : 0,1 g
- Echelon € : 1
- Classe : II
- Type de plateau : Rectangulaire
- Type d'affichage : Digital

### 5. INCERTITUDE D'ETALONNAGE – CALIBRATION UNCERTAINTIES

Les incertitudes élargies mentionnées sont celles correspondant à deux fois l'incertitude type composée. Les incertitudes types ont été calculées en tenant compte des différentes composantes d'incertitudes, étalons de référence, moyens d'étalonnage, conditions d'environnement, contribution de l'instrument étalonné, répétabilité...



## ANNEXE 1:

### 6. METHODE D'ETALONNAGE – CALIBRATION METHOD

La méthode d'étalonnage est comparaison directe entre les valeurs nominales des masses étalons utilisés par rapport à l'indication de l'instrument à étalonner. En effet, l'étalonnage se devise en 3 parties :

✓ *Partie N° 01 : Essai de fidélité*

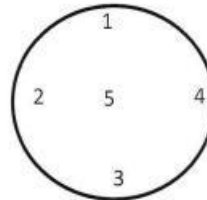
Pour une masse à Pmax, une série de 5 mesures consécutives seront effectuées dans les mêmes conditions d'étalonnage

✓ *Partie N° 02 : Essai de justesse*

Pour une série des masses réparties sur la totalité de la portée maximale de l'instrument à étalonner, l'erreur de justesse (indication) sera calculée par la différence algébrique entre les indications de l'instrument à étalonner et les indications de l'instrument étalons.

✓ *Partie N° 03 : Essai d'excentration*

Pour une masse égale à 1/2 de la portée maximale, une série de mesure sera effectuée dans les emplacements décrite sur la figure ci-dessous selon la forme de la balance, l'erreur d'excentration sera calculée par la différence algébrique entre les indications de l'instrument à étalonner et les indications de l'instrument étalons.



### 7. RESULTAT D'ETALONNAGE – CALIBRATION RESULT

L'unité de mesure est : g

- *Etape 1* : Essai de fidélité / répétabilité

Charge	N° de Pesée	Charge L (Valeur réelle)	Indication de l'instrument à étalonner	Erreur de fidélité	EMT
Essai effectué en Pmax	1	15 000	15 000,0	0,0	± 15 g
	2		14 999,8	-0,2	
	3		14 999,8	-0,2	
	4		14 999,8	-0,2	
	5		14 999,8	-0,2	

## ANNEXE 1:

CERTIFICAT D'ETALONNAGE N° : CE-036/040-20  
 CALIBRATION CERTIFICATE

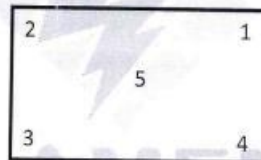
Page 4 sur 4  
 PAGE 4 of 4

- **Etape 2** : Essai de Justesse (Erreur d'indication)

N° de Pesée	Charge L (Valeur réelle)	Indication de l'instrument à étalonner	Erreur de justesse	Incertitude d'étalonnage	EMT
1	500	500,0	0,0	± 8,1 mg	± 15 g
2	1 000	1 000,0	0,0	± 13,0 mg	
3	5 000	5 000,0	0,0	± 18,3 mg	
4	10 000	9 999,7	-0,3	± 18,3 mg	
5	15 000	14 999,7	-0,3	± 18,3 mg	

- **Etape 3** : Essai d'excentration

Position	Charge L (Valeur réelle)	Indication de l'instrument à étalonner	Erreur de justesse	Incertitude d'étalonnage	EMT
1	7 500	7 499,9	-0,1	± 18,3 mg	± 15 g
2		7 499,7	-0,3		
3		7 499,7	-0,3		
4		7 499,9	-0,1		
5		7 499,9	-0,1		



### 8. DECISION DE CONFORMITE - CONFORMITY JUDGEMENT

Portée maximale (Pmax)	Résolution (d)	Echelon (e)	Nombre d'échelon N = Pmax/e	Classe	EMT	Erreur maximale enregistré *	Décision de conformité
15 kg	0,1 g	1 g	15 000	II	± 15 g	0,350 g	Conforme

\* L'erreur enregistré est calculé en tenant compte de l'incertitude maximale toléré

--FIN DU CERTIFICAT D'ETALONNAGE--  
 END OF THE CALIBRATION CERTIFICATE

**ANNEXE 2 :**

Laboratoire Algérien de Métrologie, Essai et Mesure  
Etalonnage et vérification des appareils de mesure  
Mohammadia - Algérie



المحبر الجزائري للميتروولوجيا، التجاريج و القيس  
معايرة و فحص اجيزة القيس  
المعمدية - الجزائر

**LAMEM**

**CERTIFICAT D'ETALONNAGE**  
CALIBRATION CERTIFICATE  
N°: CE-053/040-20

**DELIVRER A :** ELSEWEDY ELECTRIC  
*DELIVERED TO* ZONE INDUSTRIELLE D'AIN DEFLA,  
WILAYA D'AIN DEFLA  
ALGERIE

**INSTRUMENT ETALONNEE**  
*CALIBRATED INSTRUMENT*

**DESIGNATION** : Thermomètre infrarouge  
*DESIGNATION*

**EMPLACEMENT** : LABORATOIRE ELECTRIQUE  
*LOCALISATION*

**CONSTRUCTEUR** : FLUKE **TYPE / MODELE** : 568 IR  
*MANUFACTURER* *TYP*

**N° DE SERIE** : 40430209WS **N° ID** : MT 24  
*SERIAL NUMBER* *IDENTIFICATION*

Ce certificat d'étalonnage comprend 3 pages  
*THIS CALIBRATION CERTIFICATE INCLUDES 3 PAGES*

**DATE D'EMISSION:** 25 Novembre 2020  
*DATE OF ISSUE*

*La reproduction de ce certificat n'est autorisée que sous forme de FAC-SIMILE photographique intégral  
This certificate may not be reproduced other than in full by photographic process*

**LE DIRECTEUR GENERAL**



**SARI LAMEM** - 09, Rue FERRAOUI Abdellah, LES PINS MARITIMES, MOHAMMADIA 1058, ALGER - ALGERIE  
RC N° : 16/00 0990177B14 NIF : 001416099017797 AI : 16293634028  
RIB N° : 026 05301 0002749 500 43 - ARAB BANK - Place El Qods - Hydra - Alger - Algérie  
Mobile : 0560407255 - 0560406810 - 0560406880 - 0560407341 Fax : 0982401907  
Email : contact@sari-lamem.com / sari.lamem@gmail.com  
Site Web : www.sari-lamem.com

## ANNEXE 2 :

CERTIFICAT D'ÉTALONNAGE N° : CE-053/040-20  
CALIBRATION CERTIFICATE

### 1. CONDITIONS D'ÉTALONNAGE – CALIBRATION CONDITIONS

ÉTALONNAGE RÉALISÉ PAR : RIAHI Hedi  
*CALIBRATION PERFORMED BY*

DATE D'ÉTALONNAGE : 16 Novembre 2020  
*CALIBRATION DATE*

DATE DE PROCHAINE ÉTALONNAGE : 15 Novembre 2021  
*DUE CALIBRATION*

LIEU D'ÉTALONNAGE : LABORTOIRE SARL LAMEM  
*CALIBRATION AREA*

TEMPÉRATURE AMBIANTE : 20,8 °C  
*AMBIENT TEMPERATURE*

HUMIDITE AMBIANTE : 52,4 %HR  
*AMBIENT HUMIDITY*

### 2. ÉTALONS UTILISÉS – CALIBRATION STANDARDS

N° IDENTIFICATION <i>IDENTIFICATION</i>	DESIGNATION <i>DESCRIPTION</i>	N° CERTIFICAT D'ÉTALONNAGE <i>CALIBRATION CERTIFICATE</i>	DATE DE RE- ÉTALONNAGE <i>CALIBRATION DUE DATE</i>
ET-T-T-02	Chaîne de température, Constructeur : PCE- INSTRUMENTS, Type PCE-T1200, N°S : H322661	T/03/LM01A01 001/2020	01.01.2021
ET-T-T-03	Four vertical, Constructeur: FLUKE, Type: 9144, N°S : B53870	R/01/LM01A01001/2020	01.01.2021

Remarque : Les étalons utilisés sont raccordés à la chaîne internationale

### 3. DOCUMENTS DE REFERENCE – REFERENTIEL DOCUMENTS

- Norme d'étalonnage : FD X07-028
- Procédure d'étalonnage : DT-T-001- 000 : Etalonnage des thermomètres et sondes de température

### 4. INSTRUMENT DE MESURE A ETALONNER – INSTRUMENT TO CALIBRATE

- Plage de mesure : -40 à 800 °C
- Résolution : 0,1 °C

### 5. INCERTITUDE D'ÉTALONNAGE – CALIBRATION UNCERTAINTIES

Les incertitudes élargies mentionnées sont celles correspondant à deux fois l'incertitude type composée. Les incertitudes types ont été calculées en tenant compte des différentes composantes d'incertitudes, étalons de référence, moyens d'étalonnage, conditions d'environnement, contribution de l'instrument étalonné, répétabilité...

SARL LAMEM  
DOCUMENT ORIGINAL

## ANNEXE 2 :

CERTIFICAT D'ETALONNAGE N° : CE-053/040-20  
CALIBRATION CERTIFICATE

### 6. METHODE D'ETALONNAGE – CALIBRATION METHOD

La méthode d'étalonnage est la détermination de l'erreur d'indication qui est la différence algébrique entre les indications de l'instrument à étalonner ( $P_i$ ) et les indications de l'instrument étalon utilisés ( $P_e$ ).

$$E_i = (P_i - P_e)$$

### 7. RESULTAT D'ETALONNAGE – CALIBRATION RESULT

L'unité de mesure est : °C

Points à vérifier <i>CHECK POINT</i>	Indication de l'instrument à étalonner <i>INSUTRUMENT TO CALIBRATE READ (P<sub>i</sub>)</i>	Indication de l'instrument étalon <i>STANDARD READ (P<sub>e</sub>)</i>	Erreur d'indication <i>DEVIATION (E<sub>i</sub>)</i>	Incertitude d'étalonnage <i>CALIBRATION UNCERTAINTIES</i>
1	49,8	50,00	-0,2	± 0,63
2	249,5	250,00	-0,5	
3	449,4	450,00	-0,6	

--FIN DU CERTIFICAT D'ETALONNAGE--  
END OF THE CALIBRATION CERTIFICATE



LAMEM

SARL LAMEM  
DOCUMENT ORIGINAL