

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

# **Etude Comparative et Réalisation d'un Chalumeau utilisant l'Hydrogène comme Combustible**

**Walid MAMERI**

**et**

**Youcef TIAIBA**

**Présenté et soutenu publiquement le 04 Juillet 2017**

**Composition du Jury :**

Président	Brahim GUERGUEB	Maître Assitant- A	ENP Alger
Promoteur	Salah LARBI	Professeur	ENP Alger
Co- Promoteur	Wahiba BENDAIKHA	Maître de Recherche-A	CDER
Examineur	Mohamed BOUBAKEUR	Maître Assitant- A	ENP Alger

2017

Ecole Nationale Polytechnique, Alger.



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

# **Etude Comparative et Réalisation d'un Chalumeau utilisant l'Hydrogène comme Combustible**

**Walid MAMERI**

**et**

**Youcef TIAIBA**

**Présenté et soutenu publiquement le 04 Juillet 2017**

**Composition du Jury :**

Président	Brahim GUERGUEB	Maître Assitant- A	ENP Alger
Promoteur	Salah LARBI	Professeur	ENP Alger
Co- Promoteur	Wahiba BENDAIKHA	Maître de Recherche-A	CDER
Examineur	Mohamed BOUBAKEUR	Maître Assitant- A	ENP Alger

2017

Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

## المخلص:

العمل المقدم في هذه مذكرة نهاية الدراسة يتعلق بتصميم و تحقيق شعلة عن طريق انبوب نفخ مستعملا الهيدروجين كوقود. اجرينا تجسيد لانظام بعد دراسة مقارنة بين أنواع مختلفة من خلايا إنتاج الهيدروجين. حيث صنعت خليتين HHO : "خلية جافة" و "خلية الرطب" ثم نفذ عليهما اختبارات الأداء. لهذا الغرض، أنشئ حساب التحجيم الكهروكيميائية للتوصل إلى إنتاج من الغاز يساوي 2.5 لتر / دقيقة. الجزء الثاني من العمل يتألف من دراسة بارامترية عن احتراق الخليط المكون من غاز الهيدروجين وغاز الأكسجين كذلك عن الشعلة الناتجة من انبوب النفخ الذي يمثل موضوع دراستنا. وتتم هذه الدراسة بالاستناد أساسا على حساب CFD باستخدام برنامج محاكاة " ANSYS fluent " من خلال تحليل تأثير التغير في معدل التدفق الكتلي لخليط الهيدروجين والأكسجين وحجم فوهة، وانتشار طول الشعلة.

**كلمات البحث:** تجربة الشعلة. المحاكاة العددية. الاحتراق. الهيدروجين.

---

## Abstract :

*The present work is devoted to the design and realization of an experimental device. The device is consisted on a torch using hydrogen gas as a fuel. After a comparative study between two types of hydrogen production cells, the realization of the system was carried out. Two HHO cells were made, a "dry cell" and a "wet cell" and efficiency tests of each of them were performed. Furthermore, an electrochemical sizing calculation has been established to achieve a gas production equal to 2.5 liters / min. The second part of the work consists in a parametric study of oxyhydrogen combustion of the torch based essentially on a CFD calculation and using "Ansys Fluent" simulation software. The influence of mass flow rate of hydrogen-oxygen gas mixture and the nozzle size on the propagation of combustion plume is also analyzed in this study.*

**Keywords:** Experiment; Torch; Numerical simulation; Combustion; Hydrogen.

---

## Résumé :

*Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à la conception et à la réalisation d'un chalumeau utilisant l'hydrogène comme combustible. Après une étude comparative entre les différents types de cellules de production d'hydrogène, la réalisation du système a été effectuée. Deux cellules HHO ont été réalisées : une « cellule sèche » et une « cellule humide ». Des tests de performances sur chacune des cellules ont été effectués. A cet effet, un calcul de dimensionnement électrochimique a été établi afin d'atteindre une production de gaz égale à 2.5 litres/min. La seconde partie du travail a consisté en une étude paramétrique sur la combustion oxyhydrique du chalumeau, objet de l'étude. Cette dernière est basée essentiellement sur un calcul CFD en utilisant le logiciel de simulation « Ansys Fluent », à travers l'analyse de l'influence de la variation du débit massique du mélange hydrogène-oxygène et la taille de la buse, sur la propagation du panache.*

**Mots clés :** Expérimentation ; Chalumeau ; Simulation numérique ; Combustion ; Hydrogène.

# **Remerciements**

*En préambule à ce mémoire, nous remercions ALLAH, le dieu tout puissant et miséricordieux, de nous avoir donné le courage, la force, la patience et la santé pour accomplir ce modeste travail.*

*La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur, Mr Salah LARBI, Professeur à l'ENP, pour ses orientations, sa patience, sa confiance et sa disponibilité. Ses précieux conseils, son savoir-faire et sa modestie ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bien. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

*Nous tenons à remercier, en second lieu, Dr.Ouahiba BENDAIKHA, chercheuse au CDER, notre co-promotrice.*

*Nos remerciements s'étendent aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail et de l'enrichir par leurs propositions ainsi que l'intérêt qu'ils ont porté à la thématique du projet: Messieurs Brahim GUERGUEB et Mohamed BOUBAKEUR, tous deux Maîtres assistants-A, à l'Ecole Nationale Polytechnique.*

*Un merci tout particulier à Mr Nabil MAMERI, Professeur au Département de Génie de l'Environnement, pour son aide très précieuse à l'aspect chimique de l'étude, qui a eu l'amabilité de répondre à nos questions et nous fournir les explications nécessaires et impérieuses à l'aboutissement de ce travail.*

*Nos sincères remerciements vont à tous les enseignants qui nous ont soutenus durant nos études, en particulier ceux du département de génie mécanique.*

*Nous finirons par une pensée à toute personne, ayant contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

---

## *DEDICACE*

---

*« A nos familles et à tous nos amis qui nous ont soutenus  
tout au long de ce périple. »*

*Walid & Youcef*

# Table des matières

Liste des tableaux.

Liste des figures.

Nomenclature.

**Introduction générale .....14**

**CHAPITRE I: Généralités sur les chalumeaux oxhydriques et oxyacétylénique....17**

I.1. Introduction : ..... 17

I.2. Description d'un chalumeau : ..... 17

I.3. Comparaison des performances d'un chalumeau à hydrogène avec les  
chalumeaux classiques : ..... 19

I.4. Avantages et inconvénients des chalumeaux à hydrogène et chalumeau  
classiques : ..... 20

I.5. Conclusion : ..... 21

**CHAPITRE II: Etat de l'art sur la combustion de l'hydrogène.....23**

II.1. Introduction : ..... 23

II.2. Historique : ..... 23

II.2.1. Chalumeau oxhydrique : ..... 23

II.2.2. Chalumeau oxyacétylénique : ..... 24

II.3. Combustion de l'hydrogène : ..... 25

II.4. Flamme de l'hydrogène : ..... 26

II. 4.1. Classification des flammes : ..... 27

II. 4.2. Structure d'une flamme laminaire : ..... 28

II. 4.3. Interprétation physique d'une flamme pré-mélangée : ..... 30

II.4.4. Etirement d'une flamme et nombre de MARKSTEIN : ..... 32

II.5. Mesure de la vitesse de flamme de l'hydrogène : ..... 34

II.6. Coupage à hydrogène : ..... 36

**CHAPITRE III: Descriptif du dispositif expérimental .....39**

III.1. Introduction : ..... 39

III.2. Description et fonctionnement du chalumeau à hydrogène: ..... 39

III.2.1. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau : ..... 39

III.2.2. Types de générateurs : ..... 40

III.2.3. Mode opératoire du dispositif à cellule immergée : ..... 42

III.2.4. Mode opératoire du dispositif à cellule non immergée :.....	42
III.3. Processus de fabrication :.....	43
III.3.1. Processus de fabrication du modèle immergé :.....	43
III.3.2. Processus de fabrication du modèle non immergé :.....	50
III.4. Comparaison et choix de la cellule à utiliser : .....	54
<b>CHAPITRE IV: Combustion Hydrogène- Oxygène.....</b>	<b>59</b>
IV.1. Introduction.....	59
IV.2. Combustion et nature des flammes : .....	59
IV.2. 1. Echelles caractéristiques d'une flamme :.....	61
IV.3. Combustion laminaire :.....	62
IV.3.1. Flamme laminaire prémélangée :.....	62
IV.4. Combustion turbulente :.....	64
IV.4. 1. Combustion turbulente prémélangée :.....	64
IV.5. Variables d'avancement de la réaction :.....	68
IV.6. Combustion de l'hydrogène : .....	69
IV. 6.1. Choix des variables primitives : .....	69
IV.6.2. Approximation de la combustion par une seule réaction globale :.....	70
IV.6.3. Schéma réactionnel : .....	70
IV.6.4. Taux de réaction et mécanisme réactionnel de combustion :.....	72
IV.6.5. Mécanismes réactionnels et taux de réaction :.....	72
IV.6.6. Formulation générale pour le calcul du taux de réaction :.....	73
IV.6.7. Domaine d'inflammabilité pratique : .....	75
IV.7. Conclusion :.....	76
<b>CHAPITRE V: Résultats et discussions.....</b>	<b>78</b>
V.1. Introduction : .....	78
V.2. Aspect expérimental de l'étude :.....	78
V.2.1. Eléments de dimensionnement des plaques de la cellule:.....	78
V.2.1.2.3. Détermination du rendement faradique de la cellule: .....	83
V.2. 2. Essais expérimentaux :.....	84
V.2.2.1.Influence de la concentration massique sur la conductance : .....	84
V.2.2.2. Mesure de pressions :.....	87
V.3. Aspect simulation numérique de la flamme : .....	89
V.3.1. Position du problème et maillage : .....	89

<i>V.3.2. Simulation pour une buse, de 1mm, de diamètre: .....</i>	<i>90</i>
<i>V.3.3. Simulation pour une buse, de 0.7 mm, de diamètre: .....</i>	<i>94</i>
<i>V.3.4. Simulation pour une buse de, 0.4 mm, de diamètre: .....</i>	<i>98</i>
<i>V.4. Comparaison de résultats : .....</i>	<i>102</i>
<i>V.5. Etude économique.....</i>	<i>103</i>
<i>V.5.1. Coût du chalumeau : .....</i>	<i>103</i>
<i>V.5.2. Comparaison avec un chalumeau oxyhydrique sur le marché : .....</i>	<i>104</i>
<i>V.5.3. Comparaison avec un chalumeau oxyacétylénique : .....</i>	<i>105</i>
<b>Conclusion</b> .....	<b>107</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>110</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>115</b>

# **LISTE DES TABLEAUX**

<i>TABLEAU I-1 : RECAPITULATIF DES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES CHALUMEAUX OXHYDRIQUES ET CLASSIQUES. ....</i>	<i>20</i>
<i>TABLEAU II-1 : SCHEMA REACTIONNEL DU MELANGE H2-O2 [13]. ....</i>	<i>26</i>
<i>TABLEAU II-2 : VALEURS DE, LM, POUR DIFFERENTS POURCENTAGES D'HYDROGENE.....</i>	<i>34</i>
<i>TABLEAU II-3 : VITESSE DE FLAMME DU MELANGE H2-AIR. ....</i>	<i>35</i>
<i>TABLEAU IV-1: ECHELLES TEMPORELLES ET SPATIALES.....</i>	<i>66</i>
<i>TABLEAU IV-2: SCHEMA DE REACTIONS CHIMIQUES AVEC VALEURS DES COEFFICIENTS....</i>	<i>72</i>
<i>TABLEAU IV-3: ATTRIBUTION DES INDICES AUX REACTIFS .....</i>	<i>74</i>
<i>TABLEAU V-1: VALEURS DE LA MESURE DE L'INTENSITE DE COURANT ENTRE DEUX ELECTRODES.....</i>	<i>84</i>
<i>TABLEAU V-2: VALEURS DE LA CONDUCTANCE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION MASSIQUE.....</i>	<i>85</i>
<i>TABLEAU V-3: VALEURS DE LA CONDUCTANCE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION MASSIQUE.....</i>	<i>86</i>
<i>TABLEAU V-4: VALEURS DES VITESSES DE FLAMMES ET DES TEMPERATURES EN FONCTION DU DEBIT VOLUMIQUE POUR UNE BUSE DE DIAMETRE 1MM. ....</i>	<i>90</i>
<i>TABLEAU V-5: VALEURS DES VITESSES DE FLAMMES ET DES TEMPERATURES EN FONCTION DU DEBIT VOLUMIQUE POUR UNE BUSE DE DIAMETRE 0,7MM. ....</i>	<i>94</i>
<i>TABLEAU V-6: VALEURS DES VITESSES DE FLAMMES ET DES TEMPERATURES EN FONCTION DU DEBIT VOLUMIQUE POUR UNE BUSE DE DIAMETRE 0,4 MM.....</i>	<i>98</i>
<i>TABLEAU V-7: PRIX DES DIFFERENTS COMPOSANTS EN DINARS ALGERIENS.....</i>	<i>103</i>
<i>TABLEAU V-8: COUT ENERGETIQUE DU CHALUMEAU A HYDROGENE. ....</i>	<i>104</i>
<i>TABLEAU V-9: COUT ENERGETIQUE DU CHALUMEAU ACETYLENIQUE [57], [58], [59]... </i>	<i>105</i>

# LISTE DES FIGURES

FIGURE I.1 : SCHEMA DESCRIPTIF D'UN CHALUMEAU. -----	17
FIGURE I.2 : PHOTO DU DISPOSITIF SYSTEME CHALUMEAU : (A). CLASSIQUE, (B). A HYDROGENE. -----	18
FIGURE II.1 : TYPES DE FLAMME : (A) PRE-MELANGEE, (B) NON PRE-MELANGEE [15]. -----	27
FIGURE II.2 : DIFFERENTS REGIMES DE FLAMMES ET APPLICATIONS [17].-----	28
FIGURE II.3: STRUCTURE SPATIALE D'UNE FLAMME PRE-MELANGEE STABILISEE DANS UN ECOULEMENT DE VITESSE EGALE ET OPPOSE A LA VITESSE DE FLAMME $u_L$ [20]. -----	29
FIGURE II.4: STRUCTURE D'UNE FLAMME LAMINAIRE PRE-MELANGEE [22]. -----	30
FIGURE II.5 : CHANGEMENT DE VITESSE DE FLAMME EN FONCTION DU NOMBRE DE KARLOVITZ POUR UN MELANGE $H_2$ + AIR A TEMPERATURE AMBIANTE ET PRESSION DE 0,1 MPA [27]. -----	33
FIGURE II. :II.6 RESULTATS EXPERIMENTAUX RELATIFS AU NOMBRE DE MARKSTEIN POUR UNE FLAMME ( $H_2$ + AIR) A TEMPERATURE AMBIANTE ET PRESSION ATMOSPHERIQUE [28].-----	34
FIGURE II.7 : VITESSES DE LA FLAMME LAMINAIRE DANS LES MELANGES ( $H_2$ + $O_2$ ) A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE ET LA TEMPERATURE DE 298 K. -----	36
FIGURE II.8 : EVOLUTION DE L'ECART DE TEMPERATURE ENTRE CHALUMEAUX AU COURS DU TEMPS. -----	37
FIGURE II.9 : COMPARAISON DE LA ZONE AFFECTEE PAR CHALEUR DE DEUX PIECES LORS D'UN DECOUPAGE. -----	37
FIGURE III.1 : SCHEMA DE LA DISPOSITION DES PLAQUES. -----	40
FIGURE III.2 : SCHEMA DE LA DISPOSITION DES PLAQUES AVEC PLAQUES NEUTRES.-----	40
FIGURE III.3: WETCELL. <span style="float: right;">FIGURE III.4 : DRY CELL. -----</span>	41
FIGURE III.5 PHOTO DU DISPOSITIF A CELLULE IMMERGEE ASSEMBLE.-----	42
FIGURE III.6 PHOTO DU DISPOSITIF A CELLULE NON IMMERGEE ASSEMBLE.-----	43
FIGURE III.7: PHOTO MONTRANT LES PLAQUES D'UNE CELLULE DEMONTEE. -----	44
FIGURE III.8: PHOTO DE PERÇAGE DES PLAQUES.-----	44
FIGURE III.9: PHOTO DE L'AGENCEMENT DES PLAQUES. -----	45
FIGURE III.10: PHOTO DU POSITIONNEMENT DES JOINTS D'ETANCHEITE. -----	45
FIGURE III.11: PHOTO DE L'ISOLATION DES CABLES ELECTRIQUE. -----	46
FIGURE III.12: PHOTO DU TRAÇAGE DE LA PLAQUE DE PLEXIGLAS. -----	46
FIGURE III.13: PHOTO MONTRANT L'APPLICATION DU CHLOROFORME A LA CELLULE.-----	47
FIGURE III.14: PHOTO MONTRANT L'ASSEMBLAGE A VIS. -----	47
FIGURE III.15: PHOTO MONTRANT LE ROBINET DE REMPLISSAGE ET DE VIDANGE. -----	48
FIGURE III.16: PHOTO MONTRANT LE COUVERCLE DU RECIPIENT. -----	48
FIGURE III.17: PHOTO DU BOUCHON DE BULLER.-----	49
FIGURE III.18: PHOTO DU CLAPET ANTI-RETOUR DE FLAMME. -----	50
FIGURE III.19: PHOTO DU CHALUMEAU. -----	50
FIGURE III.20: PHOTO D'UNE PLAQUE CONNECTEE.FIGUREIII.21: PHOTO D'UNE PLAQUE NEUTRE. -----	51
FIGURE III.22: PHOTO DE LA FACE AVANT DE LA DRY CELL (ENTREE D'EAU).-----	52
FIGURE III.23: PHOTO DE LA FACE ARRIERE DE LA DRY CELL (SORTIE DES GAZ).-----	52
FIGURE III.24: PHOTO DE LA DRY CELL ASSEMBLEE. -----	53
FIGURE III.25: PHOTO DU RESERVOIR. -----	54
FIGURE III.26: PHOTO DU 3EME TROU DU RESERVOIR. -----	54
FIGURE III.27: SCHEMA DU 1ER MONTAGE.-----	55

FIGURE III.28: SCHEMA DU 2EME MONTAGE. -----	56
FIGURE III.29: SCHEMA DU 3EME MONTAGE. -----	56
FIGURE IV.1: FLAMME PREMELANGEE. -----	
FIGURE IV.2 : FLAMME NON-PREMELANGEE. -----	60
FIGURE IV.3: SCHEMA DE LA STRUCTURE D'UNE FLAMME LAMINAIRE DE PREMELANGE BIDIMENSIONNELLE (GAUCHE) ET D'UNE FLAMME DE DIFFUSION (DROITE) [REF??]. -----	60
FIGURE IV.4: STRUCTURE INTERNE D'UNE FLAMME LAMINAIRE STATIONNAIRE DE METHANE-AIR [40]. ----	61
FIGURE IV.5: PROFIL D'UNE FLAMME LAMINAIRE NON PREMELANGEE. -----	63
FIGURE IV.6: DIAGRAMME DE REGIMES DE LA COMBUSTION. -----	65
FIGURE IV.7: REGIME 1 DE COMBUSTION TURBULENTE. -----	66
FIGURE IV.8: REGIME 2 DE COMBUSTION. -----	67
FIGURE IV.9: REGIME 3 DE COMBUSTION. -----	67
FIGURE IV.10: REGIME 4 DE COMBUSTION. -----	68
FIGURE IV.11: SCHEMA DEFINISSANT LA VARIABLE D'AVANCEMENT. -----	68
FIGURE IV.12: DOMAINE D'INFLAMMATION, OU D'EXPLOSION D'UN MELANGE STECHIOMETRIQUE HYDROGENE-OXYGENE. -----	75
FIGURE V.1: EVOLUTION DE L'INTENSITE DE COURANT EN FONCTION DU DEBIT VOLUMIQUE. -----	80
FIGURE V.2: EVOLUTION DU NOMBRE D'ELECTRODES NECESSAIRES -----	82
FIGURE V.3: EVOLUTION DE LA DISTANCE $\Delta x$ REEL ET THEORIQUE -----	82
FIGURE V.4: L'INTENSITE DE COURANT ENTRE CHAQUE ELECTRODE EN FONCTION DE $\Delta x$ . -----	83
FIGURE V.5: CONDUCTANCE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION MASSIQUE -----	85
FIGURE V.6: CONDUCTANCE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION MASSIQUE DE L'HYDROXYDE DE SODIUM. -----	86
FIGURE V.7: CONDUCTANCE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION MASSIQUE DU SOLUTE. -----	87
FIGURE V.8: PHOTO MONTRANT LES POSITIONS DE MESURE DE PRESSIONS. -----	87
FIGURE V.9: HISTOGRAMME DES PRESSIONS. -----	88
FIGURE V.10: PHOTOS DE LA FLAMME PRODUITE PAR LE CHALUMEAU CONÇU. -----	88
FIGURE V.11: GEOMETRIE DU SYSTEME. -----	89
FIGURE V.12: MAILLAGE DU SYSTEME. -----	89
FIGURE V.13: EVOLUTION DE LA VITESSE DE FLAMME EN FONCTION DU DEBIT VOLUMIQUE -----	90
FIGURE V.14: EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU DEBIT VOLUMIQUE -----	91
FIGURE V.15: PROFIL DE TEMPERATURE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 2.5 L/MIN ET UNE BUSE DE 1 MM DE DIAMETRE -----	92
FIGURE V.16: PROFIL DE VITESSE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 2.5 L/MIN ET UNE BUSE DE 1MM DE DIAMETRE. -----	92
FIGURE V.17: PROFIL DE TEMPERATURE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 1.9 L/MIN ET UNE BUSE DE 1MM DE DIAMETRE. -----	93
FIGURE V.18: PROFIL DE VITESSE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 1.9 L/MIN ET UNE BUSE DE 1MM DE DIAMETRE. -----	93
FIGURE V.19: EVOLUTION DE LA VITESSE DE FLAMME EN FONCTION DU DEBIT POUR UNE BUSE DE DIAMETRE 0,7MM. -----	94
FIGURE V.20: EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU DEBIT POUR UNE BUSE DE DIAMETRE 0,7MM. -----	95
FIGURE V.21: PROFIL DE TEMPERATURE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 2.5 L/MIN ET UNE BUSE DE 0,7MM DE DIAMETRE. -----	96

<i>FIGURE V.22: PROFIL DE VITESSE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 2.5 L/MIN ET UNE BUSE DE 0,7MM DE DIAMETRE.</i>	96
<i>FIGURE V.23: PROFIL DE TEMPERATURE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 1.9 L/MIN ET UNE BUSE DE 0,7MM DE DIAMETRE.</i>	97
<i>FIGURE V.24: PROFIL DE VITESSE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 1.9 L/MIN ET UNE BUSE DE 0,7MM DE DIAMETRE.</i>	97
<i>FIGURE V.25: EVOLUTION DE LA VITESSE DE FLAMME EN FONCTION DU DEBIT POUR UNE BUSE DE DIAMETRE 0,4MM.</i>	98
<i>FIGURE V.26: EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU DEBIT POUR UNE BUSE DE DIAMETRE 0,4MM.</i>	99
<i>FIGURE V.27: PROFIL DE TEMPERATURE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 2.5 L/MIN ET UNE BUSE DE 0,4MM DE DIAMETRE.</i>	100
<i>FIGURE V.28: PROFIL DE VITESSE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 2.5 L/MIN ET UNE BUSE DE 0,4MM DE DIAMETRE.</i>	100
<i>FIGURE V.29: PROFIL DE TEMPERATURE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 1.9 L/MIN ET UNE BUSE DE 0,4MM DE DIAMETRE.</i>	101
<i>FIGURE V.30: PROFIL DE VITESSE DE LA FLAMME POUR UN DEBIT DE 1.9 L/MIN ET UNE BUSE DE 0,4MM DE DIAMETRE.</i>	101
<i>FIGURE V.31: EVOLUTION DE LA VITESSE DE LA FLAMME EN FONCTION DU DEBIT POUR 3 DIAMETRES DE BUSES.</i>	102
<b><i>FIGURE V.32: EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE LA FLAMME EN FONCTION DU DEBIT POUR 3 DIAMETRES DE BUSES.</i></b>	<b>102</b>
<i>FIGURE V.33: PROFILS DU PANACHE THERMIQUE DES FLAMMES POUR UN DEBIT DE 1.9 L/MIN POUR DES BUSES DE DIAMETRES : 1MM, 0.7MM ET 0.4MM RESPECTIVEMENT A PARTIR DU HAUT.</i>	103

## *Nomenclature*

T	Température	$^{\circ}\text{K}$
V	Volume	$\text{m}^3$
P	Pression	Pa
$\bar{R}$	Constante des gaz parfaits	$\text{J. K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
$\rho$	Masse volumique	$\text{Kg}.\text{m}^{-3}$
n	Quantité de matière	mole
I	Intensité de courant total	A
i	Intensité de courant entre deux électrodes	A
t	Temps	s
F	Constante de Faraday	$\text{C}.\text{mol}^{-1}$
C	Concentration molaire	$\text{mol}.\text{m}^{-3}$
z	Nombre de charge	
$\vec{j}$	Vecteur densité de courant	$\text{A}.\text{m}^{-2}$
$\vec{E}$	Vecteur champ électrique	$\text{V}.\text{m}^{-1}$
S	Surface	$\text{m}^2$
$\sigma$	conductivité	$\text{S}.\text{m}^{-1}$
$\lambda$	Conductivité molaire	$\text{S}.\text{m}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
X	Concentration molaire	$\text{mol}.\text{m}^{-3}$
l	longueur	m
R	Résistance électrique	$\Omega$
N	Nombre d'électrode	
$\rho_r$	Résistivité électrique	$\Omega.\text{m}$
$\tau_c$	Temps caractéristique globale de la réaction	s
E	Energie d'activation d'Arrhenius	$\text{J}.\text{mol}^{-1}$
k	Coefficient de vitesse	
A	Facteur pré exponentiel	
$u_L$	Vitesse de propagation de flamme laminaire	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
$\delta_r$	Epaisseur de la zone de réactions chimiques	mm
$\delta_p$	Epaisseur de la zone de préchauffage	mm
$\delta_L$	Epaisseur totale	mm
a	Coefficient de diffusivité thermique	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
K	Facteur de Karlovitz	$\text{s}^{-1}$
$S_u^0$	Vitesse de flamme stable sans étirement	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
$L_M$	Nombre de Markstein	mm

# *Introduction Générale*

## Introduction générale

---

*L'énergie est un élément déterminant et indispensable pour l'économie d'un pays. Elle est directement liée à son développement, cela est valable pour les pays développés (industrialisés) que pour les pays émergents.*

*La demande énergétique ne cesse de s'accroître et l'utilisation irrationnelle des combustibles d'origine fossile peut provoquer des dégâts irréversibles à l'environnement et un épuisement précoce de leurs réserves. Ces réserves sont encore estimées à 40 ans pour le pétrole, 68 ans pour le gaz et 400 ans pour le charbon [1]. Il est à souligner que ces estimations sont parfois contradictoires faisant parfois faire varier les chiffres entre 40 à 200 ans pour le cas du pétrole.*

*La crise énergétique des années soixante-dix a poussé les pays industrialisés à rechercher d'autres formes d'énergie compétitives aux combustibles d'origine fossile. L'énergie nucléaire présente des atouts considérables, avec un prix de kWh d'énergie électrique défiant toute concurrence. Néanmoins, les conséquences très néfastes à l'environnement (accidents nucléaires et déchets radioactifs) liées à son utilisation ont poussé plusieurs pays qui se sont orientés vers le nucléaire à revoir leur politique énergétique future (Allemagne, Japon avec l'accident récent de la centrale nucléaire de Fukushima).*

*Les combustibles d'origine fossile contribuent massivement au réchauffement climatique de la Terre par "effet de serre" dû au dégagement du dioxyde de carbone par leur combustion dans l'atmosphère. La prise de conscience environnementale à travers les accords internationaux tel que l'accord de Kyoto a poussé les pays industrialisés à réduire leur rejet de gaz à effets de serre : l'Allemagne est parvenue à elle seule à réduire ses rejets à 50 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> [2].*

*"S'il n'est pas maîtrisé, le réchauffement climatique aura des implications dans le domaine de la sécurité d'une ampleur similaire aux deux conflits mondiaux, mais qui dureront pendant des siècles", déclarait dans un communiqué Nick Mabey, auteur du rapport du Royal United Services Institute (RUSI) intitulé "Les réponses de la sécurité internationale à un monde exposé au réchauffement climatique" [3].*

*Selon le RUSI, les inquiétudes liées au climat vont entraîner des "changements fondamentaux" dans le paysage géopolitique, modifier la gestion des relations internationales et contraindre à un réexamen des intérêts nationaux. "Les conséquences climatiques vont obliger à repenser radicalement la façon dont nous identifions et assurons nos intérêts nationaux", a indiqué M. Mabey, citant l'exemple de l'énergie où la sécurité "dépendra de plus en plus d'alliances fortes avec d'autres gros consommateurs d'énergie, comme la Chine, (...) et moins des relations avec les producteurs de pétrole".*

*Devant cette réalité, d'épuisement des réserves énergétiques d'origine fossile et du changement climatique par effet de serre, le monde se dirige actuellement vers la recherche de nouvelles sources énergétiques, propres et respectueuses de l'environnement. Les énergies renouvelables (ER) présentent l'avantage d'être des ressources non épuisables et présentes abondamment dans la nature [4].*

*L'hydrogène est l'une des solutions énergétiques qui pourra répondre aux besoins actuels. Bien qu'on le trouve en abondance dans l'univers, mais combiné avec d'autres atomes : cas notamment de l'eau, du pétrole ou du gaz naturel. L'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique très intéressant produit essentiellement par électrolyse. Il est utilisé essentiellement dans la chimie, le raffinage ou l'industrie. A l'heure des préoccupations environnementales, l'hydrogène pourrait bien, jouer un rôle prépondérant dans le paysage énergétique futur [5].*

*Bien que la consommation mondiale d'hydrogène est aujourd'hui de 56,6 millions de tonnes (représentant moins de 2 % de la consommation mondiale d'énergie), les chercheurs et ingénieurs prévoient un avenir prometteur pour cette source énergétique.*

*Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à une étude comparative entre un chalumeau classique et un chalumeau utilisant l'hydrogène comme combustible. Il faut bien convenir que les années comprises entre 2005 et 2010 ont connues l'émergence de plusieurs entreprises fabriquant des chalumeaux à hydrogène HHO. Avec le générateur HHO, des quantités importantes d'hydrogène et d'oxygène peuvent être produites à partir d'eau. La combustion du mélange des deux gaz permet d'obtenir une flamme oxyhydrique capable d'atteindre une température de 3300°C grâce aux nouvelles technologies.*

*Le mémoire de PFE est structuré en cinq chapitres principaux. Le chapitre I est relatif à des généralités sur les chalumeaux, conventionnel et à hydrogène, où sont présentés les avantages et les inconvénients du chalumeau classique par rapport à celui à hydrogène. Le chapitre II traite une analyse bibliographique de la combustion utilisant comme combustible l'hydrogène. Le chapitre III concerne l'étude expérimentale du chalumeau à hydrogène. Le chapitre IV est relatif à une étude théorique de la combustion dans le chalumeau à hydrogène. Le dernier chapitre concerne les résultats et les discussions.*

*Le mémoire se termine par une conclusion générale mettant en relief la synthèse des travaux et des résultats obtenus ainsi que les perspectives, éventuelles, à envisager pour d'autres études ultérieures.*

# *Chapitre I :* *Généralités*

# CHAPITRE I: : Généralités sur les chalumeaux oxhydriques et oxyacétylénique

## I.1. Introduction :

Dans le cadre de ce chapitre nous allons nous intéresser à la description de deux types de chalumeaux, à savoir : le chalumeau oxhydrique et le chalumeau oxyacétylénique. Une comparaison entre chalumeaux, en termes d'avantages et d'inconvénients sera présentée.

## I.2. Description d'un chalumeau :

Un chalumeau est un dispositif à travers lequel on obtient une flamme stable, de propriétés déterminées, par la combustion d'un mélange adéquat de gaz combustible et d'oxygène. Il peut être utilisé pour diverses fonctions : soudage, brasage, chauffage et découpage [6]. Il est composé de :

- Corps comprenant les arrivées de gaz à l'aide de robinets de réglages, généralement la manche du chalumeau ;
- Un mélangeur ;
- Une lance qui conduit le mélange ;
- Une buse calibrée (orifice de sortie).

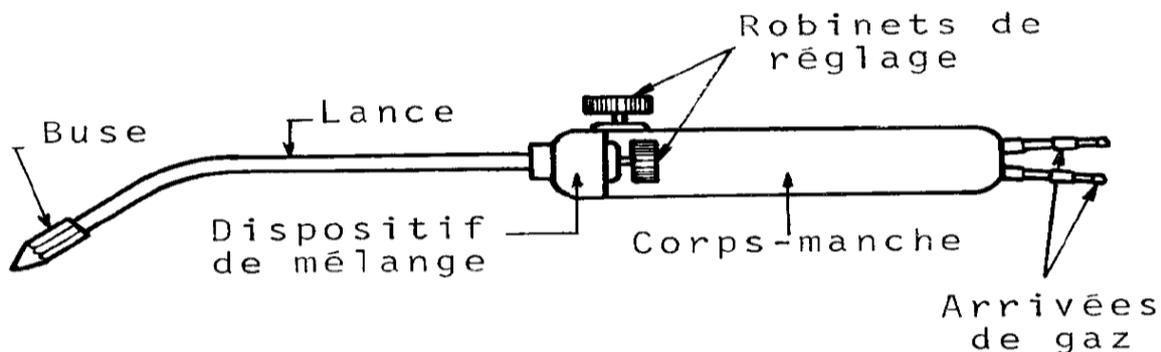


Figure I.1 : Schéma descriptif d'un chalumeau.

La figure I.1 montre le schéma descriptif d'un chalumeau. Il existe essentiellement trois types de chalumeaux : chalumeau soudeur, chalumeau coupeur et chalumeau à usage divers (chauffage) :

- **chalumeau soudeur** : Il est classé selon la pression d'alimentation. En basse pression si la pression du mélange à l'intérieur de la buse est supérieure à la pression d'admission : quelques dizaines de millibars. En haute pression si la pression du mélange dans la buse est

inférieure à la pression d'admission, voisine de 0.4 bar. Tout comme on peut les classer en fonction du débit, débit unique ou débits multiples. Le classement pourra être fait selon le système de mélange : en chalumeau sans aspiration, quand les deux gaz sont admis avec des pressions égales (cas spécifique aux chalumeaux HP) ou en chalumeau avec aspiration lorsque l'un des deux gaz (oxygène) entraîne l'autre par une dépression.

**-chalumeau coupeur :** il comporte les mêmes éléments que le chalumeau soudeur pour l'alimentation de la flamme de chauffe, avec en plus un circuit pour l'oxygène assurant la coupe. Car une opération de coupage nécessite une flamme de chauffe qui permet de porter le métal à une température supérieure à celle d'amorçage, ensuite la maintenir par l'action d'un jet d'oxygène.

**-chalumeau à usage divers :** il est pratiquement identique au le chalumeau soudeur, sauf que l'acétylène est remplacé par un autre gaz, butane ou propane par exemple.

On distingue généralement deux types de dispositifs de chalumeaux. La figure I.2 montre les photos des dispositifs utilisés.



Figure I.2 : Photo du dispositif système chalumeau : (a). classique, (b). à hydrogène.

### **I.3. Comparaison des performances d'un chalumeau à hydrogène avec les chalumeaux classiques :**

Il est difficile de comparer les caractéristiques techniques de différents chalumeaux, car elles varient selon le calibre de la buse étant donné que c'est elle qui contrôle le débit et pression d'admission du mélange gazeux, et par conséquent l'intensité et la dimension de la flamme.

Cette comparaison se limitera aux chalumeaux oxyacétylénique et oxhydriques, vu que les deux donnent la flamme la plus puissante et sont les plus utilisés dans l'industrie.

#### **\*Température**

Les deux combinaisons de gaz produisent des flammes intenses, mais l'oxhydrique peut aller jusqu'à 3300°C, dépassant l'oxyacétylénique qui va jusqu'à environ 3200°C.

#### **\*Soudage :**

Pour le soudage : les deux types de chalumeaux peuvent être utilisés pour souder ou brasser différents métaux : alliages d'acier, alliages d'aluminium, fonte, bronze, or et argent, etc... avec des épaisseurs de soudages pouvant aller jusqu'à 25 mm. La différence entre les deux chalumeaux c'est la consommation des gaz, qu'on peut l'évaluer par le débit qui va de 25 l/h jusqu'à 1000 l/h pour les chalumeaux oxyacétyléniques et de 60 l/h jusqu'à 650 l/h pour les chalumeaux oxhydriques.

#### **\*Coupage :**

Pour le coupage, l'épaisseur maximum varie selon le métal à découper, en moyenne les deux chalumeaux peuvent découper une épaisseur allant de 4mm jusqu'à 80 mm.

Certaines entreprises comme KOMATSU, ont développé des chalumeaux de coupage à hydrogène avec une vitesse de coupages qui atteint 520 mm/min pour une plaque de 16mm d'épaisseur, une vitesse supérieure de 30% à celle des chalumeaux ordinaires.

#### **\*Pression de fonctionnement :**

La pression de fonctionnement de l'acétylène ne doit pas dépasser 1.5 bar car, au-delà de cette limite, l'acétylène devient instable ce qui cause une chute importante de la température de la flamme. Par contre, pour l'hydrogène on peut aller jusqu'à 3.5 bar sans danger et la flamme reste plus au moins stable même en cas de fausses manœuvres.

#### **\*Prémélange :**

Avec le chalumeau oxyacétylénique, la combinaison oxygène- acétylène est séparée dans deux cylindres distincts et cela peut compliquer le processus. Etant donné que les volumes des cylindres diffèrent, le tirage peut être inégal, par conséquent on a le risque de perturbation dû à un mauvais mélange.

Le chalumeau à hydrogène ne nécessite qu'un seul récipient qui, dans la plupart des cas, est l'endroit où se produit l'électrolyse de l'eau. Ceci simplifie énormément son utilisation.

**\*Coût :**

Les deux applications sont relativement coûteuses. Puisque le processus de séparer l'eau en deux parties, l'oxygène et l'hydrogène, exige beaucoup d'énergie, le chalumeau à hydrogène coûte plus cher. Le chalumeau classique est également coûteux, le coût des deux cylindres d'oxygène et d'acétylène étant à prendre en compte.

**\*Sécurité :**

Les deux chalumeaux possèdent leurs parts de risques. Si la prudence n'est pas respectée, la présence de l'oxygène et de l'acétylène peut entraîner un retour de flamme, dû à l'inflammation des gaz mélangés.

L'absence de carbone dans le chalumeau à hydrogène entraîne l'émission d'un feu clair. Ce feu peut ne pas être perçu facilement ce qui est potentiellement dangereux.

Entre autres, l'hydrogène peut parfois fuir en raison de sa consistance. Il faut soigneusement vérifier qu'il n'y ait pas de fuites avant chaque utilisation et utiliser le chalumeau uniquement dans des zones bien ventilées.

**I.4. Avantages et inconvénients des chalumeaux à hydrogène et chalumeau classiques :**

Sur la base des données que nous avons collectées et mentionnées ci-dessus, le tableau I.1 récapitule les avantages et inconvénients de chaque chalumeau.

Tableau I-1 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des chalumeaux oxhydriques et classiques.

<b>Type de chalumeau</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
	-Produit une flamme de très haute température, 3300 <sup>0</sup> C ; -utilise un combustible renouvelable ; -La flamme d'hydrogène est propre et n'apporte d'impuretés lors du soudage ; - consommation réduite (650l/h au max) ; -vitesse de coupage assez élevée 520mm/min ; -peut fonctionner à une haute	-production de l'hydrogène et consommation de l'énergie ; -dispositif relativement cher et lourd ; -la flamme est peut être invisible ; -problème de stockage et risque de fuite de l'hydrogène vu sa faible densité ; -technologie nouvelle et peu disponible sur le marché.

<p><b><i>Oxyhydrique</i></b></p>	<p>pression, ce qui permet son utilisation sous l'eau, (6m de profondeur).                  - ne contient que le dispositif d'électrolyse et donc peu encombrant ;                  -les gaz sont dans un même réservoir, donc pas de problème de dosage du mélange ;                  -ne produit que de l'eau, donc ami de l'environnement et de l'opérateur.</p>	
<p><b><i>Oxyacétylénique</i></b></p>	<p>-produit une flamme assez puissante, 3200°C ;                  -disponible sur le marché ;                  -relativement pas chère.</p>	<p>-utilise un combustible fossile ;                  -produit du CO<sub>2</sub> qui est néfaste pour l'environnement et l'opérateur ;                  -ne peut être utilisé qu'à des pressions relativement basses ;                  -consomme beaucoup de combustible 1000 l/h.                  - dispositif encombrant ;                  -les gaz sont dans des réservoirs séparés, ce qui complique le mélange des deux ;                  -risque de retour de flamme.</p>

**I.5.Conclusion :**

Les chalumeaux classique et à hydrogène sont très efficaces pour produire des flammes de chaleur élevée et chaque dispositif présente des avantages et des inconvénients. Bien qu'ils produisent une chaleur élevée la chaleur à hydrogène présente l'avantage d'être plus respectueux de l'environnement et qu'il soit plus facile à utiliser que le chalumeau classique.

*Chapitre II :*  
*Etat de l'art*  
*Sur la combustion de l'hydrogène*

## **CHAPITRE II: Etat de l'art sur la combustion de l'hydrogène**

---

### **II.1. Introduction :**

Ce chapitre a pour objectif de faire une présentation générale des différentes théories relatives à la modélisation des flammes issues de la combustion de l'hydrogène, en particulier celles obtenues par le chalumeau oxyhydrique, objet de notre étude. L'historique des chalumeaux oxyhydrique et acétylénique est également présenté.

### **II.2. Historique :**

#### **II.2.1. Chalumeau oxyhydrique :**

Le docteur Robert-Rare, professeur de philosophie naturelle à l'Université de Philadelphie, a annoncé, dans un mémoire (inséré dans le 1<sup>er</sup> volume du Journal minéralogique de Bruce) qu'il avait réussi à produire sur différents corps, des flux très-intenses de chaleur par un jet de flamme à partir d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène dans la proportion requise pour former l'eau.

En 1816, M. Brooks annonça, dans les annales de Thomson, qu'il avait conçu un chalumeau dans lequel il condensait l'air au moyen d'une petite pompe de compression, pour le faire sortir en un jet très dense et continue. Il ajouta que ce jet, dirigé sur la flamme d'une lampe, produirait un flux de chaleur plus élevé que celui qu'on obtient avec le chalumeau ordinaire.

M. Newman construisit un chalumeau suivant l'idée de M. Brooks, en prenant en considération la facilité de son démontage. Il y ajouta une vis latérale par laquelle peut être introduit dans le récipient, l'oxygène ou tout autre gaz.

Sir H. Davy ayant reconnu que l'explosion d'un mélange de gaz oxygène et hydrogène ne se communiquerait pas dans l'intérieur des tubes à très-petites ouvertures. Il ajouta qu'il n'y aurait aucun danger d'explosion en brûlant les gaz comprimés à leur sortie d'un tube de verre de 3 pouces (76 millimètres) de long et de 1/80 pouce (0,52 millimètres) de diamètre.

Dr M. Clarke exploita les travaux de H. Davy pour les appliquer au chalumeau de Newman, en ajoutant aussi quelques modifications proposées par le professeur Cumming. Ces modifications consistaient à établir dans une boîte de fer un petit cylindre de sûreté, rempli à environ moitié d'huile, et garni à son extrémité supérieure d'une toile métallique très-fine. Les gaz condensés dans la boîte sont forcés de passer à travers l'huile dans un petit cylindre, pour ensuite traverser une toile métallique, avant d'arriver vers un robinet, à travers lequel ces gaz doivent s'écouler [7].

**II.2.2. Chalumeau oxyacétylénique :**

En 1895, Henry le CHATELIER, Polytechnicien et chimiste français (1850/1936) observant la température de combustion du mélange oxygène + acétylène, envisagea son utilisation par l'intermédiaire d'un "brûleur".

En 1898, il proposa que la flamme du chalumeau oxyacétylénique soit utilisée pour la soudure et le découpage des métaux. Néanmoins, les propriétés explosives de ce mélange rendant impossible toute utilisation de ce gaz (acétylène), le poussèrent à n'envisager le mélange qu'au plus près de la sortie du "brûleur".

En 1899, il suggéra à Charles PICARD, ingénieur chimiste français (1872/1957), qu'il y aurait tout intérêt à laisser les orifices de dégagement de l'acétylène en dehors de la partie chauffée, quitte à entraîner un peu d'air : le "brûleur" pourrait être fabriqué de deux pièces et pourrait agglomérer de la magnésie calcinée broyée dans du ciment ou du plâtre qui sous une forte calcination durcirait. Malgré de nombreux essais, les résultats furent décevants, il était impossible d'obtenir une combustion régulière car le "brûleur" s'obstruait constamment à cause des dépôts de carbone. Henry le CHATELIER estima qu'il n'était pas utile de poursuivre ces expériences.

En 1901, Charles PICARD reprit les expériences avec Edmond FOUICHE, ingénieur français, (1861/1931). Ils avaient pris la décision de mélanger les deux gaz (oxygène + acétylène) en amont de la sortie du "brûleur" en cherchant à obtenir une vitesse de sortie du mélange supérieure à celle de la propagation de la flamme, c'est à dire supérieure à celle-ci d'environ 200 m/s.

Charles PICARD employait de l'acétylène dissous, l'oxygène était préparé au moyen de chlorate de potasse, le "brûleur" était de très petite dimension, les bouteilles étaient placées loin du "brûleur" et l'allumage se faisait à distance. La flamme obtenue fut parfaitement stable. Charles PICARD obtint ainsi la première flamme oxyacétylénique avec un "brûleur", c'était le 21 mars 1901. Ce fut le premier chalumeau soudeur haute pression (HP) à pressions équilibrées (PE) oxyacétylénique PICARD/FOUCHE.

En 1902, Edmond FOUICHE inventa le premier chalumeau soudeur oxyacétylénique basse pression à doseur (BP), alimenté par un générateur d'acétylène et déposa ainsi un brevet en 1902 et publié le 28 avril 1903 sous l'appellation "chalumeau à gaz", ainsi qu'un autre brevet en 1909 et publié le 23 mars 1909 sous l'appellation "perfectionnement aux chalumeaux et en particulier aux chalumeaux soudeurs oxyacétyléniques".

En 1910, Charles PICARD inventa le premier chalumeau soudeur oxyacétylénique basse pression à aspiration (BP), dit "chalumeau à aiguille". Ce chalumeau soudeur spécifique au marché français est toujours actuellement, fabriqué, commercialisé, mais utilisé en mode haute pression (HP), c'est à dire avec une pression d'acétylène supérieure à 30 mb [8].

### II.3. Combustion de l'hydrogène :

La combustion est un phénomène très répandu dans la nature. Il s'agit en réalité d'une réaction exothermique d'oxydoréduction.

La combustion par dioxygène a été découverte par le chimiste Français Antoine de Lavoisier en 1775[9]. Il démontra que la partie de l'air responsable de la combustion est une source d'acidité et nomme cette partie de l'air : oxygène.

Il faut savoir que ce phénomène n'est pas constitué d'une seule réaction chimique mais d'une succession de réactions élémentaires qui ont lieu à très grande vitesse, quasi simultanément, pendant le processus de combustion.

Max Bodenstein[10] fut l'un des premiers à avoir travaillé sur les réactions en chaînes. Il a énoncé l'approximation des états quasi-stationnaires en 1913 où il y expliqua que certains corps ou radicaux sont très réactifs. Leur taux de destructions est tellement rapide qu'il leur permet de compenser toutes leurs productions. Ainsi, la concentration de ces radicaux est tellement faible qu'on peut la considérer constante, la vitesse de réaction de ces radicaux est donc nulle.

En 1925, la réaction en chaîne ramifiée a été découverte dans le laboratoire de Nicolai Semenov [11], à l'institut technique physique de Petrograd, de manière accidentelle durant une étude portant sur l'oxydation de la vapeur de phosphore. Peu après, il a été démontré que l'oxydation de l'hydrogène moléculaire, l'une des réactions les plus simples de point de vue de sa stœchiométrie, est également une réaction en chaîne ramifiée de plusieurs étapes constituant un mécanisme assez complexe.

Le scientifique Suédois Savante August Arrhenius a introduit en 1889 [12] dans son article intitulé « *On the reaction velocity of the inversion of cane sugar by acids* » une loi qui porte son nom : « loi d'Arrhenius ». Elle permet de déterminer la variation de vitesse d'une réaction chimique en fonction de la température.

La loi s'énonce comme suit :

$$\frac{d}{dT} (\ln k) = \frac{E}{RT^2} \quad (2.1)$$

Où :

k : constante de vitesse (coefficient de vitesse) ;

T : température en Kelvin ;

R : constante des gaz parfaits (valeur usuelle :  $R = 8,314472 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) ;

E : énergie d'activation d'Arrhenius en  $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

En supposant que l'énergie d'activation, E, est indépendante de la température, hypothèse raisonnable dans un intervalle de température limité, l'intégration de la relation (2.1) donne :

$$k = C e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2.2)$$

Où :

A est un facteur pré-exponentiel.

La forme générale de la loi est donc :

$$k = AT^\beta e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2.3)$$

L'approximation des états quasi-stationnaires et la loi d'Arrhenius permet de déterminer les énergies d'activation et les constantes de vitesses pour des réactions dont une décomposition validée par l'expérience est connue.

Le tableau ci-dessous donne le schéma réactionnel « classique » du mécanisme complet de la combustion du mélange H<sub>2</sub> – O<sub>2</sub>. Les caractéristiques de chaque réaction sont données sous forme de loi d'Arrhenius généralisée. Le tableau II.1 montre le schéma des réactions de l'hydrogène et de l'oxygène.

Tableau II-1 : Schéma réactionnel du mélange H2-O2 [13].

Réaction	A	β	E
1 H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ⇌ 2OH	1,70E+13	0,000	47 780
2 OH + H <sub>2</sub> ⇌ H <sub>2</sub> O + H	1,17E+09	1,300	3 626
3 H + O <sub>2</sub> ⇌ OH + O	5,13E+16	-0,816	16 507
4 O + H <sub>2</sub> ⇌ OH + H	1,80E+10	1,000	8 826
5 H + O <sub>2</sub> + M ⇌ HO <sub>2</sub> + M	2,10E+18	-1,000	0
6 H + O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ⇌ HO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	6,70E+19	-1,420	0
7 H + O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> ⇌ HO <sub>2</sub> + N <sub>2</sub>	6,70E+19	-1,420	0
8 OH + HO <sub>2</sub> ⇌ H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>	5,00E+13	0,000	1 000
9 H + HO <sub>2</sub> ⇌ 2OH	2,50E+14	0,000	1 900
10 O + HO <sub>2</sub> ⇌ O <sub>2</sub> + OH	4,80E+13	0,000	1 000
11 2OH ⇌ O + H <sub>2</sub> O	6,00E+08	1,300	0
12 H <sub>2</sub> + M ⇌ H + H + M	2,23E+12	0,500	92 600
13 O <sub>2</sub> + M ⇌ O + O + M	1,85E+11	0,500	95 560
14 H + OH + M ⇌ H <sub>2</sub> O + M	7,50E+23	-2,600	0
15 H + HO <sub>2</sub> ⇌ H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	2,50E+13	0,000	700
16 HO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub> ⇌ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	2,00E+12	0,000	0
17 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + M ⇌ OH + OH + M	1,30E+17	0,000	45 500
18 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + H ⇌ HO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	1,60E+12	0,000	3 800
19 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + OH ⇌ H <sub>2</sub> O + HO <sub>2</sub>	1,00E+13	0,000	1 800

$$k_5(\text{H}_2\text{O}) = 21k_5(\text{Ar}), \quad k_5(\text{H}_2) = 3,3k_5(\text{Ar}), \quad k_5(\text{N}_2) = k_5(\text{O}_2) = 0.$$

$$k_{12}(\text{H}_2\text{O}) = 6k_{12}(\text{Ar}), \quad k_{12}(\text{H}) = 2k_{12}(\text{Ar}), \quad k_{12}(\text{H}_2) = 3k_{12}(\text{Ar}).$$

$$k_{14}(\text{H}_2\text{O}) = 20k_{14}(\text{Ar}).$$

#### II.4. Flamme de l'hydrogène :

Le système oxyhydrique est très utilisé dans certains laboratoires pour sa production de chaleur élevée et, dans une certaine mesure, dans des ateliers de réparation et de chaudronnerie. Il a longtemps été le procédé le plus utilisé pour le scellement des chambres de plomb destinées à la fabrication d'acide sulfurique par procédé de contact.

### II. 4.1. Classification des flammes :

Deux situations généralement rencontrées sont identifiées selon la procédure utilisée pour introduire les réactifs dans la zone de flamme [14]. Elles sont schématisées sur la figure ci-dessous.

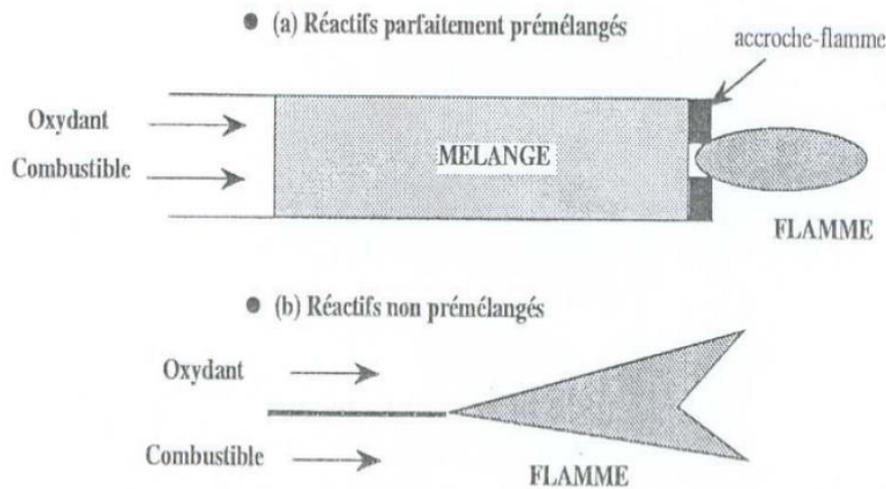


Figure II.1 : Types de flamme : (a) pré-mélangée, (b) non pré-mélangée [15].

Il existe deux types de flammes :

- Flammes pré-mélangées : où les réactifs sont mélangés avant la zone de réaction ;
- Flammes non-pré-mélangées (flammes de diffusion) : où les réactifs sont introduits séparément dans la zone de réaction, de part et d'autre de la flamme. Ils sont alors essentiellement entraînés l'un vers l'autre par diffusion moléculaire.

La combustion pré-mélangée 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 et donc de remonter l'écoulement en amont, de la chambre de combustion jusqu'à l'endroit où s'effectue le mélange. Cette situation pose des problèmes de sécurité que l'on ne rencontre pas avec les flammes de diffusion.

Les écoulements pouvant être laminaires ou turbulents et quatre situations peuvent être possibles. Elles sont résumées avec quelques applications pratiques dans la figure (II.2). Si les flammes laminaires semblent n'intervenir que dans quelques applications plutôt anecdotiques (chalumeau, flamme de briquet), la compréhension de la structure de ces flammes est cependant fondamentale pour la description et la modélisation de nombreuses situations industrielles [16]. La figure II.2 montre les régimes des flammes ainsi que leurs applications.

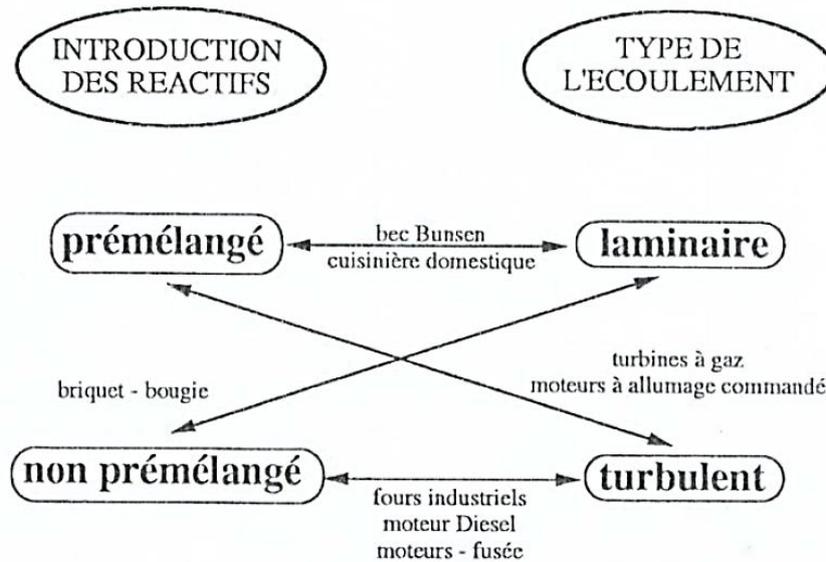


Figure II.2 : Différents régimes de flammes et applications [17].

#### II. 4.2. Structure d'une flamme laminaire :

Peter Desaga, Assistant de laboratoire du chimiste Allemand Robert Wilhelm Bunsen, avait perfectionné en 1855 un appareil de laboratoire. L'appareil a été inventé par Michael Faraday, et destiné à produire une flamme ouverte avec du gaz combustible porte le nom de bec de Bunsen [18].

Les flammes d'un chalumeau à hydrogène sont de type laminaire pré-mélangé. Pour les chalumeaux, les gaz pré-mélangés sont initialement au repos. Après l'allumage, on constate qu'une surface presque sphérique sépare les gaz brûlés des gaz frais non brûlés. En fait, ce n'est pas une surface qui sépare les gaz frais des gaz brûlés, mais une zone d'épaisseur finie. Dans les conditions normales de pression, l'ordre de grandeur de cette épaisseur est de quelques dixièmes de millimètre. Cette zone est appelée front de flamme.

La vitesse de combustion laminaire du pré-mélange est une grandeur caractéristique intrinsèque d'un mélange combustible. Sa connaissance est essentielle pour de nombreuses applications et études expérimentales, numériques et analytiques. 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. Elle dépend également des conditions thermodynamiques du milieu (pression et température).

Une flamme pré-mélangée peut être stabilisée pour un écoulement monodimensionnel du mélange combustible comburant. L'expérience montre que la vitesse de propagation d'une flamme suffisamment plane est constante à partir d'un certain temps après l'inflammation.

Cette vitesse appelée vitesse normale de propagation laminaire  $u_L$  est une caractéristique intrinsèque du mélange.

La vitesse de propagation de cette flamme, lorsqu'elle est suffisamment plane, est constante à différents moments de sa propagation (à partir d'un certain temps après l'inflammation), si on l'évalue par rapport aux gaz frais qui se trouvent juste devant le front. Cette vitesse, appelée vitesse normale de propagation laminaire  $u_L$  est une caractéristique intrinsèque du mélange combustible-comburant considéré et de ses conditions de pression et de température [19].

La présence d'un combustible et d'un comburant n'est pas une condition suffisante à la formation d'une flamme. En effet, la proportion de combustible doit être comprise entre deux valeurs limites,  $L_i$  (limite inférieure au-dessous de laquelle le mélange est trop pauvre pour être inflammable) et  $L_s$  (limite supérieure au-dessus de laquelle le mélange est trop riche). Ces grandeurs dépendent du mélange réactif considéré et de la pression.

Par ailleurs, il est également nécessaire que la température des gaz frais (température obtenue par chauffage du mélange réactif ou par une étincelle) soit supérieure à la température d'inflammation du mélange. Celle-ci dépend également de la nature des réactifs et de la pression.

La chaleur et les espèces réactives produites localement par la réaction diffusent vers les gaz frais. Ainsi, la flamme se propage de proche en proche, en amenant progressivement les gaz frais adjacents dans les conditions d'inflammation. La figure II.3 montre la structure d'une flamme laminaire pré-mélangée.

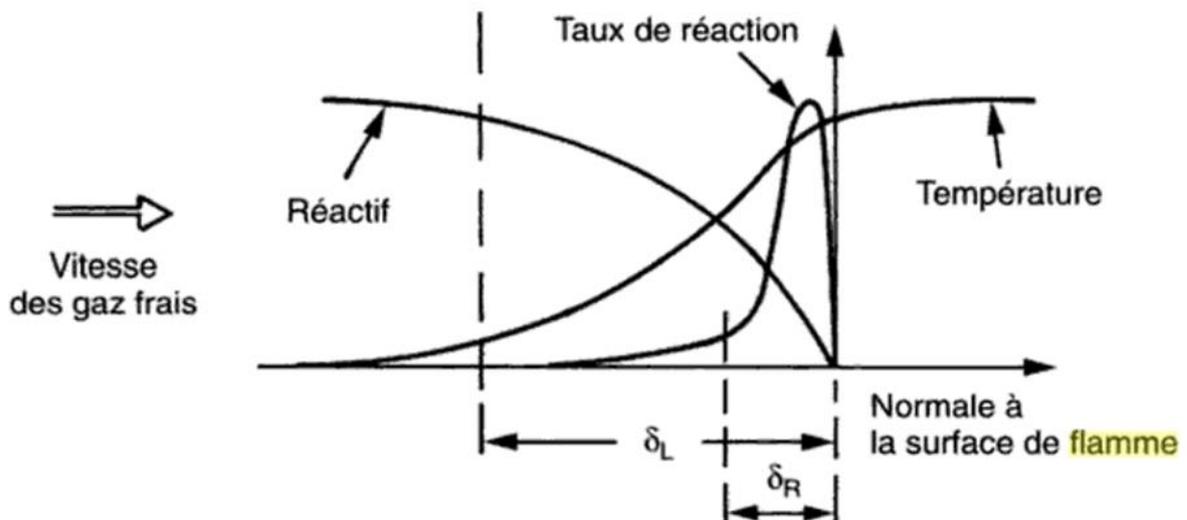


Figure II.3: Structure spatiale d'une flamme pré-mélangée stabilisée dans un écoulement de vitesse égale et opposé à la vitesse de flamme  $u_L$ [20].

Selon la théorie de Mallard et Le Chatelier[21], la zone intermédiaire entre les gaz frais et les gaz brûlés peut être séparée en deux zones : la zone de préchauffage et la zone de réaction. Les gaz frais et les gaz brûlés sont séparés par une mince zone de réaction : le front de flamme. Le flux de chaleur provenant des gaz brûlés élève la température des gaz frais en amont, sur une épaisseur  $\delta_p$ . Dans cette zone de préchauffage, les réactions chimiques peuvent être considérées comme négligeables devant les effets de diffusion thermique. Dans la zone de réaction d'épaisseur  $\delta_r$ , le pic de dégagement de chaleur est dû aux réactions chimiques.

### II. 4.3. Interprétation physique d'une flamme pré-mélangée :

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, les gaz pré-mélangés ne réagissent pas spontanément et ne peuvent le faire assez vite que si leur température est au-dessus d'une certaine valeur. De plus, la propagation de la flamme est le résultat d'une coopération de deux phénomènes : les gaz chauds derrière la flamme chauffent par conduction thermique moléculaire les gaz frais qui sont devant. Ces derniers, arrivés à un certain niveau de température, réagissent en dégageant de la chaleur qui sert à chauffer les gaz encore en aval. Cet échauffement par conduction se fait sur une épaisseur  $\delta_L$ . Dans l'épaisseur  $\delta_L$  de la flamme, la température monte pendant que la concentration des réactifs décroît. Cependant, les réactions chimiques ne se produisent que dans une zone "de réaction" d'épaisseur  $\delta_R$  encore plus fine que  $\delta_L$ . La figure II.4 montre la structure spatiale d'une flamme pré-mélangée stabilisée dans un écoulement.

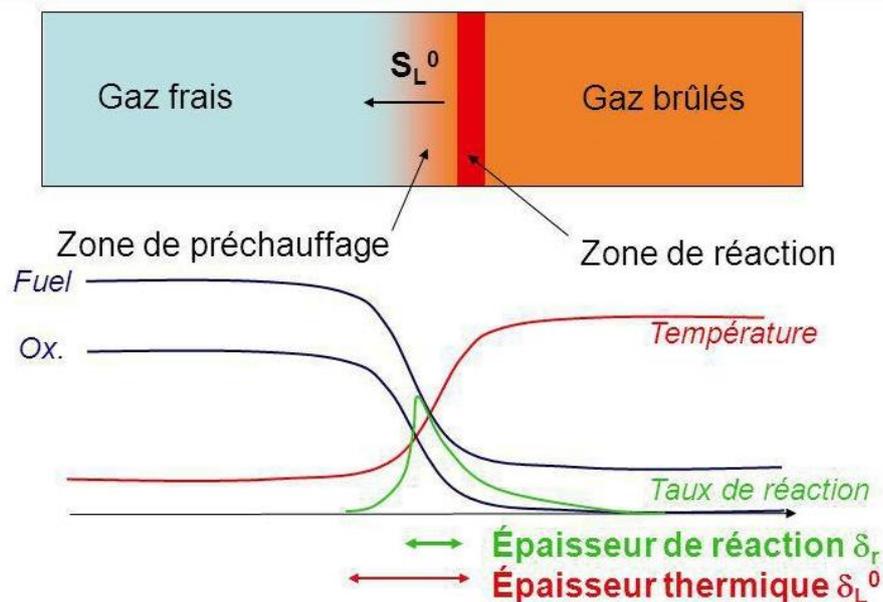


Figure II.4: Structure d'une flamme laminaire pré-mélangée [22].

Dans la zone précédant la zone de réaction, ce sont de simples processus de diffusion qui se produisent : diffusion de la chaleur comme il est mentionné précédemment, mais aussi la diffusion des gaz brûlés et de certaines espèces radicalaires très réactives qui sont produites dans la zone de réaction et qui contribuent tout autant que la température, sinon plus dans certains cas, à la croissance du taux de réaction. Puisque diffusion moléculaire et chimie sont

toutes deux impliquées dans le phénomène de flamme, on peut déjà donner, par un raisonnement purement dimensionnel, des estimations de  $u_L$  et  $\delta_L$ [23].

Supposons que les phénomènes de diffusion de masse et de chaleur soient tous caractérisés par un seul coefficient de diffusivité « a » (égal à  $\lambda/(\rho \cdot C_p)$  dans le cas de la diffusion de la chaleur ou D dans le cas de la diffusion de masse), et que les différentes réactions chimiques impliquées puissent être caractérisées par un temps caractéristique unique, global,  $\tau_c$ . On trouve alors qu'à une constante multiplicative près :

$$u_L = \left(\frac{a}{\tau_c}\right)^{\frac{1}{2}} ; \delta_L = (a\tau_c)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Avec : a en  $m \cdot s^{-1}$  et  $\tau_c$  en s.

En plus de ces phénomènes de diffusion et de réaction chimique, la flamme engendre un mouvement des gaz brûlés par rapport à elle-même. Celui-ci n'est pas nécessaire à la propagation de la flamme, mais est la conséquence directe du dégagement de la chaleur qui l'accompagne. En effet, si l'on fait le bilan de masse, par rapport au front de flamme pour une portion de surface unité de celui-ci, en régime de propagation établi, on obtient, en appliquant à un écoulement monodimensionnel stationnaire l'équation de continuité :

$$\rho_r u_L = \rho_p u_p \quad (2.5)$$

Où :  $u_L$  est la vitesse des gaz frais par rapport à la flamme (ou de la flamme par rapport aux gaz frais),  $u_p$  est la vitesse des gaz brûlés par rapport à la flamme, et  $\rho_r$  et  $\rho_p$  sont les masses volumiques, respectivement, des gaz frais (réactifs) et brûlés (produits). Il s'ensuit (constatation expérimentale) que  $u_p > u_L$ . Cela conduit alors à des mouvements de gaz autour d'une flamme, différents suivant sa configuration.

La flamme se propage des gaz brûlés vers les gaz frais. La « vitesse de flamme » est une notion importante dans la théorie de la combustion. Il existe cependant différentes définitions de la vitesse de flamme et différentes façons de la mesurer expérimentalement.

Deux définitions existent, elles ont été proposées par Poinot et Veynante[24] :

- la vitesse de combustion laminaire  $u_L$  est une grandeur globale et est associée, dans le cas d'une flamme plane, à la vitesse de consommation des gaz frais. Elle mesure la vitesse à laquelle sont brûlés les réactifs ;
- la vitesse absolue,  $V_L$  (appelée par la suite vitesse de propagation) est définie localement et correspond à la vitesse normale à laquelle se déplace le front de flamme dans le référentiel fixe du laboratoire.

**II.4.4. Etirement d'une flamme et nombre de MARKSTEIN :**

La plupart des flammes réelles sont soumises à une déformation hydrodynamique de surface locale. Celle-ci provoque un changement de la courbure locale et affecte la vitesse de propagation frontale de flamme. Cette déformation s'appelle « étirement » ou « effet d'étirement ».

Karlovitz [25] a établi un facteur,  $K$ , désignant le taux de changement de la zone de flamme par rapport à la surface totale de la flamme :

$$K = \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dt} \quad (2.6)$$

Avec :  $K$  en  $s^{-1}$

$\frac{dA}{dt}$ , Est la vitesse de flamme par rapport aux gaz brûlés, on l'appelle : vitesse de flamme visible.

L'auteur a introduit aussi la vitesse de flamme stable sans étirement  $S_b^0$ , pour définir un certain nombre appelé : nombre de Karlovitz et donné par l'expression :

$$K_a = K \frac{\delta_0}{S_u^0} \quad (2.7)$$

Où :  $\delta_0$ , est l'épaisseur de flamme laminaire.

Il a été démontré, pour la combustion d'un mélange ( $H_2 + \text{air}$ ), que la vitesse de flamme change en fonction du nombre de Karlovitz.

Une flamme initiée au centre d'un carburant pré-mélangé et d'un volume d'air continue de se dilater en tant que nuage de produits de combustion sphériques et implique de plus en plus de volume de mélange non brûlé.

Le tronçon a des valeurs maximales au niveau du petit rayon de flamme  $r_f$  et diminue progressivement lorsque la flamme sphérique augmente.

Conformément à la courbure, pour la flamme sphérique divergente, l'étirement est positif, et est négatif pour le convergent. Par exemple, l'étirement négatif est observé près de la pointe d'une flamme stabilisée dans un brûleur de Bunsen. En général, le signe du tronçon est déterminé localement [26].

La description quantitative de l'étirement est un problème clé pour la combustion à la fois laminaire et turbulente.

Les données expérimentales obtenues pour l'effet d'étirement sur une flamme pré-mélangée ont été prouvées par la théorie ainsi que par une simulation informatique détaillée.

On a constaté que lorsque la valeur de l'éirement est faible, son effet sur la vitesse de la flamme est linéaire.

La variation de la vitesse de combustion peut être exprimée par la longueur de Markstein trouvée dans l'équation :

$$S_u = S_u^0 - L_M K \quad (2.8)$$

La figure II.4 montre le changement de vitesse de flamme en fonction du nombre de Karlovitz pour un mélange (H<sub>2</sub>+ air) à température ambiante et pression de 0.1MPa.

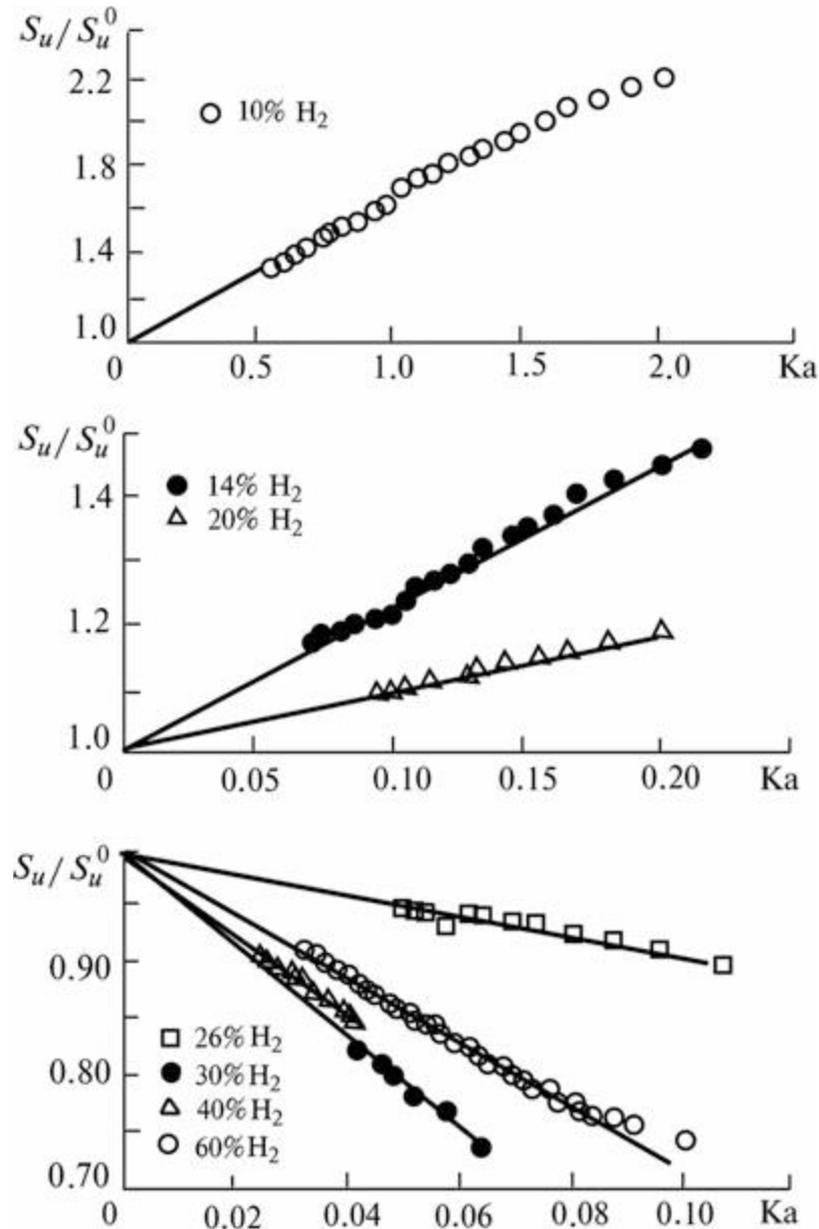


Figure II.5 : Changement de vitesse de flamme en fonction du nombre de Karlovitz pour un mélange H<sub>2</sub> + air à température ambiante et pression de 0,1 MPa [27].

Le tableau II.1 donne les valeurs de,  $L_M$ , pour différents pourcentages d'hydrogène.

Tableau II-2 : Valeurs de,  $L_M$ , pour différents pourcentages d'hydrogène.

H <sub>2</sub> %	10	15	20	29.6	40	50	60
$L_M$ (mm)	-0.35	-0.209	-0.104	0.021	0.062	0.091	0.178

La figure II.4 montre les résultats expérimentaux de  $L_M$  en fonction de  $C$ .

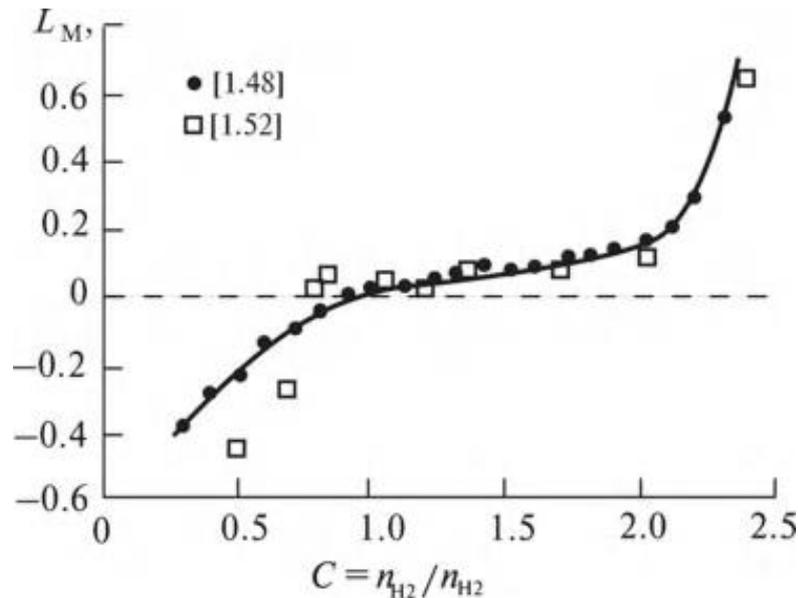


Figure II. :II.6 Résultats expérimentaux relatifs au nombre de Markstein pour une flamme ( $H_2 + air$ ) à température ambiante et pression atmosphérique [28].

## II.5. Mesure de la vitesse de flamme de l'hydrogène :

Des études quantitatives sur la combustion de pré-mélanges gazeux ont été développées et mises à jour depuis les 1<sup>ère</sup> études faites au 19<sup>ème</sup> siècle. Gui et Michelson ont établi les concepts théoriques pour la mesure de vitesse de flamme laminaire [29].

Michelson fut le 1<sup>er</sup> à avoir mesuré la vitesse de flamme, sur la surface intérieure d'un cône Bunsen, d'un mélange ( $H_2 + air$ ), brûlé à température ambiante et pression atmosphérique, Pour différentes concentrations d'hydrogène (de 15.3% à 74.6%) [30].

Dans les travaux ultérieurs de Jahn, des mélanges de faible concentration d'hydrogène n'ont pas été pris en compte (les concentrations d'hydrogène étudiées étaient de 30% et plus) et les vitesses de combustion maximales (267 cm / s) étaient inférieures à celles mesurées par Michelson (281 cm / s) [31].

Kozachenko L.S. [32] a reproduit les mesures de Michelson en utilisant un brûleur fantail. Les résultats étaient proches de ceux obtenus par Michelson.

Les données recueillies dans le tableau II.2 et publiées dans [33] illustrent l'écart dans les valeurs de vitesse de flamme pour les mélanges hydrogène-air obtenus par diverses techniques de mesure à la pression atmosphérique et à la température ambiante.

La plupart des premières mesures étaient basées sur le concept d'un front de flamme infiniment mince où la température est fortement modifiée de la valeur initiale,  $T_u$ , à la température de combustion,  $T_b$ , et la densité du gaz diminue à partir de la densité de gaz non brûlée,  $\rho_u$ , à la densité des produits de combustion,  $\rho_b$ , à la température de,  $T_b$ . En raison de la dilatation thermique, la vitesse de flamme visible (la vitesse par rapport à un observateur immobile),  $S_b$ , dépasse  $S_u$ .

Tableau II-3 : Vitesse de flamme du mélange H2-air.

Author	Year	Method	% H <sub>2</sub>	$S_u^{st}$	$S_u^{max}$
Michelson	1889	Bunsen burner	15.3–74.6	217	281
Jahm	1934	Bunsen burner	30–75	187	267
Bartholome	1949	Nozzle burner	40–51.2	–	320
Kozachenko	1954	Fantail burner	20–70	233	287
Manton and Milliken	1956	Spherical flame	30–70	232	300
Fine	1956	Bunsen burner	28–62	193	304
Heimel	1956	Bunsen burner	28–57	206	297
Grummer	1959	Spherical flame	48–67.1	–	–
Senior	1961	Bunsen burner	17.4–33	200	–
Gunther and Janisch	1972	Nozzle burner	15–70	282	355
Andrews and Bradley	1973	Two sources method	10–70	–	336
Liu and MacFarlane	1983	Nozzle burner	20.6–64	–	356
Takahashi	1983	Nozzle burner	29.6–64	–	308
Wu and Law	1984	Nozzle burner	22.7–70	–	332
Wu and Law	1984	Nozzle burner	29.6–62.7	–	308
Iijima and Takeno	1986	Spherical flame	17.4–62.7	238	298
Dowdy, Smith, Taylor	1990	Spherical flame	9–68	213	286
Egolfopoulos, Law	1990	Counter-flow	9.7–38.6	209	–
Koroll, Kumar, Bowles	1993	Two sources method	8–70	250	346
Koroll, Kumar, Bowles	1993	Nozzle burner	30–70	250	330
Vegelopopoulos and co-authors	1995	Counter-flow	9.5–18.8	–	–
Faeth and co-authors	1998	Spherical flame	15.9–62.7	210	247
Law and co-authors	2000	Spherical flame	15.9–62.7	190	282
Langmuir and co-authors	2003	Spherical flame	10–60	209	282
Huang and co-authors	2006	Spherical flame	20–38.7	224	–

Andrews et Bradley[34] ont analysé les techniques de mesure disponibles et ont prouvé la nécessité de considérer une épaisseur frontale de flamme lorsque la méthode du conteneur sphérique est utilisée. Ils ont présenté des données de vitesse de flamme obtenues dans des mélanges hydrogène-air contenus dans un espace fermé pour une seule source de flamme sphérique et pour deux sources de flammes se déplaçant l'une vers l'autre.

Récemment, des efforts ont été déployés pour développer des techniques pour améliorer les mesures de vitesse de flamme laminaire et turbulente. La possibilité de déterminer une vitesse de flamme corrigée à l'étirement dans des mélanges hydrogénés maigres à une pression supérieure à la pression atmosphérique est encore problématique.

La mesure des vitesses de flamme laminaire est compliquée dans les mélanges ( $H_2 + O_2$ ) à combustion rapide et les données publiées sont contradictoires. Il concerne spécifiquement une combustion à haute pression.

La quantité de données expérimentales sur la vitesse de la flamme pour les mélanges ( $H_2 + O_2$ ) est bien inférieure à celle des mélanges d'air et  $H_2$ . La figure II.7 montre la comparaison entre les dépendances mesurées et calculées de la vitesse laminaire sur la concentration du mélange sur une large gamme de concentrations.

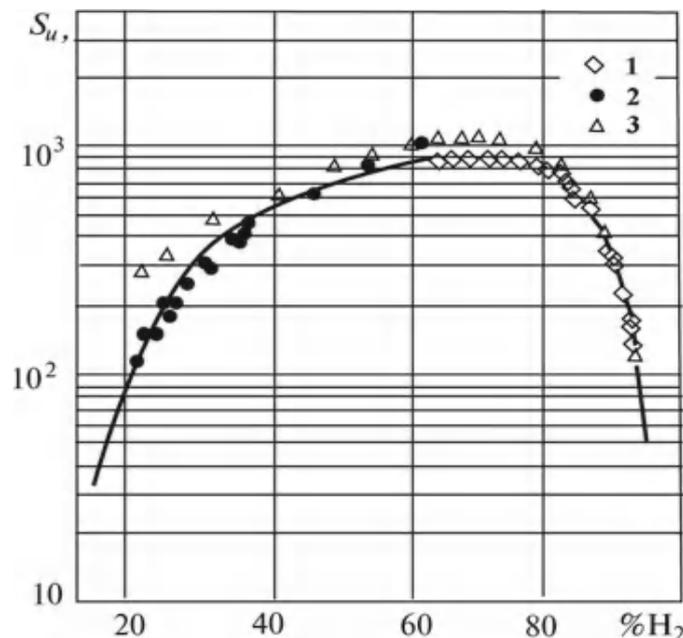


Figure II.7 : Vitesses de la flamme laminaire dans les mélanges ( $H_2 + O_2$ ) à la pression atmosphérique et la température de 298 K.

## II.6. Coupage à hydrogène :

Keiichi Taniguchi, ingénieur chez KOMATSU [35], a publié en 2004 un article sur un système de coupage utilisant le dihydrogène relié à un capteur tactile (robotisé).

En effet, il s'agit d'une coupe thermique, tout comme la coupe avec un gaz pétrolier. Cependant, par rapport à la coupe de gaz LP, la quantité de chaleur d'entrée pendant la coupe est réduite à env. 60%, de sorte que l'apport de chaleur au métal de base est faible, ce qui réduit considérablement la distorsion thermique. Ainsi, le nouveau système de coupe peut produire des produits de haute précision. En plus la surface de coupe est lisse et les coins de la rainure coupée sont tranchants, ce qui assure une coupe de haute précision, ou une déviation de 1 mm ou moins des produits découpés, ceci a aussi pour effet de faciliter l'élimination de la crasse après la fin de l'opération.

Leur système de coupe à hydrogène consomme moins d'oxygène, et la vitesse de coupe est de 10 à 30% plus élevée que la coupe ordinaire à gaz, ce qui diminue le coût de fonctionnement d'environ 30%.

Le graphe de la figure II. 8 illustre clairement la différence entre la température d'entrée du chalumeau à hydrogène de KOMATSU et un chalumeau classique à gaz pétrolier, pour les conditions suivantes : Epaisseur : t16mm, rainure de 45 degrés ; Vitesse de coupe : gaz hydrogène 350 mm / min ; gaz LP 200 mm / min.

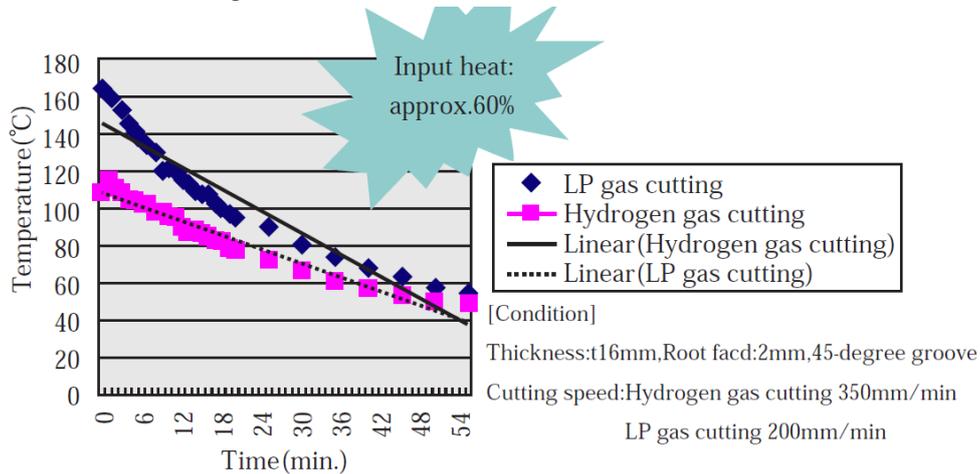


Figure II.8 : Evolution de l'écart de température entre chalumeaux au cours du temps.

Une étude comparative entre l'état de surface d'une pièce coupé par chalumeau oxyhydrique et un chalumeau oxyacétylénique [36]. Il a été prouvé expérimentalement que le découpage oxyhydrique montre moins de déformation et une zone plus étroite affectée par la chaleur que dans la coupe d'oxyacétylénique. Les macrographies de la figure II.9 montrent la différence entre les deux zones affectées par la chaleur produite avec différents gaz de combustion.

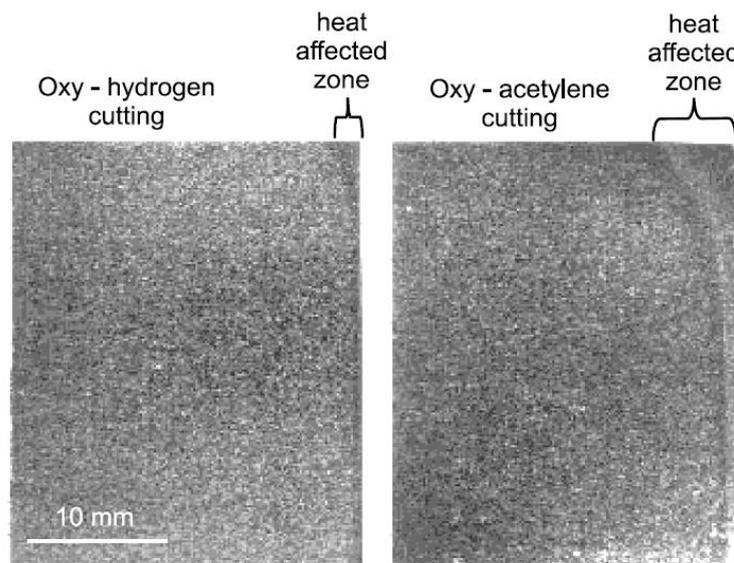


Figure II.9 : Comparaison de la zone affectée par chaleur de deux pièces lors d'un découpage.

*Chapitre III :*  
*Descriptif*  
*Du Dispositif Expérimental*

## CHAPITRE III: Descriptif du dispositif expérimental

---

### III.1. Introduction :

Ce chapitre a pour objectif la description générale du dispositif expérimental relatif au chalumeau à hydrogène. Y sont décrits la composition et le fonctionnement de deux dispositifs expérimentaux conçus. Chaque composant du dispositif conçu est accompagné d'une explication avec la méthode de fabrication. Une analyse comparative de performance entre les deux dispositifs est faite dans le but de choisir la configuration la plus rentable et de finir par des tests expérimentaux sur le dispositif choisi.

### III.2. Description et fonctionnement du chalumeau à hydrogène:

#### III.2.1. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau :

Il existe plusieurs méthodes pour produire de l'hydrogène. On ne s'est limité qu'à seulement une méthode, la plus courante : l'électrolyse de l'eau.

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique qui vise à séparer la molécule d'eau liquide en deux gaz, le dihydrogène et le dioxygène, sous la forme :



Cette réaction est produite lorsqu'un courant continu se déplace de l'anode à la cathode en passant par l'eau, il dissocie la molécule d'eau en ion ( $OH^-$ ) et ( $H^+$ ). Les ions d'hydrogène acceptent un électron à la cathode selon la réaction de réduction :



Pendant que dans l'anode, les ions d'hydroxyde perdent des électrons selon la réaction d'oxydation :



La combinaison de l'équation (3.1) et (3.2) donne l'équation (3.3).

Cette réaction nécessite entre 1,8 et 2,4 volts pour démarrer.

Pour obtenir de meilleurs résultats, un ajout d'électrolyte dans l'eau est nécessaire, car l'eau pure n'est pratiquement pas conductrice ce qui rend la réaction très lente.

L'électrolyte est une substance hydrosoluble qui se dissout et se dissocie en anions et cations. Les ions permettent au courant de se déplacer plus rapidement entre les électrodes. Généralement on utilise des acides, des bases ou des sels. Ainsi, le choix de l'électrolyte doit prendre en considération les ions libérés car ils vont entrer en compétition avec les ions

d'hydrogène et avec l'hydroxyde pour le gain ou la perte d'électrons. Il faut que le potentiel standard d'électrode des anions soit inférieur à celui de l'hydroxyde pour permettre la production du dioxygène et que le potentiel standard d'électrode des cations soit supérieur à celui des ions d'hydrogène pour qu'il y est production du dihydrogène.

De plus, tous les matériaux conducteurs peuvent être pris comme électrode, mais ils ne sont pas tous efficaces. A titre d'exemple, le cuivre et le fer sont de mauvais matériaux, car ils s'oxydent facilement et l'électrolyse augmente l'effet d'oxydation. Il est donc beaucoup plus avantageux d'utiliser des matériaux comme l'acier inoxydable, le platine ou le titane qui se rouillent très peu voir pas du tout.

### III.2.2. Types de générateurs :

Pour produire le dihydrogène et le dioxygène, nous allons utiliser un générateur du type HHO. Ce générateur est une succession de plaques métalliques reliées à un générateur de courant continue de sorte à alterner entre plaque reliée au pôle positif et plaque reliée au pôle négatif successivement. La figure III.1 montre le schéma de la disposition des plaques du générateur.

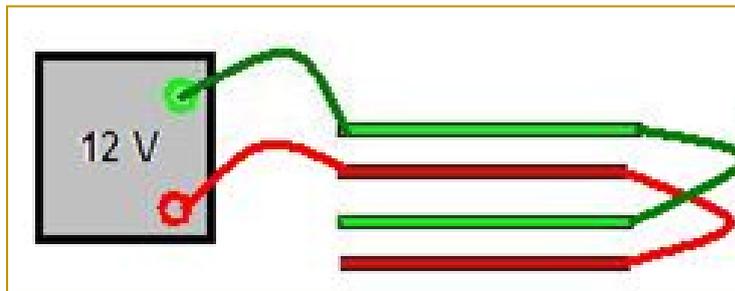


Figure III.1 : Schéma de la disposition des plaques.

Entre ces plaques, on met des plaques non connectées au générateur électrique qu'on appelle plaque neutres. Ces plaques vont jouer le rôle de pont pour les ions, ce qui aura pour effet de réduire la tension entre les plaques.

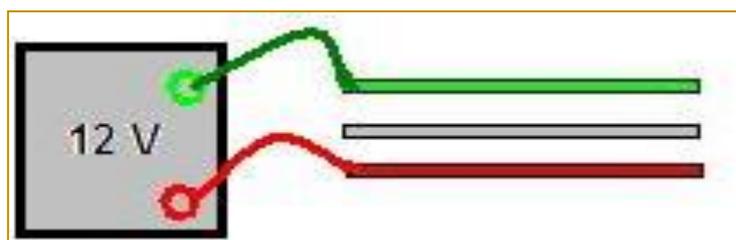


Figure III.2 : Schéma de la disposition des plaques avec plaques neutres.

Dans l'exemple représenté sur la figure III.1, la tension entre une plaque rouge et une plaque verte est de 12V. Si on pose une plaque neutre, comme sur la figure III.2, qui est un métal conducteur, elle sera soumise aux champs électriques créés par les deux autres plaques. Ces champs vont appliquer une force qui va attirer les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Le déplacement de ces charges vers les deux extrémités va créer un déséquilibre électrique et donc l'apparition d'un champ électrique induit, à l'intérieur de la plaque neutre, qui s'opposera au champ régnant. Le mouvement des charges cessera et la plaque sera chargée positivement du côté en face la plaque reliée au pôle négatif, et vis versa.

Si la plaque grise est équidistante par rapport aux plaques, rouge et verte, la tension entre la plaque neutre (grise) et la plaque rouge ou verte sera divisée en deux, donc de 6V.

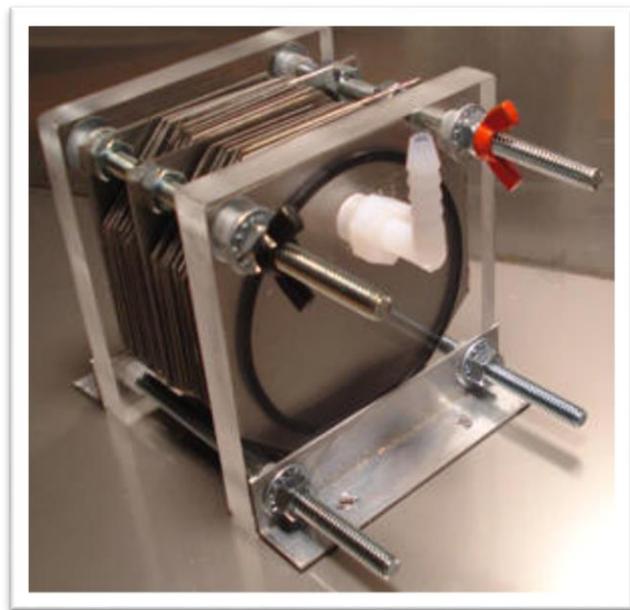
L'intérêt de rajouter ces plaques neutres réside dans l'augmentation de la surface de production des gaz tout en diminuant la tension entre les plaques du générateur afin d'éviter la surchauffe de l'eau et la présence de la vapeur d'eau dans notre mélange. De plus, il est difficile de trouver un générateur électrique qui peut produire un courant d'intensité élevée (cinquantaine d'Ampère) et une faible tension (entre 4 et 6 volts).

Toutes les plaques sont séparées par un isolant afin d'empêcher tout contact entre elles. L'ensemble de plaques positives et négatives s'appelle : cellule.

Il existe deux types de cellules : les cellules submergées où les plaques sont à l'intérieur de l'eau (Wetcell) et les cellules non submergées où l'eau circule entre les plaques et où le système est étanche (Dry cell). Les figures III.3 et III.4 montrent respectivement des photos de cellules, humide et sèche (Wet and Dry cells).



*Figure III.3: Wetcell.*



*Figure III.4 : Dry cell.*

Les deux types de cellules fonctionnent très bien. Chaque plaque de chacune des cellules agit à titre d'électrode. Contrairement à l'appareil d'Hoffman, les cellules sont beaucoup plus grosses, ce qui augmente la surface de contact. En ayant plus de surface de contact, les électrodes peuvent dissocier beaucoup plus de molécules d'eau à la fois donc produire plus de dihydrogène et dioxygène. Cependant, la cellule non submergée est beaucoup plus efficace, car l'eau est toujours en mouvement et renouvelée en faisant un cycle continu contrairement à une cellule submergée où l'eau est stagnante.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons réalisé deux prototypes de chalumeaux fonctionnant à l'aide d'un mélange d'eau (distillée ou pure) et d'électrolyte (sel ou une base forte). Généralement les électrolytes les plus utilisés sont : l'acide sulfurique, l'hydroxyde de potassium, l'hydroxyde de sodium (soude) ou le bicarbonate de sodium. On se propose de

vérifier si la cellule non immergée est plus efficace que la cellule immergée afin de porter notre choix sur le type à utiliser.

### III.2.3. Mode opératoire du dispositif à cellule immergée :

Le dispositif expérimental du chalumeau oxyhydrique avec cellule immergée est composé de 6 éléments : une batterie de 12V, une cellule produisant du dihydrogène et du dioxygène (wetcell), une boîte servant de récipient pour la cellule, un bulleur et un clapet anti-retour de flamme lié au bec du chalumeau.

Une fois le récipient rempli par la solution (eau distillée plus électrolyte), on ferme le robinet et on branche la cellule à la batterie, cette première commence à produire un mélange de dihydrogène et de dioxygène par électrolyse de l'eau. Le mélange gazeux est récupéré dans des tuyaux et est conduit vers le bulleur avant de passer au bec du chalumeau en passant par le clapet.

La figure III.5 montre une photo du dispositif à cellule immergée assemblé.

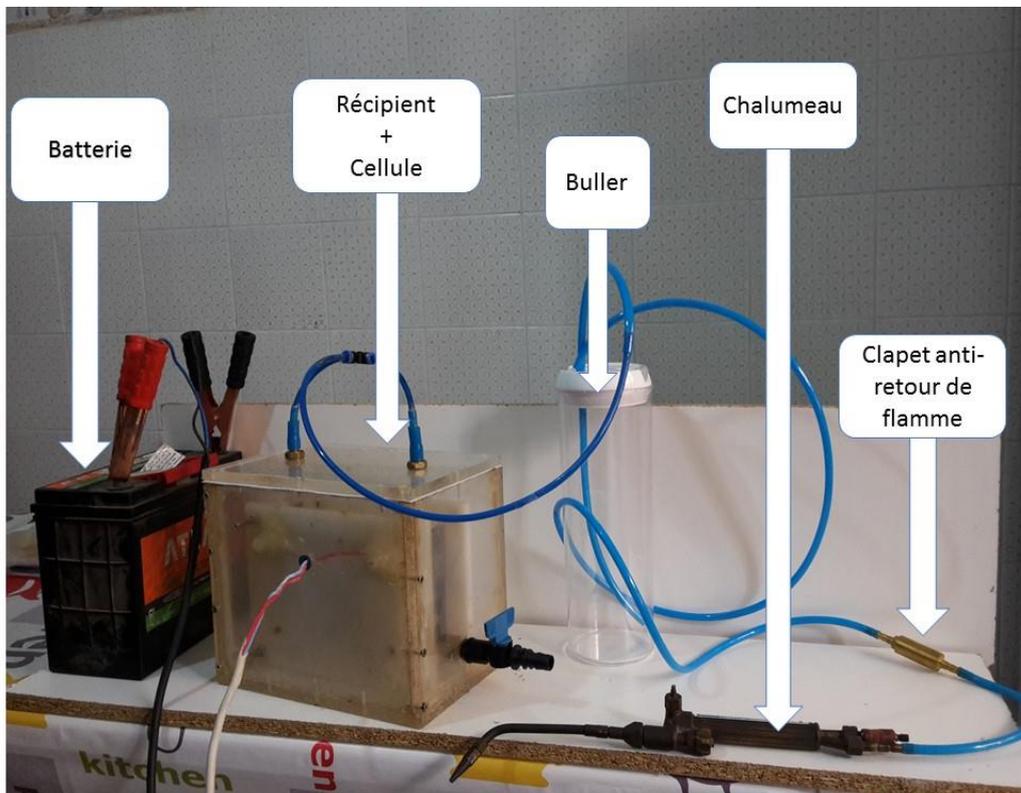


Figure III.5 Photo du dispositif à cellule immergée assemblé.

### III.2.4. Mode opératoire du dispositif à cellule non immergée :

Le dispositif expérimental du chalumeau oxyhydrique avec cellule non immergée est lui aussi composé de 6 éléments : une batterie de 12V, une cellule produisant du dihydrogène et du dioxygène (dry cell), un réservoir d'eau, un bulleur et un clapet anti-retour de flamme et un bec de chalumeau.

La différence entre cette cellule et la précédente réside dans le fait que cette cellule ne possède pas un récipient ou elle est immergée, mais un réservoir, par lequel l'eau s'écoule par gravité et circule entre les plaques où se fait la réaction d'électrolyse. Les gaz produits à l'intérieur de la cellule s'échappent par la sortie pour passer par le buller puis par le clapet anti-retour et se brûler au niveau du bec. La figure III.6 montre une photo du dispositif à cellule non immergée assemblé.

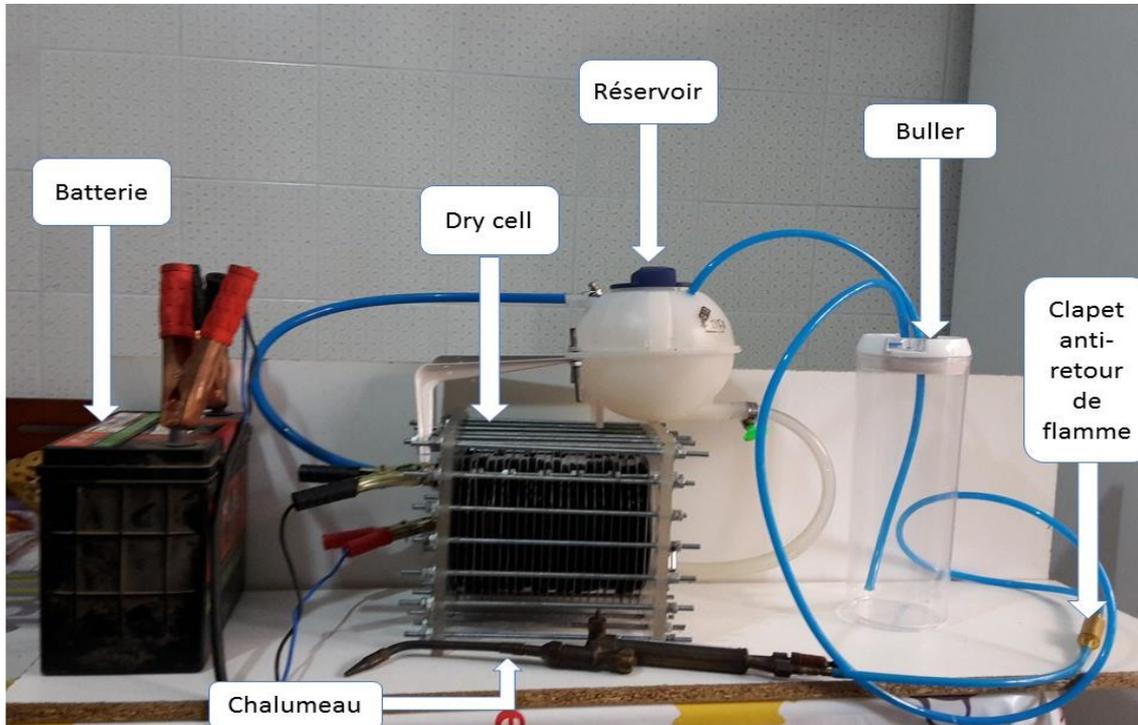


Figure III.6 Photo du dispositif à cellule non immergée assemblé.

### III.3. Processus de fabrication :

#### III.3.1. Processus de fabrication du modèle immergé :

##### III.3.1.1. Cellule de production immergée:

Le matériel utilisé est constitué de:

- Plaques en inox 304 épaisseur 0.5 mm ;
- Tiges filetées en inox  $\varnothing$  6 ;
- Ecrous en inox ;
- Une planche en plastique épaisseur 10 mm ;
- Joints en caoutchouc ;
- Un câble électrique 2 X 2.5 ;
- Un raccord en T.

Les outils utilisés sont:

- Guillotine ;
- Scie à ruban ;
- Perceuse.

La figure III.7 montre la photo plaques d'une cellule démontée.



Figure III.7: Photo montrant les plaques d'une cellule démontée.

Nous avons découpé, à l'aide d'une guillotine, 12 plaques rectangulaires de dimensions 120 X 170. L'un des coins de chacune de ces plaques a ensuite été chanfreiné de 30 mm. Nous avons effectué 3 trous de diamètre 8 mm au niveau des coins restants. L'un de ces trous sert à maintenir les plaques tout en les alimentant en courant électrique tandis que les deux autres ont pour utilité de faciliter le montage des plaques. La figure III.8 montre une photo de perçage des plaques.



Figure III.8: Photo de perçage des plaques.

Nous avons découpé la planche, à l'aide d'une scie sauteuse, en deux plaques rectangulaires de dimensions 180 X 230. Nous avons ensuite effectué sur chaque plaque huit trous de diamètre 6 mm. La tige filetée a été découpée en 8 morceaux de longueur 120 mm. Le joint en caoutchouc a été découpé en morceaux de longueur 120 mm.

Nous avons agencé les plaques l'une après l'autre de sorte à alterner les plaques reliées au pôle positif et celles reliées au pôle négatif. Entre chaque plaque, on a placé 3 bouts de caoutchouc qui servent d'isolants. Le contact entre la tige conductrice et la plaque est assuré à l'aide d'un écrou en inox. Les figures III.9, III.10 et III.11 montrent respectivement les photos d'agencement des plaques, de positionnement des joints d'étanchéité et d'isolation des câbles électriques.



Figure III.9: Photo de l'agencement des plaques.



Figure III.10: Photo du positionnement des joints d'étanchéité.

Les câbles électriques ont été connectés aux tiges métalliques puis recouverts d'une couche de résine de silicone afin de les isoler.

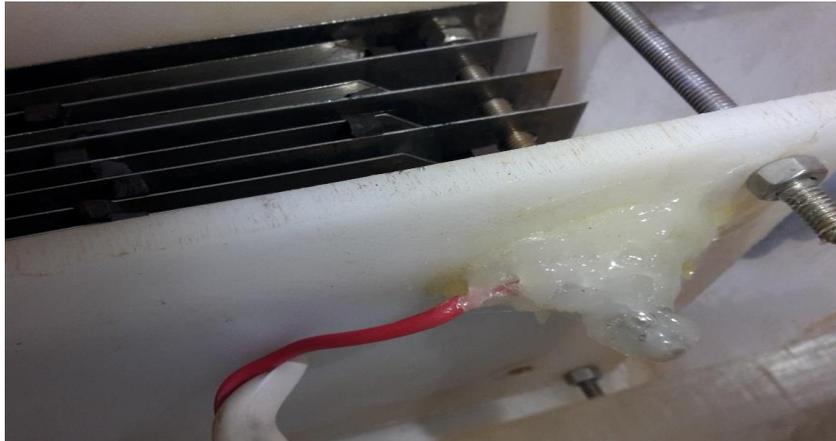


Figure III.11: Photo de l'isolation des câbles électrique.

### III.3.1.2. Récipient de la cellule :

Le matériel utilisé est:

- Plexiglas d'épaisseur 10mm ;
- Deux têtes en acier  $\varnothing$  12x15 ;
- Un robinet en plastique  $\varnothing$  15 ;
- Vis Parker 4x25 ;
- Chloroforme ;
- Ruban adhésif double face.

Les outils utilisés sont:

- Scie à ruban ;
- Perceuse.

Le récipient a été fabriqué grâce à une plaque en plexiglas. Celle-ci a été découpée à l'aide d'une scie à ruban en 3 paires de plaques de dimensions 16 X 20, 20 X 25 et 17 X 26. La figure III.12 montre le traçage de la plaque de plexiglas.



Figure III.12: Photo du traçage de la plaque de plexiglas.

Nous avons ainsi procédé à leur assemblage en utilisant une solution à base de chloroforme afin d'obtenir une boîte incassable, puis nous l'avons serré avec des vis. Les figures III.13 et

III.14 montrent respectivement, l'application du chloroforme à la cellule ainsi que son assemblage à l'aide de vis.



*Figure III.13: Photo montrant l'application du chloroforme à la cellule.*



*Figure III.14: Photo montrant l'assemblage à vis.*

Les brèches dues aux erreurs de mesure et de découpe ont ensuite été colmatées à l'aide d'une pâte constituée d'un mélange de chloroforme et de sciures de plexiglas rejetées lors de l'opération de découpe. Un trou taraudé effectué sur l'une des faces latérales du bloc permet la jonction du robinet permettant le remplissage et la vidange. Nous avons percé puis taraudé deux trous sur la face supérieure du réservoir afin de raccorder les deux tétines en laiton servant d'évacuation au mélange oxygène–hydrogène.

Les figures III.15 et III.16 montrent respectivement les photos du robinet de remplissage et de vidange et le couvercle du récipient.



*Figure III.15: Photo montrant le robinet de remplissage et de vidange.*



*Figure III.16: Photo montrant le couvercle du récipient.*

Cette face est raccordée au reste du réservoir par deux couches de ruban adhésif double face ainsi que par 8 vis. Cette double mesure est essentielle afin d'assurer l'étanchéité du réservoir, l'hydrogène étant particulièrement volatil.

**III.3.1.3. Bulleur :**

Le matériel utilisé est constitué de:

- Récipient hermétique ;
- Tuyau en polyuréthane Ø 8x6 ;
- Colle époxy.

L'outillage utilisé est une perceuse.

Le récipient servant de bulleur a été acheté dans le commerce pour son excellente herméticité et pour le gain de temps nécessaire à sa fabrication.

Il est rempli à moitié. Deux trous y ont été réalisés :

- le premier permet l'accès au tuyau venant du bloc de la cellule. Les deux tuyaux se rejoignent à travers un T pour n'en former qu'un seul qui conduira les espèces présentes directement vers le bulleur. Ce tuyau se retrouve immergé dans l'eau.
- le second permet l'échappement de l'oxygène et de l'hydrogène via un deuxième tuyau dont l'entrée est située au niveau du couvercle du bulleur et qui se dirige vers le bec du chalumeau.

La figure III.17 montre une photo du bouchon du bulleur.



*Figure III.17: Photo du bouchon de bulleur.*

Le bulleur a pour fonction :

- savoir que l'opération de production fonctionne correctement en observant des bulles d'oxygène et d'hydrogène s'échapper au niveau du tuyau immergé dans l'eau ;
- servir de dispositif de sécurité en cas de retour de flamme. Etant donné que la flamme ne peut pas se propager dans l'eau elle ne pourra pas atteindre la cellule ;

- augmenter la pression des gaz ;
- séparer la vapeur d'eau du mélange gazeux en le refroidissant.

#### III.3.1.4. Clapet anti-retour de flamme :

Nous avons utilisé un clapet à oxygène, capable de résister à une pression allant jusqu'à 20 bars. La figure III.18 montre une photo du clapet anti-retour de flamme.



Figure III.18: Photo du clapet anti-retour de flamme.

#### III.3.1.5. Chalumeau :

Un chalumeau de soudage, trouvé dans l'atelier du département du génie mécanique, a été utilisé dans notre dispositif expérimental. La figure III.19 montre une photo du chalumeau.



Figure III.19: Photo du chalumeau.

### III.3.2. Processus de fabrication du modèle non immergé :

#### III.3.2. 1. Cellule de production non immergée (dry cell) :

Le matériel utilisé est composé de :

- Plaques en inox 304 ;
- Joints toriques Ø 120 d'épaisseur 7 mm ;
- Plexiglas d'épaisseur 10mm ;
- Un câble électrique 2 X 2.5 ;
- Une tétine 12x15 ;
- Un raccord 12x12.

Les outils utilisés sont:

- Guillotine ;
- Scie à ruban ;
- Perceuse.

Nous avons découpé 23 plaques carrés de dimensions 150 X 150 à l'aide d'une guillotine.

La « dry cell » est composée de deux types de plaques : les plaques connectés à la batterie et les plaques non connectées (appelées plaques neutres). Nous avons donc effectué des plaques connectées (heptagonales) et des plaques neutres (octogonales), chacune de ces plaques a été chanfreiné de 40 mm sur chaque coin. Nous avons effectué un trou de diamètre 8 mm sur l'un des coins des plaques heptagonales pour qu'ils servent de liaison électrique et deux trous de 13 mm au milieu de chaque plaque pour permettre le passage de l'eau et des gaz entre les plaques. Les figures III.20 et III.21 montrent respectivement les photos, d'une plaque connectée et d'une plaque neutre.



*Figure III.20: Photo d'une plaque connectée. Figure III.21: Photo d'une plaque neutre.*

Nous avons découpé, à l'aide d'une scie à ruban, deux plaques carrées de plexiglas, de dimensions 210 X 210 et d'épaisseur 10 mm. Nous avons ensuite effectué sur chaque plaque 24 trous équidistants de diamètre 6 mm.

Le raccord a été placé sur l'une des plaques tandis que la tétine a été placée sur l'autre après avoir percé le plexiglas. Un collier a été placé sur le raccord afin d'assurer la liaison avec le réservoir grâce à un tuyau.

Les figures III.22, III.23 et III.24 montrent respectivement, les photos de la face avant de la « dry cell » (entrée d'eau), de la face arrière de la « dry cell » (sortie des gaz) et de la « dry cell » assemblée.

La tige filetée a été découpée en morceaux de longueur 250 mm.

Nous avons agencé les plaques l'une après l'autre de sorte à alterner les plaques reliées à la batterie et les plaques neutres. Entre chaque plaque on a placé un joint torique pour assurer l'étanchéité et l'isolation entre les plaques. Le contact entre la tige et les plaques conductrices est assuré à l'aide de deux écrous.



Figure III.22: Photo de la face avant de la dry cell (entrée d'eau).

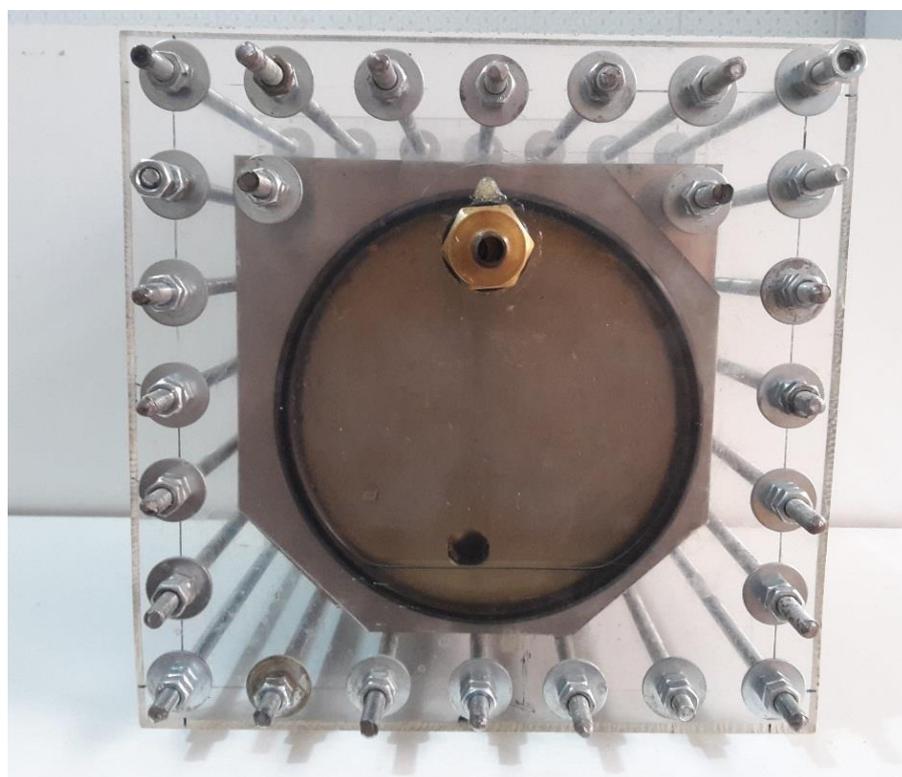


Figure III.23: Photo de la face arrière de la dry cell (sortie des gaz).

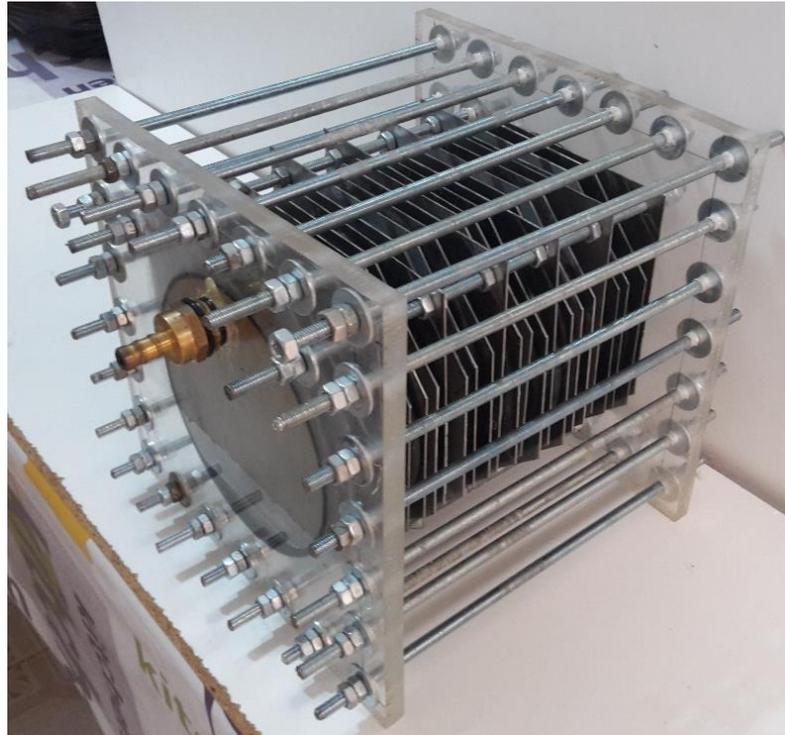


Figure III.24: Photo de la dry cell assemblée.

### III.3.2. 2. Réservoir :

Le matériel utilisé pour le réservoir est composé:

- réservoir de liquide de refroidissement pour voiture ;
- tuyau en polyuréthane  $\varnothing$  8x6 ;
- colle époxy.

L'outillage utilisé est une perceuse.

Le récipient servant de bulleur a été acheté dans le commerce pour son excellente herméticité et sa résistance à la pression, de plus il possède déjà 2 entrées moulées dans son plastique, ce qui nous faisait gagner du temps et nous assure une bonne étanchéité.

Un troisième trou de diamètre 7mm a été ajouté, par lequel nous avons fait passer un tuyau en polyuréthane  $\varnothing$  8x6 par serrage tout en rajoutant une couche de colle époxy pardessus pour assurer l'étanchéité.

Les figures III.25 et III.26 montrent respectivement les photos du réservoir et du 3<sup>ième</sup> trou du réservoir.

Le clapet anti-retour, le bulleur et le chalumeau sont les mêmes que ceux utilisés pour le dispositif à cellule immergée.



Figure III.25: Photo du réservoir.



Figure III.26: Photo du 3eme trou du réservoir.

#### III.4. Comparaison et choix de la cellule à utiliser :

Afin de choisir la cellule la plus performante, nous avons, tout d'abord testé la quantité de gaz que chaque cellule pourra produire. A cet effet, nous avons branché un débitmètre directement

à la sortie de chaque cellule et nous les avons mis en marche, dans les mêmes conditions : même générateur électrique, même solution, même tuyau et même surface de production.

La cellule non immergée fournit un débit plus important et donc produit plus de gaz (Voir chapitre résultats).

Nous avons branché les deux cellules au reste du dispositif et nous les avons faites fonctionner.

Il est à souligner que le dispositif à cellule non immergée a fonctionné correctement, tandis que celui à cellule immergée n'a pas marché, car le récipient de la cellule immergée n'a pas pu supporter la pression de fonctionnement du système. De plus, nous avons remarqué que la couche de silicone ne résiste pas à la chaleur des câbles et se détache, donc l'isolation des câbles était perdue après un court temps de fonctionnement.

Notons que la cellule immergée nécessite une grande quantité d'eau (6L), comparativement à la cellule non immergée qui elle ne nécessite que seulement 3L.

Tous ces résultats orientent directement notre choix vers la cellule non immergée (dry cell).

Une fois le choix de la cellule est fait, on va procéder à son montage avec le reste du dispositif.

3 cas de montages sont possibles :

- *1<sup>er</sup> cas :*

Comme montré sur la figure III.27, le 1<sup>er</sup> cas concerne un montage classique, où l'eau descend du réservoir pour se transformer en gaz à l'intérieur de la cellule et s'évacuer à travers une autre sortie.

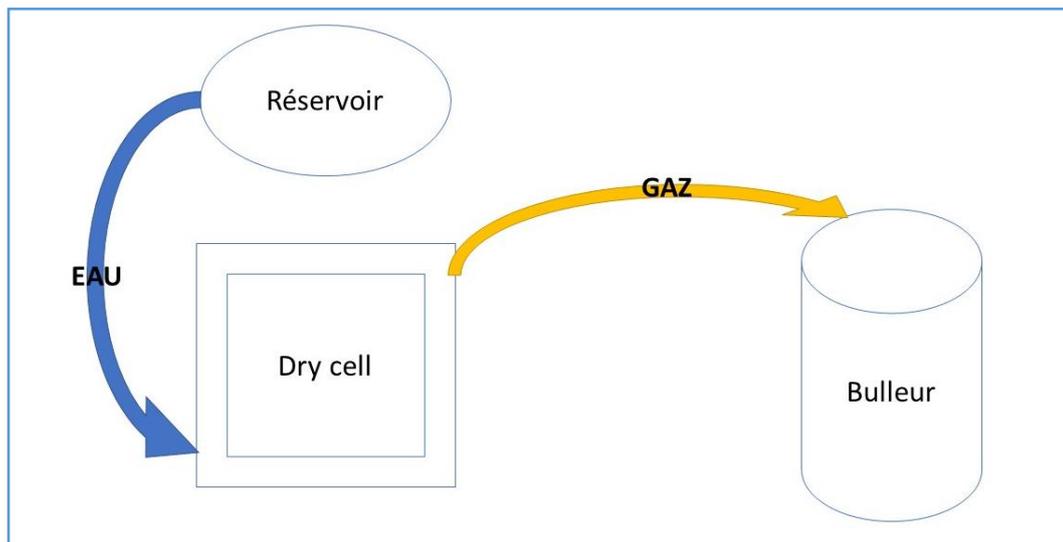


Figure III.27: Schéma du 1er montage.

Ce montage est assez efficace, cependant, toute la pression du système est endossée par le réservoir. En cas de surpression, le réservoir risque d'exploser. De plus l'eau ne pouvant circuler correctement dans la cellule, le rendement du système chute rapidement.

• 2<sup>eme</sup> cas :

Dans ce montage, le gaz sort par l'entrée de l'eau. Les deux fluides circulent dans le même tuyau dans des sens opposés comme le montre la figure III.28.

L'inconvénient de ce montage est que le gaz doit avoir suffisamment de pression pour vaincre la pression d'eau et sortir. On note que le gaz s'échappe sous forme de grandes bulles avec une faible fréquence. Ceci ne permet pas l'établissement d'un flux continu qui entretiendrait une flamme suffisamment stable.

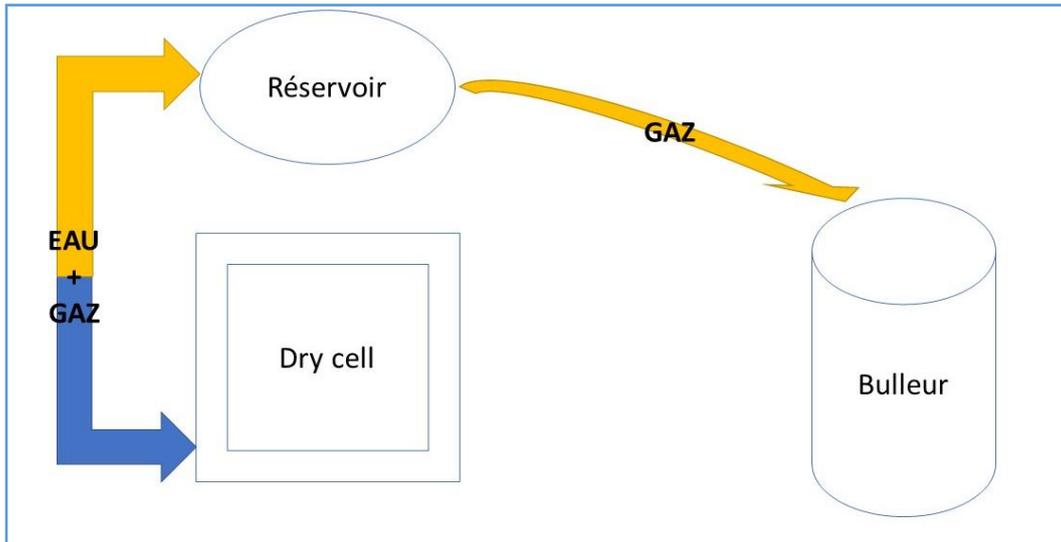


Figure III.28: Schéma du 2eme montage.

• 3<sup>eme</sup> cas :

Ce branchement est le plus efficace. L'eau s'écoule du réservoir vers la cellule en passant par sa propre entrée. Le gaz s'échappe par une autre sortie et remonte vers le réservoir puis à partir du réservoir il se dirige vers le bulleur par un 3<sup>eme</sup> tuyau. La figure III.29 montre le schéma de ce montage.

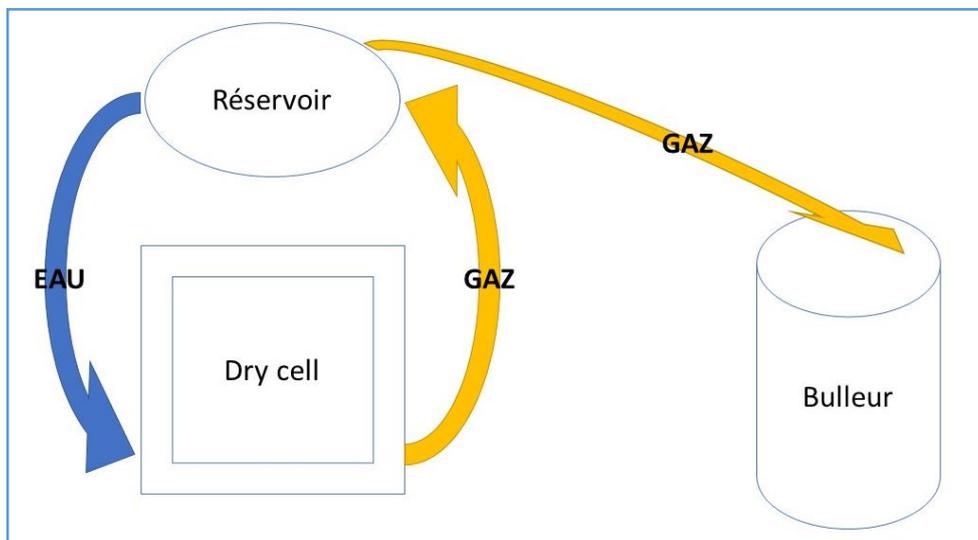


Figure III.29: Schéma du 3eme montage.

De plus, ce montage permet à la cellule de fournir un gaz sous pression suffisante et de manière continue. Le gaz dans le réservoir exerce une pression sur l'eau et assure une alimentation continue à la cellule. Le réservoir fera office d'un deuxième buller et augmente la sécurité du système.

*Tous ces constats nous ont permis de choisir le 3<sup>eme</sup> montage comme on peut le voir sur la figure III.29.*

*Chapitre IV:*  
*Combustion Hydrogène- Oxygène*

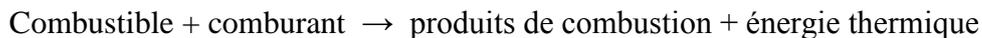
# CHAPITRE IV: Combustion Hydrogène- Oxygène

---

## IV.1. Introduction

Les phénomènes de combustion se composent de nombreux processus physiques et chimiques qui présentent un large spectre d'échelles de longueurs et de temps à déterminer. Une description mathématique de la combustion n'est toujours triviale, bien que certaines solutions analytiques des situations simples des flammes laminaires existent. Ces modèles analytiques sont généralement limités à des problèmes de zéro ou une dimension d'espace [37].

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



Plus précisément, cette réaction induit un fort dégagement de chaleur dans une zone très mince (les épaisseurs typiques 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  $\rho$ . Le taux de réaction est fortement non linéaire (Loi d'Arrhenius en laminaire).

Les combustibles les plus divers, qu'ils soient gazeux, liquides ou solides peuvent être utilisés : bois, charbon, hydrocarbures (méthane (CH<sub>4</sub>), propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), essence, gasoil, kérosène, fuel) et même l'hydrogène (H<sub>2</sub>), combustible étudié lors de ce projet de fin d'études. Le comburant est le plus souvent l'oxygène.

## IV.2. Combustion et nature des flammes :

Deux situations génériques idéales, schématisée ci-dessous, ont été identifiées, selon la procédure utilisée pour introduire les réactifs dans le foyer. Dans les flammes prémélangées (Figure IV.1), les réactifs, combustible et comburant, sont mélangés avant la zone de réaction. Au contraire, dans les flammes non- prémélangées ou de diffusion (Figure IV.2), les réactifs sont introduits séparément, de part et d'autre de la flamme et sont alors essentiellement entraînés l'un vers l'autre par diffusion moléculaire [38].

La combustion prémélangée est, a priori, plus efficace puisque les réactifs sont déjà en contact avant la combustion. Mais, une telle flamme est susceptible de se propager dans le mélange

combustible/oxydant jusqu'à l'endroit où s'effectue le mélange, ce qui pose des problèmes de sécurité. Cette sécurité peut être assurée par un clapet anti-retour.

La figure IV.3 montre le schéma de la structure d'une flamme laminaire de prémélange bidimensionnelle (gauche) et d'une flamme de diffusion (droite).

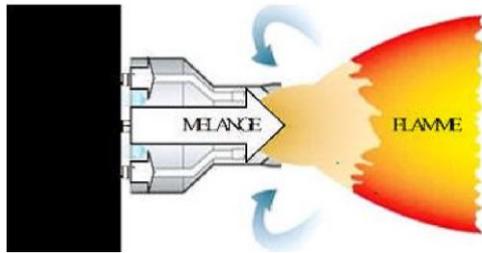


Figure IV.1: Flamme prémélangée.

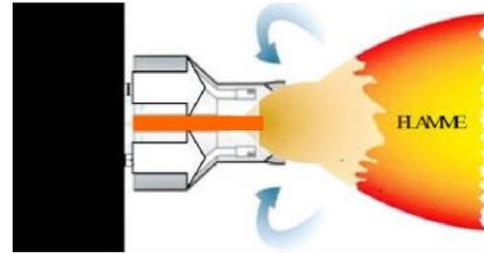


Figure IV.2 : Flamme non-prémélangée.

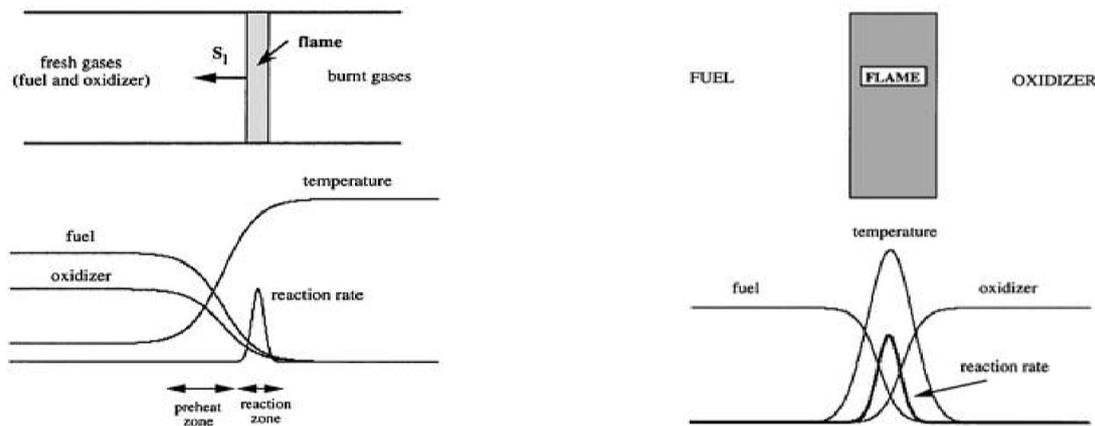


Figure IV.3: Schéma de la structure d'une flamme laminaire de prémélange bidimensionnelle (gauche) et d'une flamme de diffusion (droite) [Ref??].

Dans la combustion intervenant en milieu gazeux, il existe quatre situations génériques. Ces quatre situations sont résumées sur la figure IV.4, selon que l'écoulement est laminaire ou turbulent et où les réactifs sont prémélangés ou non. En pratique, la combustion a le plus souvent lieu au sein d'écoulements turbulents où les transferts sont plus intenses qu'en écoulement laminaire.

L'objectif des recherches en combustion est principalement axé sur la compréhension des phénomènes complexes qui entrent en jeu pour pouvoir les modéliser étant donné que l'objectif final est la simulation numérique complète d'un système industriel. En effet, les coûts de développement d'un prototype, qu'il s'agisse d'un moteur d'automobile ou d'un réacteur d'aviation, sont extrêmement chers. Ils pourraient être sensiblement réduits en optimisant, par simulation numérique, un foyer avant de construire un prototype aussi proche que possible du produit final [37]. Cette optimisation peut se faire selon différents critères suivant la destination finale du produit (rendement maximal, moindres émissions polluantes). Il s'agit aussi d'éviter, ou de contrôler l'apparition d'instabilités de combustion (couplage entre

hydrodynamique de l'écoulement, transfert de chaleur et champ acoustique qui conduit à de fortes oscillations des caractéristiques du système, augmentant les bruits et les transferts thermiques et pouvant conduire à une destruction rapide de l'installation). A l'heure actuelle, si certaines tendances sont bien reproduites par calcul, les simulations numériques prédictives se rapprochant de plus en plus de la réalité sont au stade de développement compte tenu de la complexité des phénomènes physiques ayant lieu en vue de leur modélisation.

**IV.2. 1. Echelles caractéristiques d'une flamme :**

Les écoulements prémélangés se caractérisent par le fait que le combustible et l'oxydant sont mélangés à une échelle moléculaire. Une augmentation de la température locale, l'ignition, peut démarrer le procédé de la combustion si l'écoulement prémélangé est dans les limites d'inflammabilité [39]. La combustion se fait sous la forme d'un front de flamme se propageant dans l'écoulement.

Le temps caractéristique de la chimie et les échelles de longueurs qui décrivent ces structures sont déterminées par l'étude de la structure interne d'une flamme laminaire de prémélange. La figure IV.5 représente la structure interne d'une flamme laminaire stationnaire. Les zones caractéristiques peuvent être identifiées par : la zone de préchauffage, la couche interne et la couche d'oxydation.

La zone de préchauffage est d'épaisseur  $O(1)$ . Elle est chimiquement inerte avec un équilibre de la convection et de la diffusion. Dans cette zone les gaz frais qui s'approchent de la flamme avec une vitesse  $S_L$  sont initialement préchauffés.

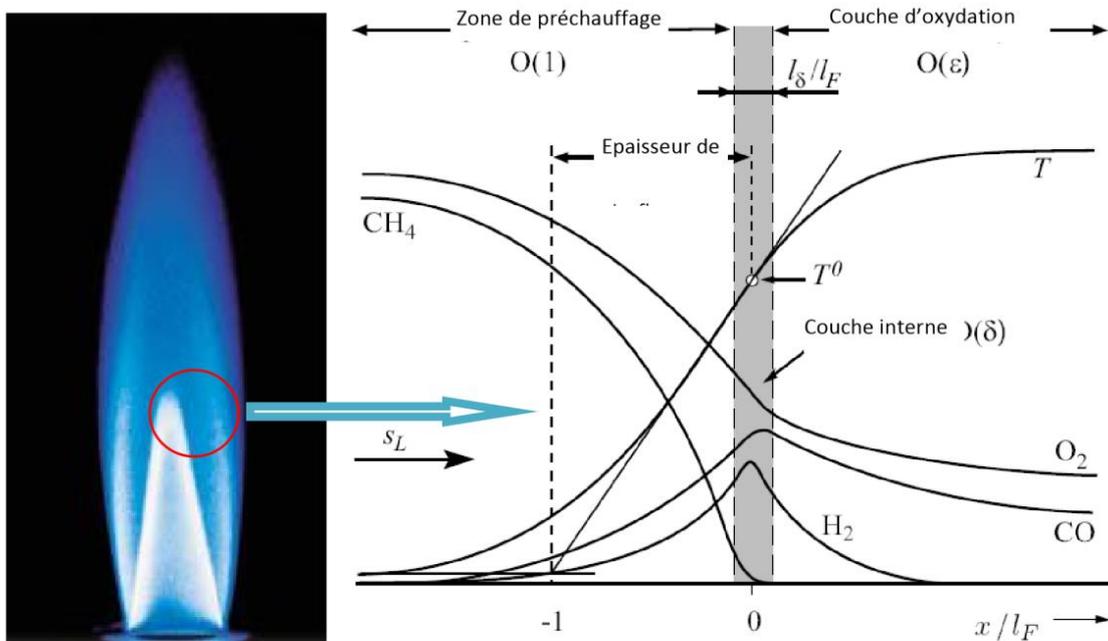


Figure IV.4: Structure interne d'une flamme laminaire stationnaire de méthane-air [40].

La couche interne est une zone mince réactive d'épaisseur  $O(\delta)$  [40]. Le combustible est consommé dans cette région avec un équilibre diffusif-réactif. La couche interne est caractérisée par sa température, qui correspond à la température de passage entre les réactions en chaînes de branchement et de rupture [41]. Le procédé de combustion est maintenu si la couche interne demeure intacte. Les réactions dans la zone interne peuvent s'interrompre si le transport de chaleur et des radicaux vers l'extérieur dépasse leurs productions dans la couche interne, ce qui provoque l'extinction de la flamme.

Dans la couche d'oxydation de taille  $O(\epsilon)$ , le CO et l'H<sub>2</sub> s'oxydent pour former le CO<sub>2</sub> et l'H<sub>2</sub>O. Ces réactions sont d'une importance mineure par rapport aux caractéristiques de la flamme.

Les échelles caractéristiques de longueur peuvent être identifiées dans la structure de la flamme laminaire. L'épaisseur de la flamme laminaire est approximée par la taille de la zone de préchauffage définie par [42]:

$$l_F = \frac{T^0}{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^0} = \frac{\left(\frac{\lambda}{c_p}\right)^0}{(\rho S_L)} \quad (4.1)$$

Où :  $\lambda$ , est la conductivité thermique ;  $C_p$ , la chaleur spécifique à pression constante ;  $\rho$ , la masse volumique et  $S_L$  est la vitesse de la flamme laminaire qui décrit la vitesse à laquelle le front de flamme prémélangée se propage dans la direction normale dans le mélange frais (c'est une propriété thermochimique).

### IV.3. Combustion laminaire :

On considère les flammes en milieu laminaire, c'est à dire en milieu où les échanges par diffusion turbulente sont pratiquement inexistantes. Si les flammes laminaires semblent n'intervenir que dans quelques applications plutôt anecdotiques (bougies et flamme de briquet), la compréhension de la structure de ces flammes est cependant fondamentale pour la description et la modélisation de nombreuses situations industrielles.

#### IV.3.1. Flamme laminaire prémélangée :

Le combustible et le comburant sont mélangés à l'avance, la propagation de la flamme est le résultat d'une opération composée de deux phénomènes [38]:

- un préchauffage qui se fait sur une épaisseur  $\delta_p$  où les réactions chimiques sont inexistantes et où les phénomènes convectifs et diffusifs de masse et de chaleur sont prépondérants ;
- Arrivant à un certain niveau de température, les gaz réagissent en dégageant de la chaleur. Il s'agit de la zone de réaction qui se déroule sur une épaisseur,  $\delta_r$ . Cet échauffement se fait sur une épaisseur,  $\delta_L$ , que l'on appelle épaisseur de la flamme

laminaire et qui peut être assimilée à la distance parcourue par la chaleur libérée par réaction pendant le temps,  $\tau_c$ , que dure cette réaction.

Ces zones se déplacent dans le milieu à une vitesse de propagation perpendiculaire au front de flamme que l'on appelle vitesse de flamme laminaire et que l'on note,  $u_L$ . Cette vitesse dépend de différents paramètres (nature des réactifs, richesse des mélanges et température des gaz frais) et est de l'ordre de 0.1 à 1 m/s [43]. On peut ainsi dire que le front de la flamme progresse de  $\delta_L$  pendant le temps de combustion  $\tau_c$ . Sa vitesse est de la forme :

**IV.3.2. Flamme laminaire non prémélangée :**

La caractéristique principale de la flamme non prémélangée, dite de diffusion, consiste en une zone de réaction séparant les réactifs (combustible et oxydant). Les profils des fractions massiques et de température sont présentés sur la figure IV.5.

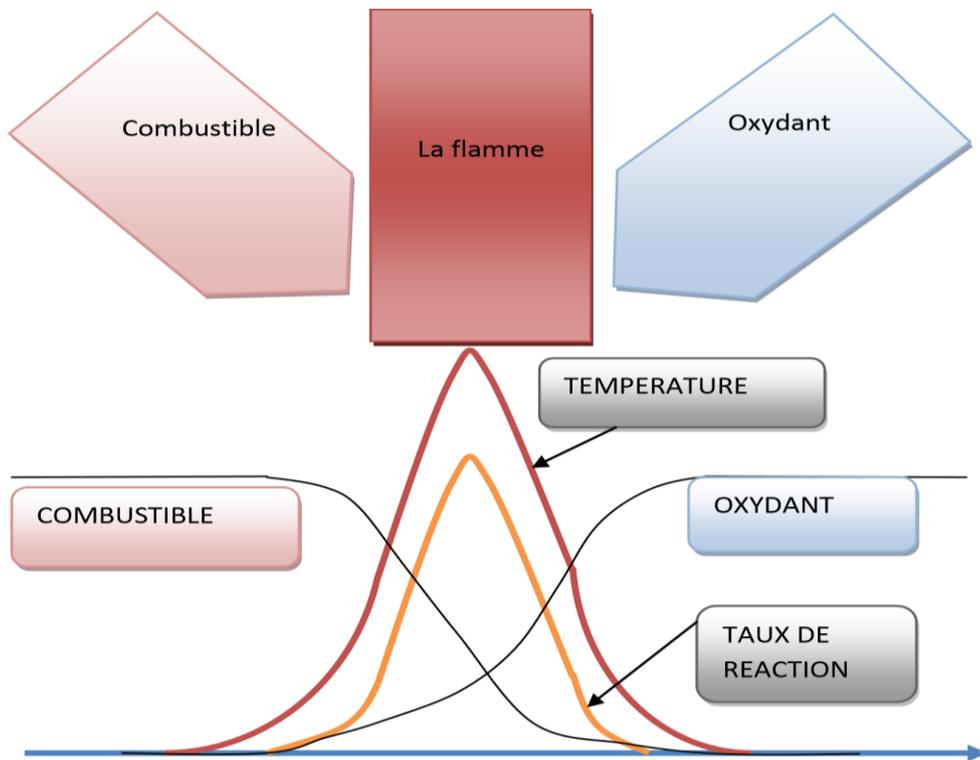


Figure IV.5: Profil d'une flamme laminaire non prémélangée.

Comme pour les flammes de prémélange, les flammes de diffusion se développent grâce au concours des phénomènes de réaction ainsi que des phénomènes de diffusion de chaleur et de masse qui se produisent de part et d'autre de la zone réactive [44]. Le phénomène de convection joue cependant un rôle plus important en amenant les réactifs et en emportant les produits de façon plus efficace que la diffusion seule. Pour que la flamme reste laminaire, il faut que les vitesses d'écoulement ne soient pas trop grandes. Le taux de réaction de ce type

de flammes est principalement contrôlé par diffusion moléculaire qui gouverne l'apport des réactifs vers les flammes.

#### IV.4. Combustion turbulente :

Dans un foyer, l'écoulement est turbulent, c'est-à-dire que la vitesse des gaz, mesurée en un point, fluctue continuellement de façon aléatoire, même en régime parfaitement établi. Cela est vrai aussi pour la température et toute autre caractéristique du milieu [38]. 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'obstacles tels que les injecteurs. Le taux de dégagement de chaleur et la structure de la flamme, varient selon des temps caractéristiques, qui sont souvent le temps de la réaction chimique,  $\tau_c$ , et le temps de fluctuation de l'écoulement,  $\tau_t$ .

En général, un écoulement turbulent peut être caractérisé par les propriétés suivantes :

- l'écoulement est instationnaire ;
- Incertitude (de mesure, de calcul) ;
- le vecteur de vitesse en un point varie de façon aléatoire en direction et en module ;
- l'écoulement contient un grand nombre de tourbillons de taille très variée ;
- augmentation du mélange : forte diffusion des quantités transportées (exemple le lait et le café, la fumée, etc...) ;
- les écoulements turbulents sont bruyants du fait des sources acoustiques créées par les fluctuations de pression dans le fluide. Cela peut générer de l'inconfort dans certains cas (exemple le bruit des rétroviseurs extérieurs des véhicules) ;

Les effets de la turbulence sont parfois positifs, parfois négatifs :

- Effets positifs : l'augmentation du mélange permet d'améliorer la combustion par exemple, d'améliorer la portance des avions, de réduire la température ;
- Effets négatifs : diffusion de la pollution.

##### IV.4. 1. Combustion turbulente prémélangée :

Dans la combustion turbulente prémélangée, les structures de la turbulence influent sur le front de la flamme qui peut avoir une vitesse de l'ordre de 10 m/s et une épaisseur allant de 1 mm jusqu'à 1m. Cette interaction peut produire une augmentation de la consommation de la masse et une augmentation de l'épaisseur globale de la flamme.

Damkohler[45], est le premier auteur à avoir décrit la combustion turbulente et introduit le principe de rides comme le principal mécanisme qui contrôle les flammes turbulentes. Dans une combustion turbulente,  $S_T$  est la vitesse à l'entrée du volume nécessaire pour maintenir la combustion turbulente stationnaire, cette vitesse est dite vitesse de la flamme turbulente.

On a vu que dans un écoulement turbulent réactif, la combustion dépend de la turbulence, aussi la combustion a une influence sur la turbulence. Quand la température passe du front de flamme vers celle des gaz frais, la viscosité et le nombre de Reynolds local sont modifiés en conséquence. Par exemple, pour l'air la viscosité est proportionnelle à  $T^{1.7}$ , pour une flamme avec taux de température de  $T_2/T_1 = 8$ , le nombre de Reynolds est 40 fois plus petit dans les gaz brûlés. C'est pourquoi on observe le phénomène de relaminarisation (après l'allumage l'écoulement turbulent peut devenir laminaire) [46].

**IV.4. 1. 1. Diagramme de la combustion turbulente prémélangée :**

On peut distinguer plusieurs types de flammes turbulentes prémélangées suivant la valeur des deux nombres caractéristiques  $(u'/S_L)$  et  $(l_t/\delta_L)$ ,  $u'$  et  $l_t$  sont la vitesse et la longueur caractéristiques de la turbulence qui règnent dans la flamme au point considéré.  $S_L$  est la vitesse, et  $\delta_L$  est l'épaisseur d'une flamme laminaire [47].

Trois droites divisent le diagramme de Borghi [48] en quatre domaines, chacun possède un comportement spécial. La figure IV.6 montre le diagramme de régimes de la combustion.

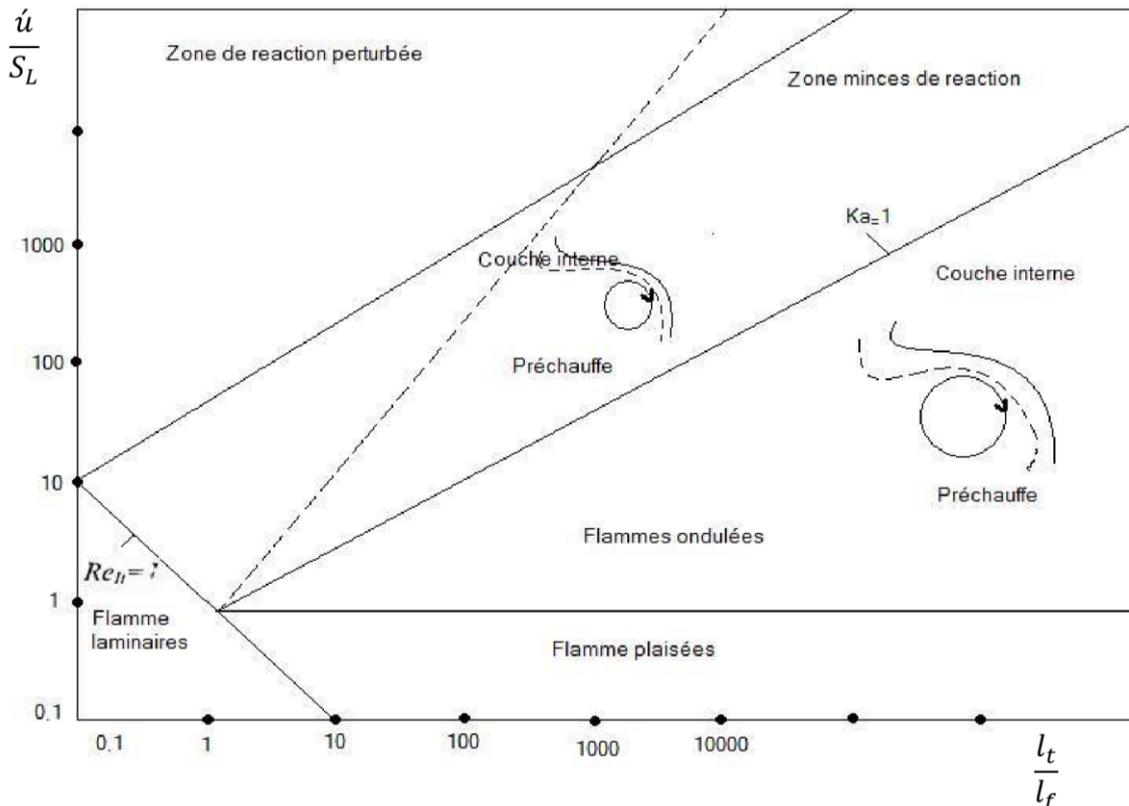


Figure IV.6: Diagramme de régimes de la combustion.

La première droite est pour un nombre de Reynolds turbulent égal à 1. La deuxième correspond au critère de Kilmov-Wiliams [48], qui égalise entre le temps global de la réaction  $\tau_c$  et le temps de Kolmogorov  $\tau_\eta$ , et la troisième est pour un nombre de Damkohler,  $D_a=1$ . Pour bien élucider cette opération, on va définir les différents paramètres utilisés ci- dessus dans le tableau IV.1

Tableau IV-1: Echelles temporelles et spatiales.

Echelle de	Flamme	Turbulence	Nombre
Temps	Temps global de la réaction $\tau_c$	Temps de Kolmogorov $\tau_k = \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2}$ Temps intégral $\tau_t = \frac{k}{\epsilon}$	$Da = \frac{\tau_t}{\tau_c}$ $K - W = \frac{\tau_k}{\tau_t}$
Longueur	L'épaisseur de la flamme laminaire $\delta_L$	L'échelle intégrale $l_t = \frac{k^3/2}{\epsilon}$ L'échelle intégrale de Kolmogorov $\eta_k = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4}$	$\frac{l_t}{\delta_L}$

D'après le diagramme de combustion, on peut remarquer qu'on a quatre régimes :

- Régime 1 ( $Re_t < 1$ ) :** Communément appelé : régime des flammes plissées, où les fluctuations turbulentes sont très petites devant la vitesse de propagation laminaire de la flamme  $S_L \gg u'$ . C'est à dire que les déformations du front de flamme à cause des tourbillons sont détruites par la propagation du front de flamme, donc la turbulence ne produit aucun effet sur la flamme qui reste laminaire, seulement des petits plissements peuvent être observés. Ce régime est nécessaire pour l'amélioration du procédé de combustion [38]. La figure IV.7 montre les différentes zones correspondant au régime 1 de combustion turbulente.

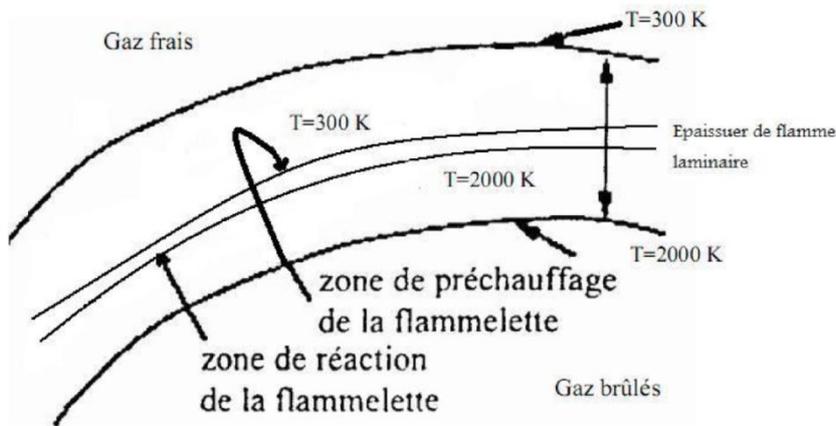


Figure IV.7: Régime 1 de combustion turbulente.

- Régime 2 :** Ce régime est limité par  $Re_t = 1$  et par  $\tau_c = \tau_k$ . Il est divisé aussi en deux sous régimes, le premier au-dessous de  $(u'/U_L) = 1$  où le front de flamme laminaire est affecté par les contraintes de la turbulence dont l'échelle spatial de Kolmogorov  $\eta_k$  est très grande devant  $\delta_L$ , ce qui correspond à ce que que la rotation des tourbillons de grandes échelles est supérieure à la vitesse de la flamme laminaire, ondulant aussi le front de la flamme. Seulement le front de flamme est déformé sans être déchiré, le second sous régime correspondant à  $(u'/U_L) > 1$ , entrainera une déformation

progressive des plissements, c'est le régime des flammes ondulées. La figure IV.8 montre les différentes zones correspondant au régime 2 de combustion turbulente.

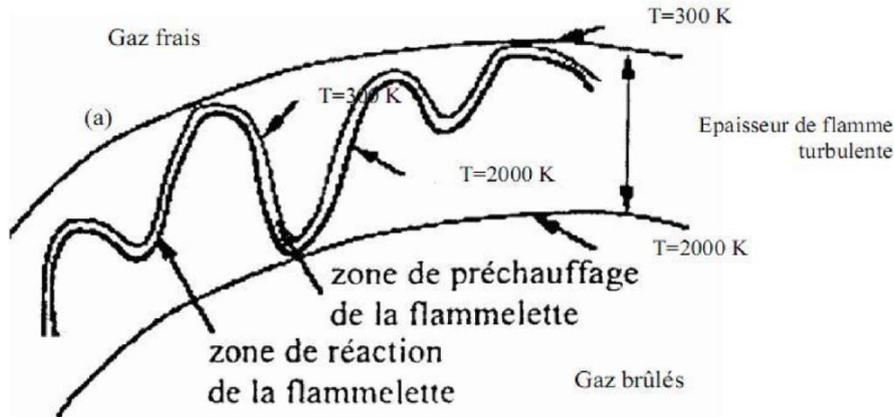


Figure IV.8: Régime 2 de combustion.

Les deux régimes 1 et 2, sont dits régimes des flammelettes.

- Régime 3 :** Ce régime est dit régime de la zone de réaction, limité par  $K - W = 1$  et par la droite  $D_a = 1$ . L'échelle de Kolmogorov  $\eta_k$  est donc petite devant l'épaisseur de la flamme laminaire  $S_L$  et  $\tau_c > \tau_k$ . Dans ce cas les contraintes dues aux petites structures de la turbulence peuvent influencer la structure interne du front de flamme instantané et donner lieu à son étirement qui peut modifier son épaisseur et sa vitesse de propagation laminaire. La figure IV.9 montre les différentes zones correspondant au régime 3 de combustion turbulente.

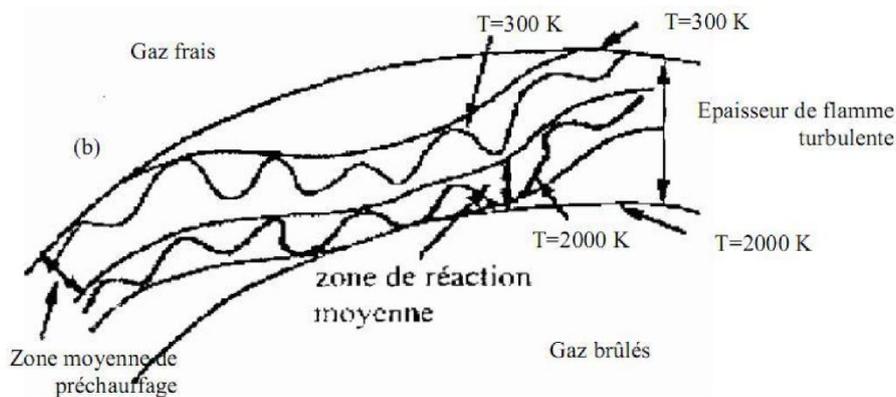


Figure IV.9: Régime 3 de combustion.

- Régime 4 :** Ce régime est appelé : régime de la zone perturbée. Il correspond à l'expansion du régime précédent et se caractérise par un nombre de Damkohler inférieur à 1. Dans ce régime, aucun plissement de flamme ne peut exister, on parle seulement de la zone de réaction et non pas de la flamme avec une épaisseur définie. En d'autres termes, les plus petits tourbillons pénètrent dans la couche interne, provoquant des ruptures locales des réactions chimiques dues à la perte de chaleur en direction de la zone de préchauffage et induisant une diminution de la température et

une perte des radicaux. La figure IV.10 montre les différentes zones correspondant au régime 4 de combustion turbulente.

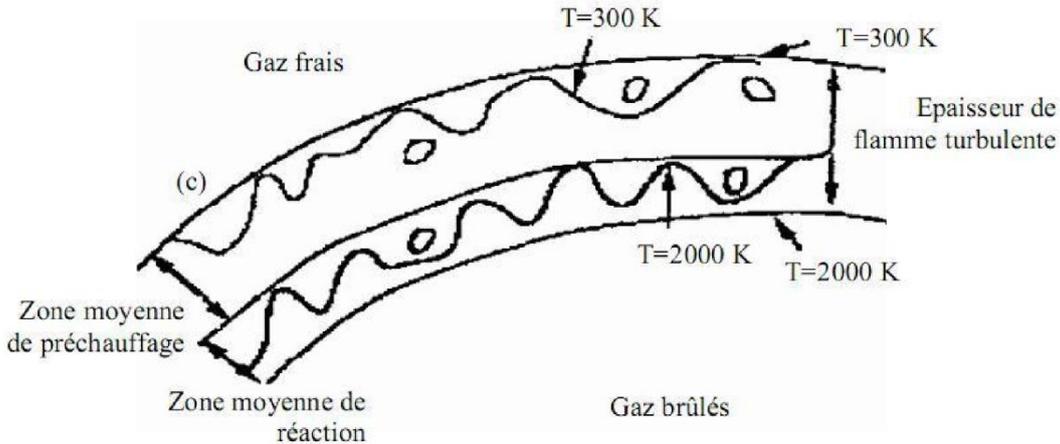


Figure IV.10: Régime 4 de combustion.

#### IV.5. Variables d'avancement de la réaction :

L'avancement de la réaction chimique ou de la flamme est le résultat d'un grand nombre de réactions chimiques élémentaires. Pour l'hydrocarbure le plus simple, une dizaine d'espèces intermédiaires et une centaine de réactions chimiques sont nécessaires. Cependant, il faut noter que peu de réactions influent sur le procédé général. Ainsi, l'avancement chimique peut être représenté par peu de variables et dans le cas le plus simple par une variable d'avancement de la réaction, C. Cette variable doit être normalisée et varie entre zéro (pour le mélange frais) et un (pour le gaz brûlé). La figure IV.11 montre un schéma définissant la variable d'avancement [49].

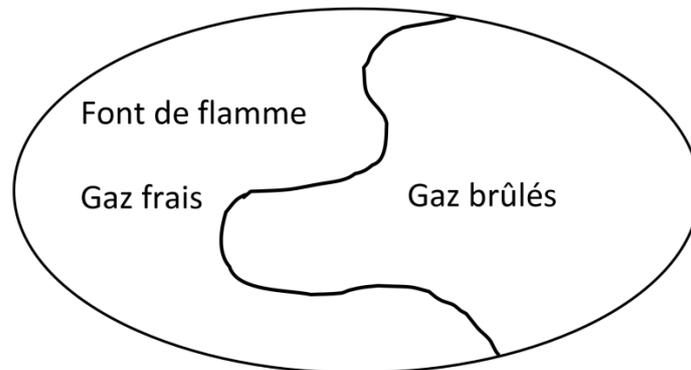


Figure IV.11: Schéma définissant la variable d'avancement.

Dans les systèmes adiabatiques fermés, la température varie d'une manière monotone en fonction du procédé chimique [49]. Dans ce cas, une fonction de la température normalisée peut définir la variable d'avancement de la réaction, C :

$$C = \frac{(T - T_f)}{(T_b - T_f)} \quad (4.2)$$

Où : T, représente la température locale effective ;  $T_f$ , la température des gaz frais et  $T_b$ , la température adiabatique des gaz complètement brûlés. La variable d'avancement peut être

également basée sur une fraction normalisée d'une espèce des réactifs ou de produit stable de la combustion. A titre d'exemple, Ferreira [49] utilisa la définition de, C, donnée par :

$$C = \frac{(Y_F - Y_{F,f})}{(T_{F,b} - T_{F,f})} \quad (4.3)$$

Avec :  $Y_F$ , la fraction massique réelle locale du combustible,  $Y_{F,f}$  et  $Y_{F,b}$  représentent respectivement les fractions massiques dans les conditions fraîches et brûlées.

## IV.6. Combustion de l'hydrogène :

Un gaz en réaction est un mélange non isotherme d'espèces multiples (hydrocarbures, oxygène, eau, dioxyde de carbone, etc.) qui doivent être suivies individuellement et instantanément. Les données thermodynamiques sont également plus complexes que dans l'aérodynamique classique car les chaleurs spécifiques changent dans le gaz réactif de façon significative avec la température et la composition :

- ♣ les espèces réagissent chimiquement avec des vitesses (taux de réactions) qui exigent des modélisations spécifiques ;
- ♣ étant donné que le gaz en réaction est un mélange de plusieurs espèces, les coefficients de transport (diffusivité thermique, diffusion des espèces, viscosité, etc...) nécessitent une attention particulière.

### IV. 6.1. Choix des variables primitives :

La combustion implique de multiples espèces qui réagissent dans diverses réactions chimiques. Ces espèces sont caractérisées par leurs fractions massiques,  $Y_k$  (k variant de 1 à N), où N est le nombre d'espèces dans le mélange réactif.

Les fractions massiques,  $Y_k$ , sont définies par [50]:

$$Y_k = \frac{M_k}{M} = \frac{\rho_k}{\rho} \quad (4.4)$$

Où :  $M_k$  et  $\rho_k$  sont respectivement la masse et la densité de l'espèce, k, présentes dans un volume donné V ; M est la masse totale de gaz dans ce volume.

Les variables primitives pour le cas tridimensionnel réactif sont :

- ♣ la densité :  $\rho = \frac{m}{V}$  ;
- ♣ les vitesses dans les trois directions  $u_i$  (i=1,2 et 3) ;
- ♣ une seule variable pour l'énergie (enthalpie h ou température T) ;
- ♣ les fractions massiques  $Y_k$  des espèces.

Il faut donc calculer (N+5) variables au lieu de 5 dans le cas non réactif. Sachant que la combustion implique un grand nombre d'espèces (N est supérieur à 50 pour la plupart des

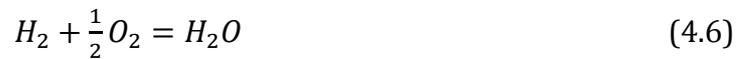
hydrocarbures simples), l'effort de calcul est considérable dans la simulation des écoulements réactifs (vu le nombre d'équations de conservation à résoudre).

#### IV.6.2. Approximation de la combustion par une seule réaction globale :

Pour simplifier les calculs, on approxime la combustion par une réaction globale d'une mole de comburant avec «  $\alpha$  » moles d'oxygène pour produire «  $\beta$  » moles d'un produit de combustion  $P_r$ . Ainsi, on a la réaction :



Pour la combustion de l'hydrogène, on a :



D'une part on facilite les calculs, et d'autre part perd des informations sur les espèces intermédiaires qui sont parfois très importantes.

D'après l'expérience, le taux de réaction du comburant est donné par l'expression :

$$\frac{d[X_F]}{dt} = -K_G(T)[X_F]^n[X_{ox}]^m \quad (4.7)$$

$K_G$  est le coefficient du taux global de réaction qui est généralement fonction de la température,

Les exposants  $n$ ,  $m$  sont reliés aux coefficients stœchiométriques de la réaction, d'après l'équation précédente le comburant est dit d'ordre  $n$  et le combustible d'ordre  $m$ .

#### IV.6.3. Schéma réactionnel :

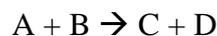
Les schémas réactionnels mettant en jeu plusieurs réactions élémentaires, peuvent être de différents types. Ainsi, on a les réactions :



C, étant un produit intermédiaire. Le schéma :



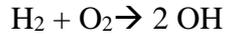
Possède des réactions en parallèle, donc concurrentes. Le schéma :



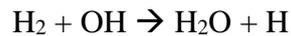
Possède les deux caractéristiques.

La plupart des mécanismes de combustion mettent en jeu des réactions en chaîne. Celles-ci jouent un rôle essentiel. On peut faire une représentation très schématisée suivant le processus de combustion de l'hydrogène dans l'oxygène. Le processus complet étant exothermique, c'est la raison pour laquelle il peut engendrer une flamme.

La réaction :



Produit des radicaux OH qui vont amorcer la chaîne, en réagissant de nouveau avec les réactifs initiaux, par :



Qui propage la chaîne, un radical à gauche en donnant un à droite. Ensuite H lui-même peut réagir :



La chaîne se ramifie car cette réaction produit un radical de plus qu'elle n'en consomme. On peut encore avoir une autre réaction de ramification :

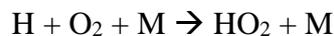


Ainsi, on voit bien que l'ensemble des trois réactions précédentes permet de consommer  $\text{H}_2$  et  $\text{O}_2$  dès qu'une petite quantité de radicaux OH a été produite, en utilisant les radicaux O et H qu'elles produisent et détruisent elles-mêmes.

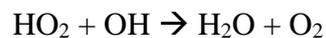
Des réactions de recombinaison des radicaux sont nécessaires pour permettre finalement la terminaison des chaînes. Les plus simples sont les réactions trimoléculaires suivantes :



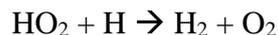
Néanmoins, un des processus de recombinaison de H les plus efficaces passe par un nouveau radical,  $\text{HO}_2$ , formé essentiellement par :



Puis détruit par :



Et :



Le rôle des réactions en chaîne dans les processus de combustion fut découvert par Semenov vers 1930 [23].

En réalité, le schéma réactionnel indiqué ci-dessus ne représente qu'une partie du mécanisme de la combustion  $\text{H}_2 - \text{O}_2$ .

#### IV.6.4. Taux de réaction et mécanisme réactionnel de combustion :

Le taux de réaction s'écrit, sous la forme [51]:

$$\frac{d[a]}{dt} = -K_{bimol}(T)[a][b] \quad (4.8)$$

Le coefficient  $K_{bimol}(T)$  est donné par [51]:

$$K_{bimol}(T) = AT^c \exp\left[-\frac{E_A}{R_u T}\right] \quad (4.9)$$

Cette formule est établie expérimentalement. Les constantes A, C et  $E_A$  (l'énergie d'activation) sont tabulées et donnée pour chaque mécanisme réactionnel [51].

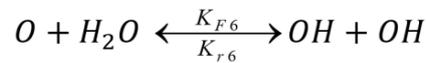
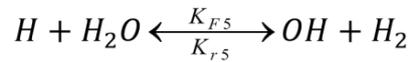
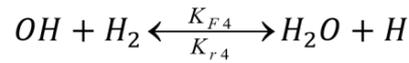
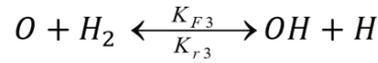
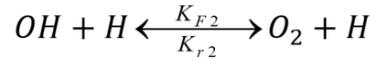
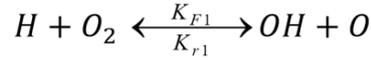
Le mécanisme réactionnel de la combustion de l'hydrogène se fait essentiellement suivant les réactions précédentes du mécanisme en chaîne citées plus haut, mais pour être plus complet on y ajoute généralement des réactions parallèles, ainsi que celles faisant intervenir  $H_2 - O_2$  qui sont importantes à des pressions supérieures à quelques bars. Un schéma dont les réactions sont réversibles et étant considéré sur bien des aspects est récapitulé dans le tableau IV.2.

Tableau IV-2: Schéma de réactions chimiques avec valeurs des coefficients.

Réaction	A	$\beta$	E
1 $H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2OH$	1,70E+13	0,000	47 780
2 $OH + H_2 \rightleftharpoons H_2O + H$	1,17E+09	1,300	3 626
3 $H + O_2 \rightleftharpoons OH + O$	5,13E+16	-0,816	16 507
4 $O + H_2 \rightleftharpoons OH + H$	1,80E+10	1,000	8 826
5 $H + O_2 + M \rightleftharpoons HO_2 + M$	2,10E+18	-1,000	0
6 $H + O_2 + O_2 \rightleftharpoons HO_2 + O_2$	6,70E+19	-1,420	0
7 $H + O_2 + N_2 \rightleftharpoons HO_2 + N_2$	6,70E+19	-1,420	0
8 $OH + HO_2 \rightleftharpoons H_2O + O_2$	5,00E+13	0,000	1 000
9 $H + HO_2 \rightleftharpoons 2OH$	2,50E+14	0,000	1 900
10 $O + HO_2 \rightleftharpoons O_2 + OH$	4,80E+13	0,000	1 000
11 $2OH \rightleftharpoons O + H_2O$	6,00E+08	1,300	0
12 $H_2 + M \rightleftharpoons H + H + M$	2,23E+12	0,500	92 600
13 $O_2 + M \rightleftharpoons O + O + M$	1,85E+11	0,500	95 560
14 $H + OH + M \rightleftharpoons H_2O + M$	7,50E+23	-2,600	0
15 $H + HO_2 \rightleftharpoons H_2 + O_2$	2,50E+13	0,000	700
16 $HO_2 + HO_2 \rightleftharpoons H_2O_2 + O_2$	2,00E+12	0,000	0
17 $H_2O_2 + M \rightleftharpoons OH + OH + M$	1,30E+17	0,000	45 500
18 $H_2O_2 + H \rightleftharpoons HO_2 + H_2$	1,60E+12	0,000	3 800
19 $H_2O_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + HO_2$	1,00E+13	0,000	1 800

#### IV.6.5. Mécanismes réactionnels et taux de réaction :

On a vu que chaque espèce dans le mélange gazeux doit être représentée par une équation de conservation. Cette dernière décrit l'évolution de l'espèce donnée dans l'espace et dans le temps. Dans le milieu réactif, plusieurs espèces entrent en compétition chacune avec un taux de réaction bien déterminé. Prenons une partie d'un mécanisme réactionnel de la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène ( $H_2 + O_2$ ) sous la forme :



Où :  $K_{fj}$  et  $K_{rj}$ , sont les coefficients du taux élémentaire de réaction dans le sens direct (gauche à droite) et dans le sens inverse de la réaction j.

Le taux net de production d'oxygène est la somme de tous les taux élémentaires des réactions qui produisent l'oxygène moins la somme de tous les taux élémentaires des réactions qui consomment l'oxygène. Ainsi :

$$\frac{d[O_2]}{dt} = K_{r1}[OH][O] + K_{r2}[O_2][H] + K_{r6}[OH][OH] - K_{f1}[H][O_2] - K_{f2}[OH][H] - K_{f6}[O] \quad (4.10)$$

De la même façon, on peut écrire cette expression pour chaque espèce qui participe dans le mécanisme. Cela donne un ensemble d'équations différentielles ordinaires du premier ordre qui représentent l'évolution du système chimique à partir des conditions initiales :

$$\frac{d[X_i](t)}{dt} = f_i\{[X_1](t), [X_2](t), \dots, [X_n](t)\} \quad (4.11)$$

Avec :  $[X_i](0) = [X_i]_o$

Une fois qu'on a trouvé le taux de réactions élémentaires, on peut résoudre les équations de conservations des espèces et finalement trouver toutes les variables primitives.

#### IV.6.6. Formulation générale pour le calcul du taux de réaction :

Un mécanisme réactionnel peut être écrit sous une forme compacte. Pour une réaction élémentaire i, qui combine N (j=1,N) espèces chimiques, on a [38]:

$$\sum_{j=1}^N \nu_{ji} X_j \Leftrightarrow \sum_{j=1}^N \nu_{ji} X_j \quad (4.12)$$

Où :  $v_{ij}$  et  $v_{ji}$  sont les coefficients stœchiométriques respectivement des réactifs et des produits.

Pour expliquer cette notation, reprenons les réactions qui combinent six espèces à savoir :  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $OH$ ,  $H$  et  $O$ .

On définit,  $j$ , comme espèce et,  $i$ , comme réaction selon la table ci- dessous :

Tableau IV-3: attribution des indices aux réactifs

j	Espèces	i
1	$O_2$	1
2	$H_2$	2
3	$H_2O$	3
4	$OH$	4
5	$H$	5
6	$O$	6

En utilisant,  $j$ , comme indice des colonnes et,  $i$ , comme indice des lignes, on aura une matrice de coefficients stœchiométriques.

$$V' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad Et \quad V'' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On remarque que la réaction élémentaire implique au maximum trois à quatre espèces réactives, ce qui fait que la matrice des coefficients est presque nulle lorsque le nombre d'espèce est grand.

Le taux de production de l'espèce,  $j$ , est calculé en sommant sur toutes les réactions,  $i$ . Il est donné par :

$$\omega_j = \sum_{i=1}^N v_{ji} q_i \quad (j=1.2...N) \quad (4.13)$$

Où :

$$q_i = K_{fi} \prod_{j=1}^N [X_j]^{v_{ji}} - K_{ri} \prod_{j=1}^N [X_j]^{v_{ji}}$$

Le taux de production  $\omega_j$  correspond au terme gauche de l'équation (4.13). On a pour un mécanisme complet :

$$\omega_j = \frac{d[X_i]}{dt} \quad (4.14)$$

L'équation (4.13) définit le taux de progression  $q_i$  pour la  $i^{eme}$  réaction élémentaire, on pose  $i=1$  en aura :

$$q_i = K_{f1}[O_2]^1[H_2]^0[H_2O]^0[OH]^0[H]^1 - K_{r1}[O_2]^0[H_2]^0[H_2O]^0[OH]^1[O]^1[H]^0$$

$$q_i = K_{f1}[O_2]^1[H]^1 - K_{r1}[OH]^1[O]^1 \quad (4.15)$$

De même, on écrit les expressions pour  $i=2,3...6$ , et on somme l'équation (4.15) pour obtenir le taux de réaction  $\omega_j$

Le calcul des constantes  $k_{fj}$  et  $k_{rj}$  constitue un problème central dans la modélisation de combustion. Souvent, elles sont modélisées par la loi empirique d'Arrhenius qui est basée sur l'observation expérimentale [38].

**IV.6.7. Domaine d'inflammabilité pratique :**

Les domaines d'inflammabilité de divers mélanges dans diverses proportions ont pu être établis expérimentalement. La connaissance du mécanisme réactionnel permet aussi de les calculer [38].

La figure IV.15 montre l'évolution de la pression en fonction de la température du mélange  $H_2 - O_2$ . La courbe qui limite le domaine a une forme caractéristique en S, ce qui traduit le fait que des mécanismes différents sont prédominants à différentes pressions. En particulier, la branche qui correspond à des pressions plus élevées que quelques bars ne peut être expliquée que par l'intervention de  $H_2O_2$  et des réactions associées.

On voit dans le plan pression-température les limites appelées première, seconde et troisième, qui forment une courbe en « S ».

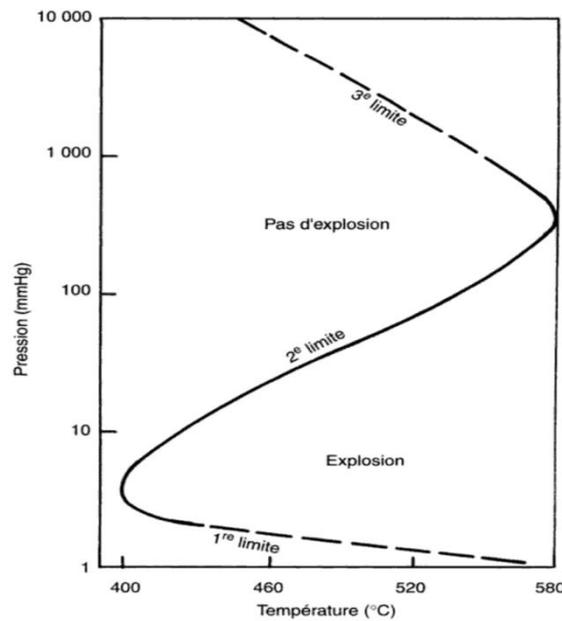


Figure IV.12: Domaine d'inflammation, ou d'explosion d'un mélange stœchiométrique hydrogène-oxygène.

### **IV.7. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons vu les différents types de combustion et les régimes concernant la combustion turbulente prémélangée, ainsi que l'influence de la turbulence sur la flamme et l'effet inverse. Y sont présentés, la formulation mathématique du phénomène, les détails de calcul du taux de production pour une réaction globale, la conservation des espèces ainsi que des notions sur la thermochimie et la stœchiométrie.

*Chapitre V :*  
*Résultats et Discussions*

## CHAPITRE V: Résultats et discussions

---

### V.1. Introduction :

Dans ce chapitre, deux aspects du projet sont présentés : un aspect expérimental et un aspect simulation numérique. L'aspect expérimental consiste globalement à certains essais expérimentaux et au dimensionnement de la cellule expérimentale afin de déterminer le nombre de plaques nécessaires pour atteindre un débit de gaz égal à 2,5 litres/min. L'aspect numérique, quant à lui, consiste en des simulations sur le logiciel ANSYS fluent, dans le but d'analyser la variation des propriétés de la flamme en fonction du débit et de la taille de la buse.

### V.2. Aspect expérimental de l'étude :

#### V.2.1. Eléments de dimensionnement des plaques de la cellule:

##### V.2.1.1. Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices utilisées dans le dimensionnement des plaques de la cellule expérimentale sont les suivantes :

- le gaz est considéré comme étant un mélange de gaz parfaits ;
- les conditions normales de pression et de température considérés sont: 1atm ; 25°C.
- le mélange gazeux produit par électrolyse est stœchiométrique ;
- le champ électrique entre les électrodes est uniforme ;
- l'électrolyte idéal est de l'hydroxyde de sodium (NaOH).

Les données et caractéristiques techniques relatives à la cellule sont :

- Matériaux des électrodes : Inox 304.
- Câble électrique en cuivre de diamètre 4mm et longueur de 4m.
- Distance entre les électrodes : 6mm.
- Surface active d'une électrode : 0,022088597 m<sup>2</sup>.
- Solution à une concentration de 0.9%.
- Générateur de courant continu de tension U=12V.

##### V.2.1.2. Lois utilisées pour le calcul :

Les lois utilisées pour le calcul sont : la loi des gaz parfait, la loi de Faraday, la loi d'Ohm, la loi des mailles et des lois relatives, au champ électrique, à la conductivité molaire et à la résistance électrique.

Ainsi, pour la loi des gaz parfaits, on a :

$$PV = nRT \quad (1.5)$$

La quantité de matière produite par électrolyse en faisant passer un courant « I » pendant un temps « t » est donnée par une loi dite, loi de Faraday et donnée par l'expression :

$$n = \frac{I.t}{F} \cdot \frac{1}{z} \quad (2.5)$$

Le vecteur densité de courant est définie come étant le produit de la conductivité par le vecteur champ électrique :

$$\vec{j} = k \cdot \vec{E} \quad (3.5)$$

Le champ électrique dérive d'un gradient d'un potentiel électrique suivant la relation :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (4.5)$$

La conductivité est la somme des produits des conductivités molaires «  $\lambda_i$  » par les concentrations de chaque espèces « ions » de la solution :

$$\sigma = \sum_i \lambda_i [X_i] \quad (5.5)$$

La résistance d'un fil de longueur « l », de section « S » et de résistivité «  $\rho$  » est donnée par la relation :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (6.5)$$

La loi des mailles fut énoncée par Kirchhoff comme suit :

$$\sum_i V_i = 0$$

Le volume d'une mole d'un gaz parfait dans les conditions normales de pression et température est :

$$V = \frac{R \cdot T}{p}$$

$$V = \frac{8,3144621 \times 298}{101325}$$

$$V = 24,453093 \text{ litres.}$$

Etant donné le mélange stœchiométrique, la fraction molaire du dihydrogène est :  $y_i = 2/3$ .

A partir de la loi de Faraday (2.5), on peut tracer le graphe représentant l'intensité de courant à fournir en fonction du débit volumique produit par électrolyse. La figure V.1 montre

l'évolution de l'Intensité de courant en fonction du débit volumique. On note que cette allure est linéaire.

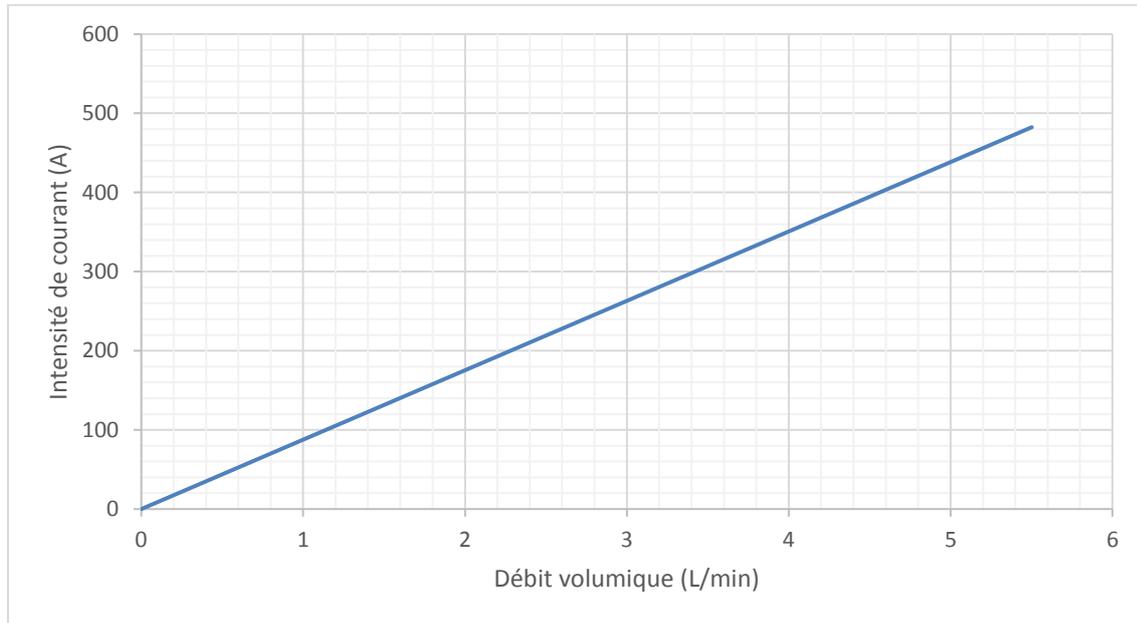


Figure V.1: Evolution de l'intensité de courant en fonction du débit volumique.

On peut voir que les valeurs de l'intensité de courant sont très élevées. Les câbles vont être soumis à des contraintes thermiques importantes. Pour notre cas, on utilise des câbles qui ont pour limite 250 Ampères.

Pour éviter toute surchauffe des câbles, on va viser les débits de 2,5 l/min. Ce qui correspond à 0,068157703 moles/min de dihydrogène.

Pour calculer l'intensité du courant nécessaire pour produire cette quantité de matière en 60 secondes, on applique la loi de Faraday :

$$I = \frac{n \cdot F \cdot z}{t}$$

Avec  $z=2$ , d'après l'équation (2.5), on aura :

$$I = \frac{0,068157703 \times 96485,3329 \times 2}{60}$$

$$I = 219,207291 \text{ Ampères.}$$

#### V.2.1.2. 1. Calcul de la différence de potentiels entre les deux pôles de la cellule :

Etant donné que nous avons une intensité de courant très importante (263 A) pour le débit désiré, on ne peut pas négliger la résistance du câble électrique.

En effet, le câble utilisé est en cuivre, sa résistivité,  $\rho = 17 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ , son diamètre,  $d = 4 \text{ mm}$  et sa longueur,  $l = 3 \text{ m}$ .

En appliquant l'équation (6.5) on obtient :  $R_c = 5,4112 \cdot 10^{-3} \Omega$ . La tension correspondante du câble est :  $V_c = 1,1862$  volt.

Maintenant il suffit d'appliquer la loi des mailles pour calculer la tension aux bords de la cellule expérimentale :

$$V = U - V_c$$

$$V = 10,813816 \text{ Volts}$$

### V.2.1.2. 2. Calcul de la densité de courant :

La concentration de NaOH est de 0.9% égale à :  $250 \text{ mol. m}^{-3}$ .

$$\lambda_{Na^+} = 5,01 \text{ mS.m}^2.\text{mol}^{-1}, \lambda_{OH^-} = 19,86 \text{ mS.m}^2.\text{mol}^{-1}$$

La conductivité de la solution :

$$\sigma = (\lambda_{Na^+} + \lambda_{OH^-}) \cdot c$$

$$\sigma = 6,2175 \text{ S.m}^{-1}$$

La densité de courant :

$$j = \sigma \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

L'intensité de courant entre chacune des deux électrodes est:

$$i = j \cdot S$$

Le nombre d'électrodes nécessaires est :

$$N = \frac{l}{i}$$

D'après les trois dernières équations, il est aisé de déduire que c'est le choix de la distance entre les deux électrodes extrêmes ( $\Delta x$ ) qui va déterminer le nombre d'électrodes nécessaires.

Pour cela, nous avons fait un calcul par itération pour déterminer le nombre de plaques nécessaires pour chaque valeur de  $\Delta x$  (voir annexe).

Afin de choisir le nombre de plaques idéales, on prend en considération la distance que va occuper nos électrodes, plus le fait qu'on doit avoir le même nombre d'anode et de cathode afin d'avoir un mélange stœchiométrique. Les plaques sont agencées selon la configuration : Anode - joint- électrode neutre – joint - cathode.

Les figures V.2 et V.3 montrent respectivement, l'évolution du nombre d'électrodes nécessaires en fonction de la distance  $\Delta x$  théorique, et, l'évolution de la distance  $\Delta x$  réel et théorique en fonction du nombre d'électrodes.

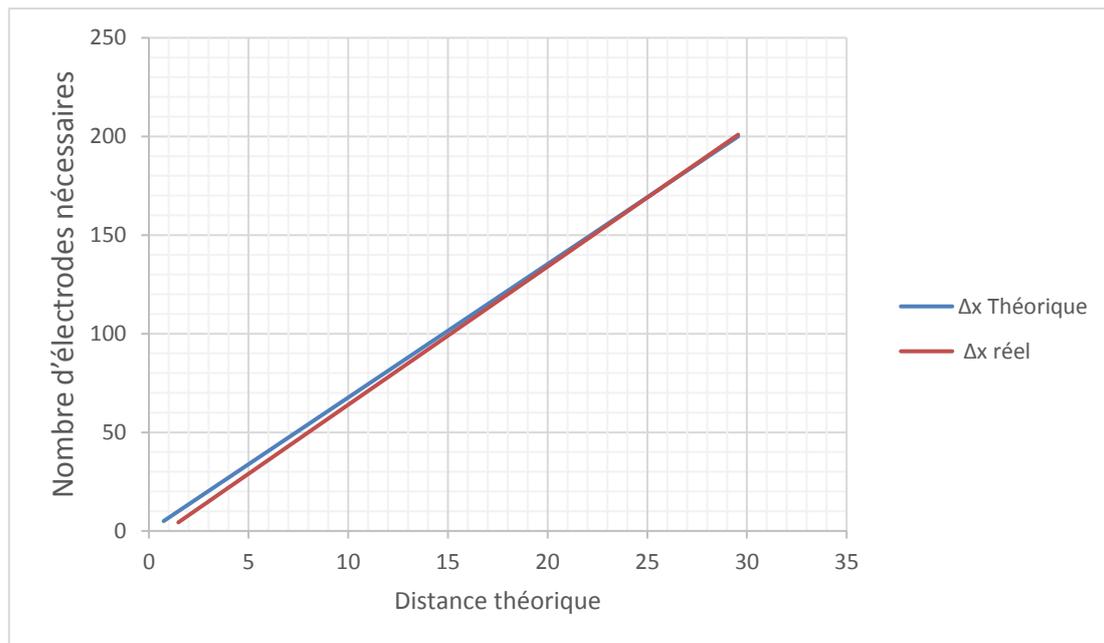


Figure V.2: Evolution du nombre d'électrodes nécessaires

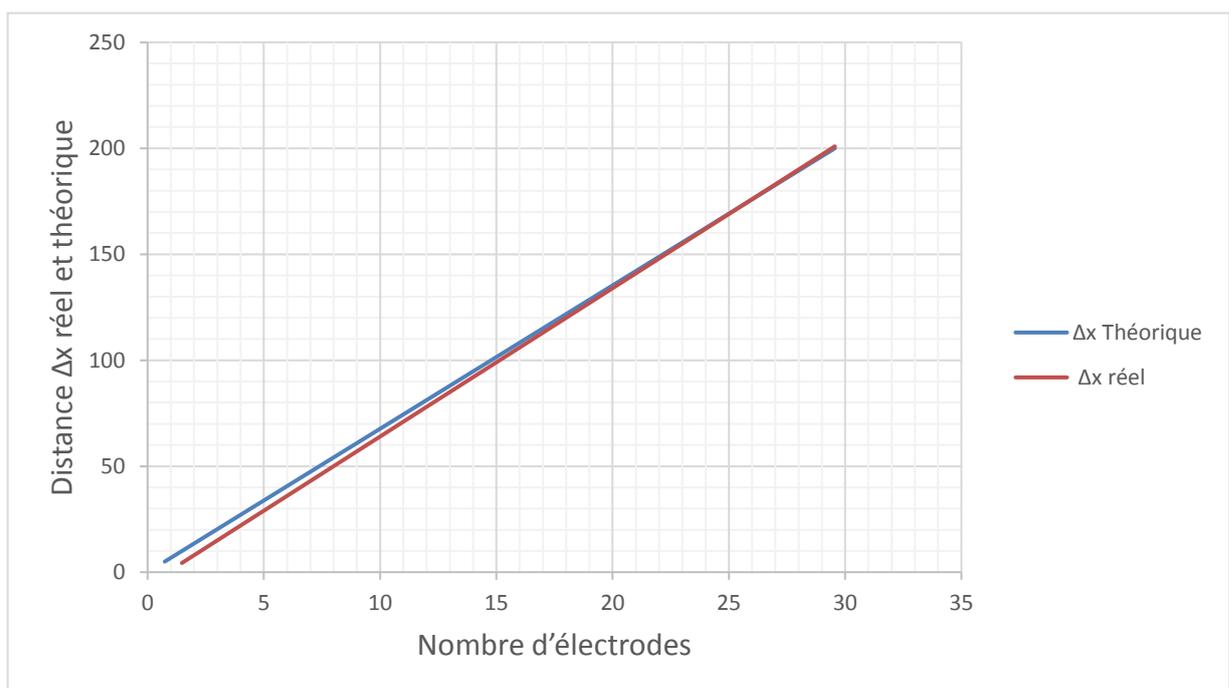


Figure V.3: Evolution de la distance  $\Delta x$  réel et théorique

On note que les valeurs théoriques et réelles de la distance  $\Delta x$  commencent à être confondues à partir de 20 électrodes. Ainsi, afin de raffiner notre choix, on doit prendre en considération un 3<sup>ème</sup> paramètre qui est : l'intensité de courant entre deux électrodes.

L'intensité de courant doit être minimale afin de minimiser la surchauffe de l'eau par effet joule.

La figure V.4 montre l'évolution de l'intensité de courant entre chaque électrode en fonction de  $\Delta x$ .

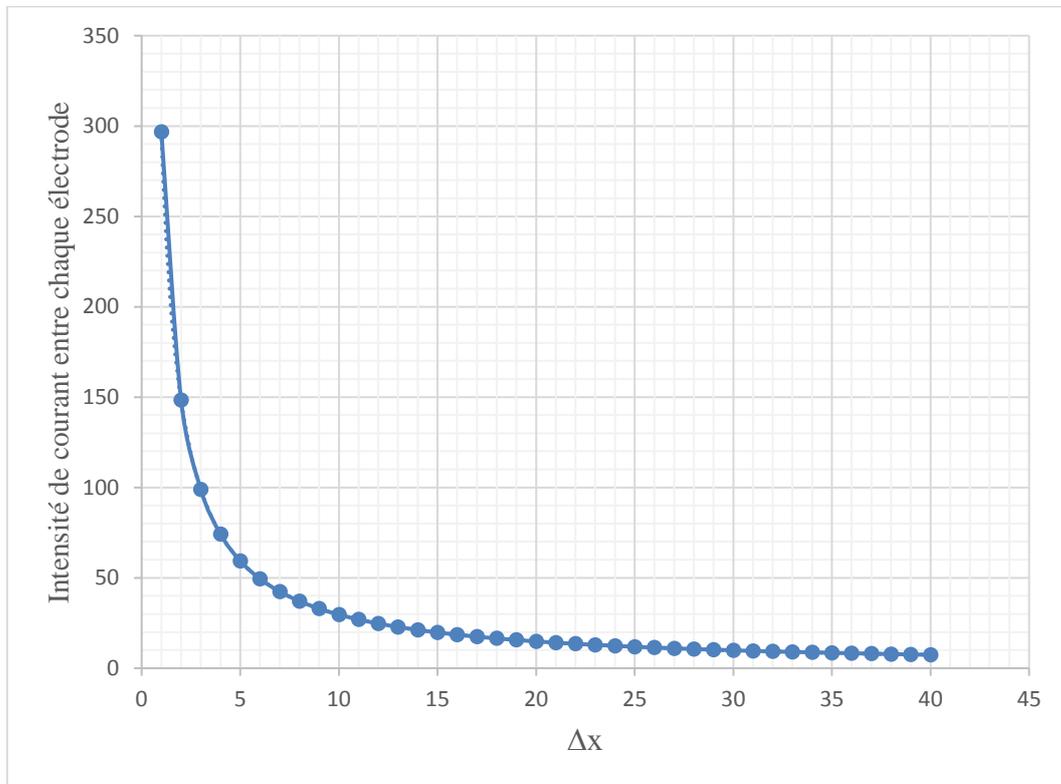


Figure V.4: L'intensité de courant entre chaque électrode en fonction de  $\Delta x$ .

La lecture du graphe montre que l'intensité de courant commence à devenir minimale à partir de 20 électrodes aussi.

En couplant les résultats de calcul aux conditions posées ci-dessus, et en prenant en considération le facteur économique, c'est-à-dire chercher le minimum de plaques, On est arrivé à la conclusion que le nombre de plaque répondant à notre besoin est de 23. Ainsi, **la cellule expérimentale améliorée comprend 23 plaques au total, dont 12 plaques connectées et 11 plaques neutres.**

#### V.2.1.2.3. Détermination du rendement faradique de la cellule:

Pour déterminer le rendement faradique de la cellule, nous devons mesurer l'intensité du courant total. A cet effet, nous avons mesuré l'intensité de courant entre chaque deux électrodes. Les résultats de mesure sont présentés dans le tableau V.1.

A partir de l'équation (2.5), on peut calculer le rendement faradique,  $\eta_f$ , de notre cellule .  
Ainsi :

$$\eta_f = 84,18 \%$$

Tableau V-1: Valeurs de la mesure de l'intensité de courant entre deux électrodes.

Espacement	Intensité de courant (A)
1	13,4
2	13,4
3	13,1
4	12,94
5	13,1
6	13,34
7	12,44
8	13
9	13
10	13,4
11	12,56
12	12,76
13	13,13
14	12,69
15	13,07
16	12,88
17	12,96
18	13,43
19	13,21
20	12,89
21	12,96
22	13,2
<b>I<sub>Rel</sub></b>	<b>260,4</b>

Le rendement faradique est assez satisfaisant. Ce résultat était prévisible vu que dans nos calculs nous n'avons pas pris en compte des éléments tel que : les écrous, les tiges filetées, et les surfaces non actives des plaques.

## V.2. 2. Essais expérimentaux :

### V.2.2.1. Influence de la concentration massique sur la conductance :

Notre chalumeau nécessite un soluté dissout dans l'eau distillée afin de fonctionner. A cet effet, nous nous sommes intéressés à l'influence que possède la concentration massique en soluté sur la conductance de la solution pour deux solutés différents (Bicarbonate de sodium et hydroxyde de sodium) afin de trouver le plus conducteur des deux.

Le tableau V.2 donne les valeurs de la conductance en fonction de la concentration massique du bicarbonate de sodium.

La figure V.5 montre l'allure de la courbe donnant la conductance en fonction de la concentration massique du bicarbonate de sodium. On note l'allure quasi- linéaire de cette courbe d'évolution de la conductivité.

Le tableau V.3 donne les valeurs de la conductance en fonction de la concentration massique de l'hydroxyde de sodium.

Tableau V-2: Valeurs de la conductance en fonction de la concentration massique

Concentration massique (%)	Conductance (mS)
0	0,023
0,2	2,08
0,4	2,79
0,6	4,51
0,8	6,13
1	7,4
1,2	9
1,4	10,14
1,6	11,71
1,8	12,6
2	13,5
2,5	16,58
3	19,44
3,5	22
4	23,8
5	27,3
6	32,3

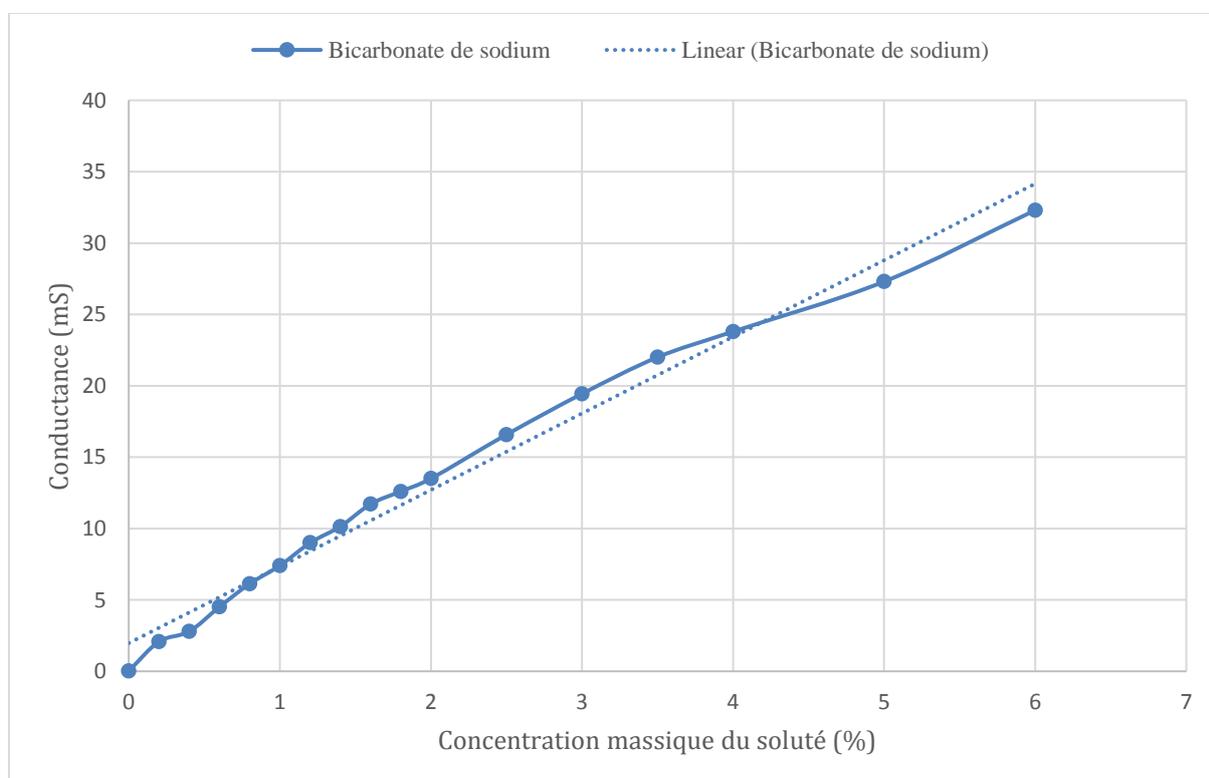


Figure V.5: Conductance en fonction de la concentration massique du bicarbonate de sodium.

Tableau V-3: Valeurs de la conductance en fonction de la concentration massique de l'hydroxyde de sodium.

Concentration massique (%)	Conductance (mS)
0	0,023
0,2	6,2
0,4	12,85
0,6	22,3
0,8	29,3
1	38,2
1,2	46,5
1,4	55
1,6	63
1,8	70,5
2	79
2,5	95

La figure V.6 donne l'évolution de la conductance en fonction de la concentration massique de l'hydroxyde de sodium. On note que plus la concentration du soluté est importante et plus la conductance est importante aussi.

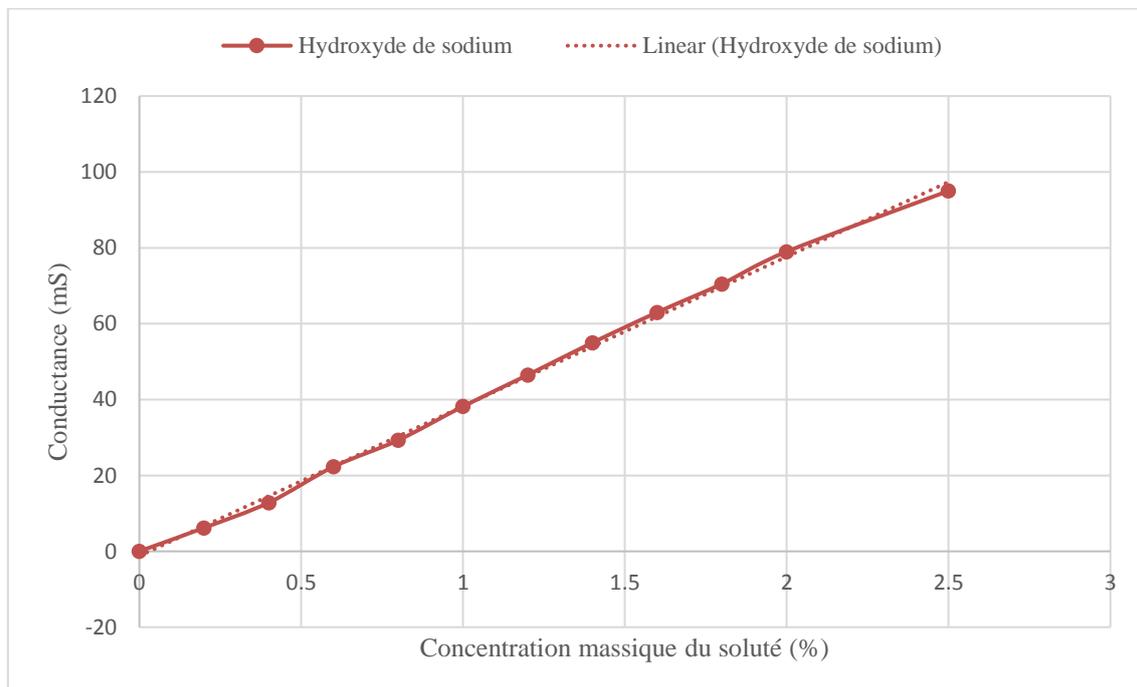


Figure V.6: Conductance en fonction de la concentration massique de l'hydroxyde de sodium.

De manière générale, on note que les deux courbes sont quasiment linéaires. Comparons-les sur un même graphique. La figure V.7 montre l'évolution de la conductance en fonction de la concentration massique du soluté. On note que l'hydroxyde de sodium est nettement plus conducteur (de 5 à 6 fois plus) que le bicarbonate de sodium à concentration égale.

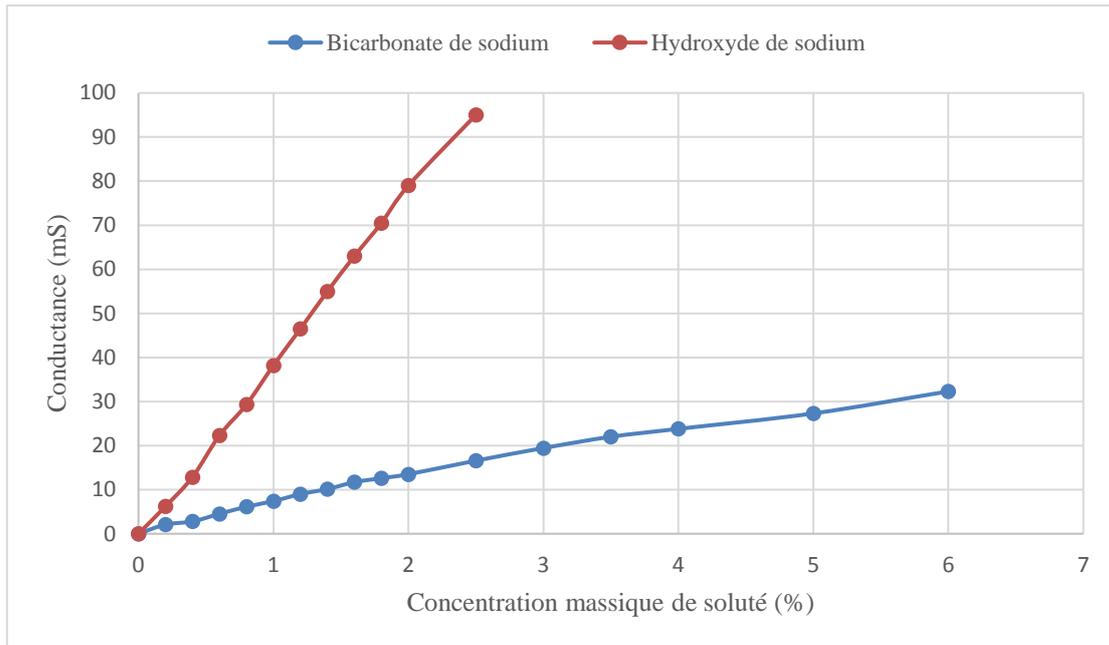


Figure V.7: Conductance en fonction de la concentration massique du soluté.

**V.2.2.2. Mesure de pressions :**

Nous avons déterminé les pressions à différents emplacements du système à l'aide d'un manomètre allant jusqu'à 1 bar de pression manométrique. La figure V.8 montre la photo du système avec les positions relatives aux prises de pression. Les valeurs obtenues dans les 4 zones de mesure sont données dans l'histogramme de la figure V.9.

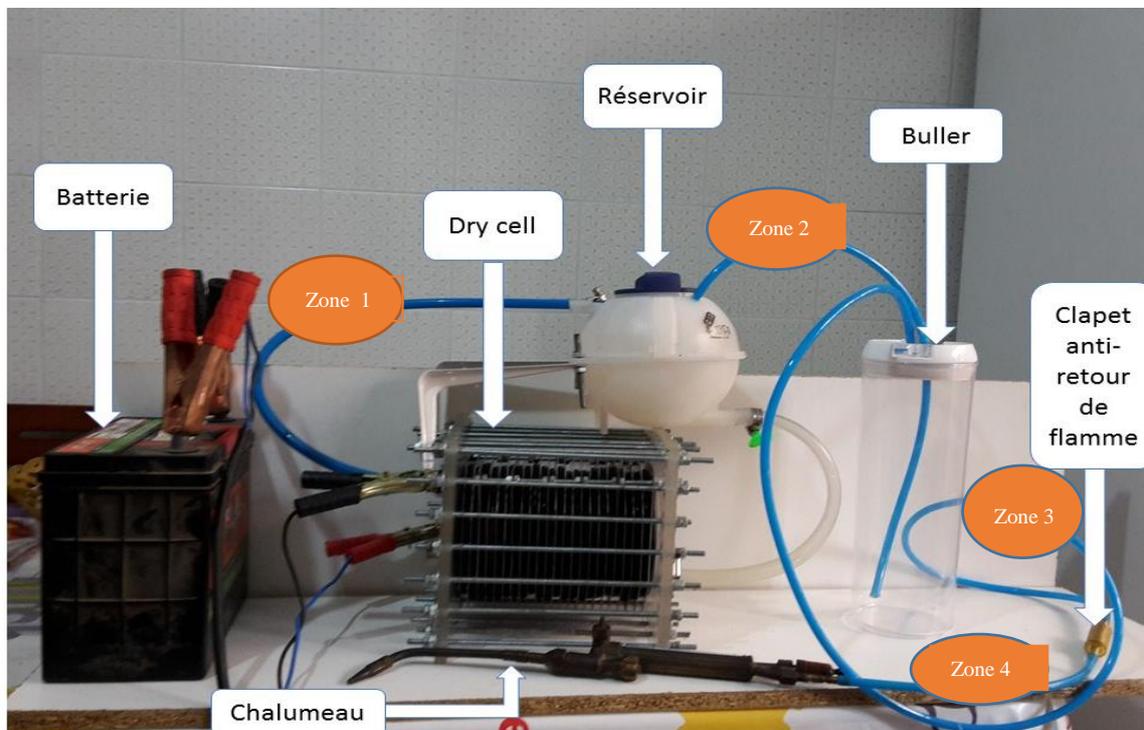


Figure V.8: Photo montrant les positions de mesure de pressions.

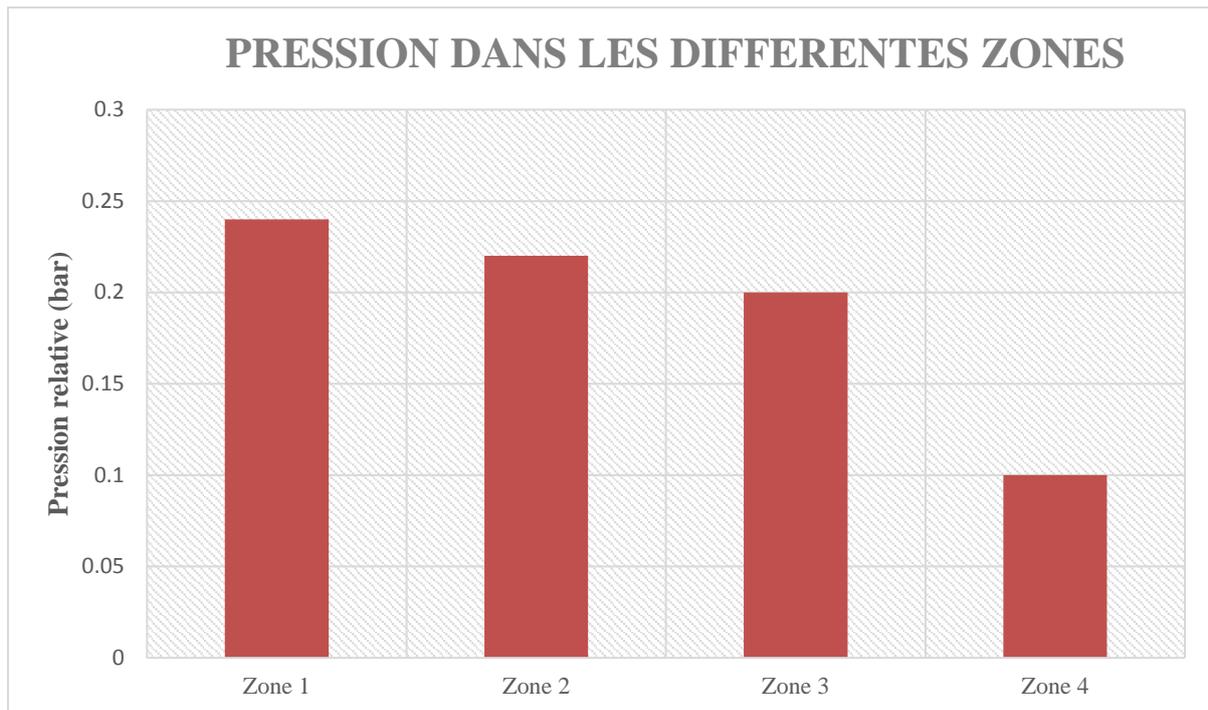


Figure V.9: Histogramme des pressions.

Les mêmes pressions ont été obtenues avec des tuyaux de diamètres différents (4 mm, 6 mm, 10 mm). On en déduit donc que les pertes de charges linéaires sont négligeables dans notre système.

De plus, ces pressions ont été obtenues en positionnant le tuyau immergé dans le buller à des profondeurs différentes. Le buller étant peu profond (moins de 20 cm de hauteur d'eau), on en déduit que la pression à vaincre due à son utilisation est elle aussi négligeable.

### V.2.2.3. Mesure de l'étendu du panache et influence de la variation de pression sur les caractéristiques de la flamme :

Des tests ont été faits pour mesurer le panache de la flamme en fonction de la variation de pression. La figure V.10 montre la flamme produite par le chalumeau conçu dans le cadre de cette étude. On voit l'étendu du panache suivant la buse utilisée.

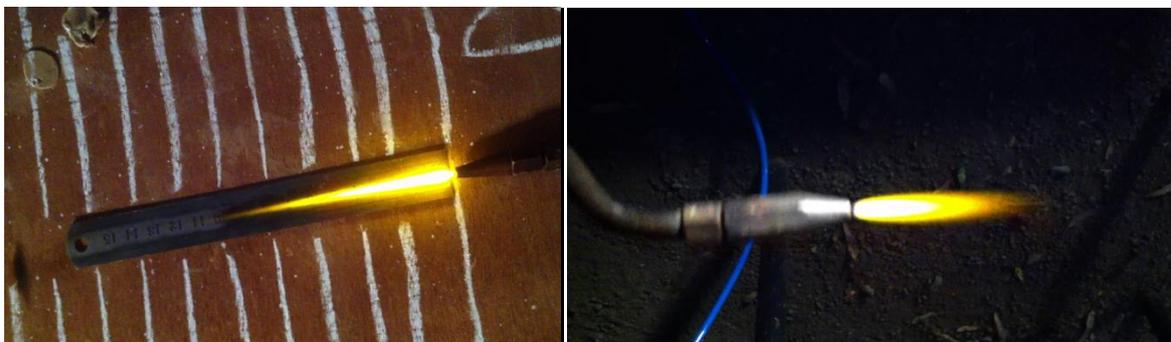


Figure V.10: Photos de la flamme produite par le chalumeau conçu.

On voit l'étendu du panache produit par deux buses différentes.

Nous avons placé notre manomètre dans la zone 4 et avec la vanne du chalumeau on a fait varier la pression. Cependant il nous était impossible de mesurer l'étendu du panache à l'œil nu par manque d'instrumentation adéquate à cet effet. Ceci est aussi valable pour la température de la flamme (Pyromètre ou caméra thermique).

### V.3. Aspect simulation numérique de la flamme :

#### V.3.1. Position du problème et maillage :

L'espace à la sortie de la buse est représenté dans la figure V.11. Notre système étant axisymétrique, nous avons opté pour un maillage 2D afin de diminuer le temps de calcul tout en produisant les mêmes résultats qu'avec un maillage 3D.

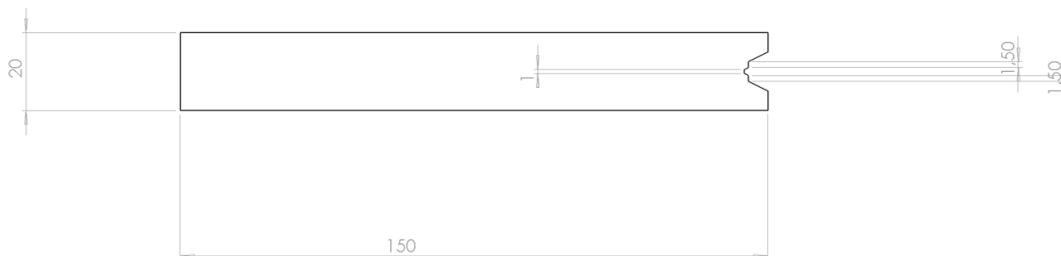


Figure V.11: Géométrie du système.

La flamme considérée est une flamme de diffusion laminaire. Une buse à la droite du modèle de diamètre 1 mm éjecte un mélange d'hydrogène et d'oxygène avec un débit de 2.5 l/min.

Pour le cas de notre étude, nous avons utilisé le modèle laminaire de transport d'espèces afin d'analyser le système de combustion hydrogène-oxygène. La combustion sera modélisée à l'aide d'une seule réaction globale en supposant une conversion complète du  $H_2$  et de  $O_2$  en  $H_2O$ .

Cette réaction sera définie en termes de coefficients stœchiométriques, d'enthalpie de formation et de paramètres contrôlant le taux de réaction.

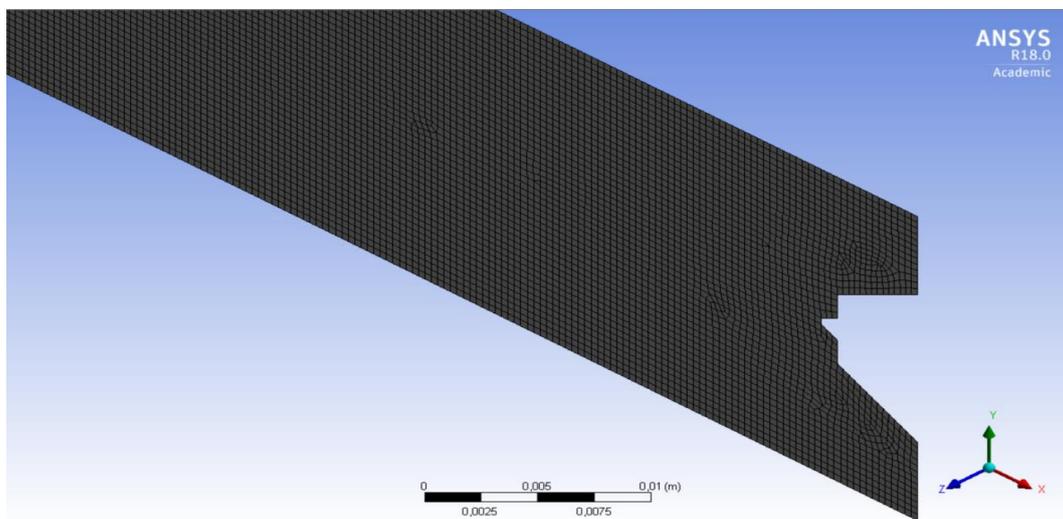


Figure V.12: Maillage du système.

La simulation est effectuée avec un maillage fin et un lissage élevé. La taille des arrêtes de chaque maille est comprise entre 0.02 mm et 0.4 mm. La figure V.12 montre le maillage effectué sur notre géométrie.

### V.3.2. Simulation pour une buse, de 1mm, de diamètre:

Différentes simulations numérique avec des débits différents ont été effectuées. Les températures et vitesses de gaz maximales obtenues sont regroupés dans le tableau V.2. Le tableau V.2 donne les valeurs de la vitesse de la flamme ainsi que la température correspondante pour une buse de 1 mm de diamètre.

Tableau V-4: Valeurs des vitesses de flammes et des températures en fonction du débit volumique pour une buse de diamètre 1mm.

$Q_V$ (l/min)	$T_{Max}$ (K)	$V_{Max}$ (m/s)
2.5	2392	1.97
2.3	2318	1.79
2.1	2236	1.61
1.9	2149	1.44
1.7	2058	1.27
1.5	1968	1.09
1.4	2036	0.97
1.3	2858	0.74
1.2	2760	0.66
1	2532	0.5
0.8	2250	0.35
0.5	1687	0.17

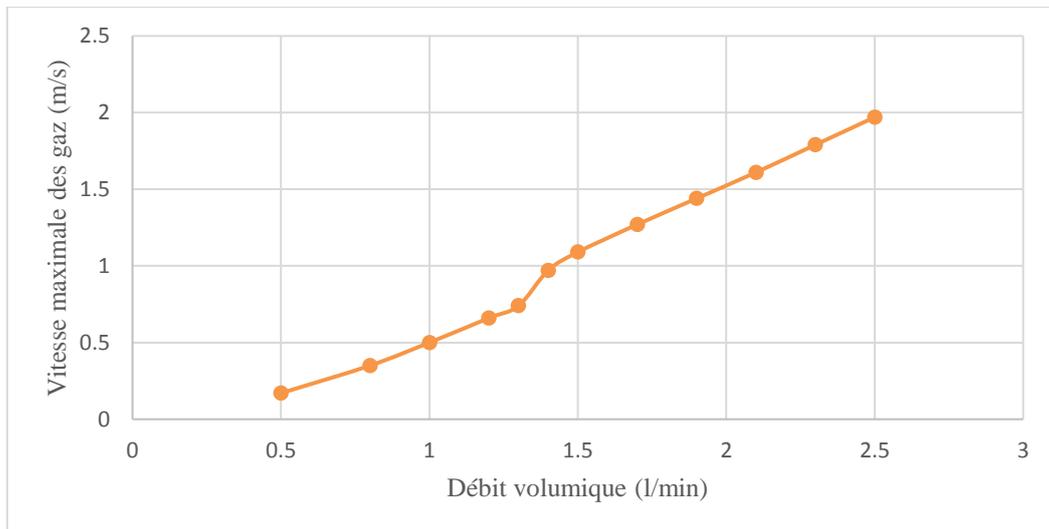


Figure V.13: Evolution de la vitesse de flamme en fonction du débit volumique

Les figures V.13 et V.14 montrent respectivement, l'évolution de la vitesse de sortie de gaz et la température correspondante, en fonction du débit volumique pour une buse de 1 mm de diamètre. Il est à noter que pour un débit d'environ 1,3 l/min, la température décroît suite à l'augmentation de vitesse correspondante à ce débit, ce phénomène est dû à notre sens au fait

qu'avec l'augmentation de la vitesse de sortie, la combustion ne fait pas assez rapidement, induisant ainsi une diminution de la température du panache.

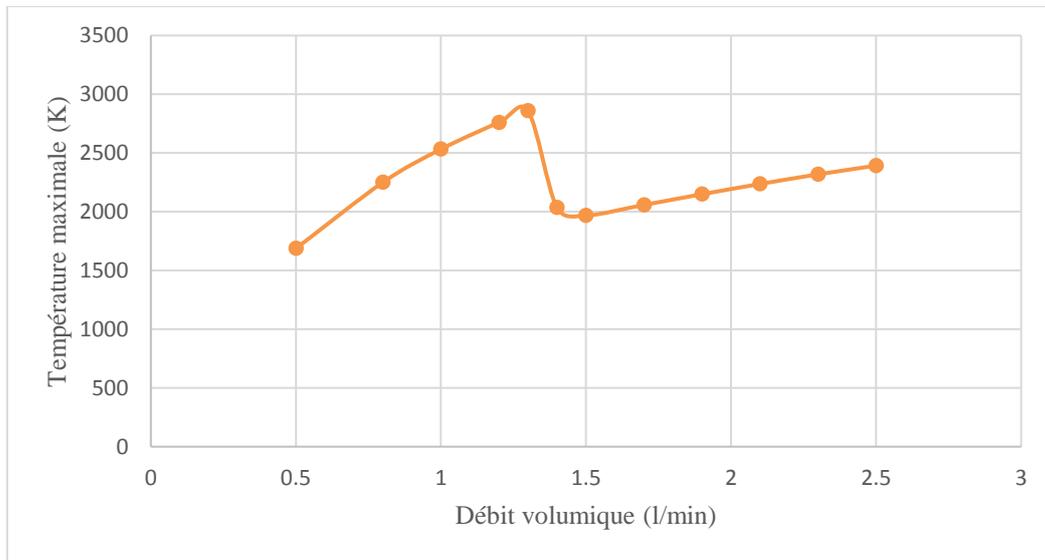


Figure V.14: Evolution de la température en fonction du débit volumique

Sur la figure V.14 on note que la flamme atteint une température maximale de près de 2585 K et une vitesse maximale de sortie de gaz de 1.97 m/s. Le profil de température et de vitesse de sortie de gaz se fait sur 3 paliers bien distincts :

- de 0.5 l/min à 1.3 l/min : la température croît d'une façon logarithmique et la vitesse des gaz croît linéairement ;
- De 1.3 l/min à 1.5 l/min: la température décroît fortement de 890 °C et la vitesse augmente avec une croissance plus prononcée que sur la plage précédente ;
- De 1.5 l/min à 2.5 l/min : la température croît d'une façon logarithmique avec un coefficient directeur moins prononcé que sur la première plage et la vitesse des gaz croît linéairement avec un coefficient directeur plus prononcé que sur la première plage et moins prononcé que sur la deuxième.

Les figures V.15 et V.16 montrent respectivement les profils, de température et de vitesse, pour un débit de gaz de 2,5 l/min et pour une buse de 1 mm de diamètre. On note que la température et la vitesse maximales, sont environ égales à 2392 K et 1,97 m/s.

Les figures V.17 et V.18 donnent respectivement les profils, de température et de vitesse, pour un débit de gaz de 1,9 l/min et pour une buse de 1 mm de diamètre. On note que la température et la vitesse maximales, sont environ égales à 2148 K et 1,44 m/s.

On note de plus que la flamme est moins prononcée lorsqu'on diminue le débit volumique. La valeur du débit volumique est donc proportionnelle au panache de la flamme.

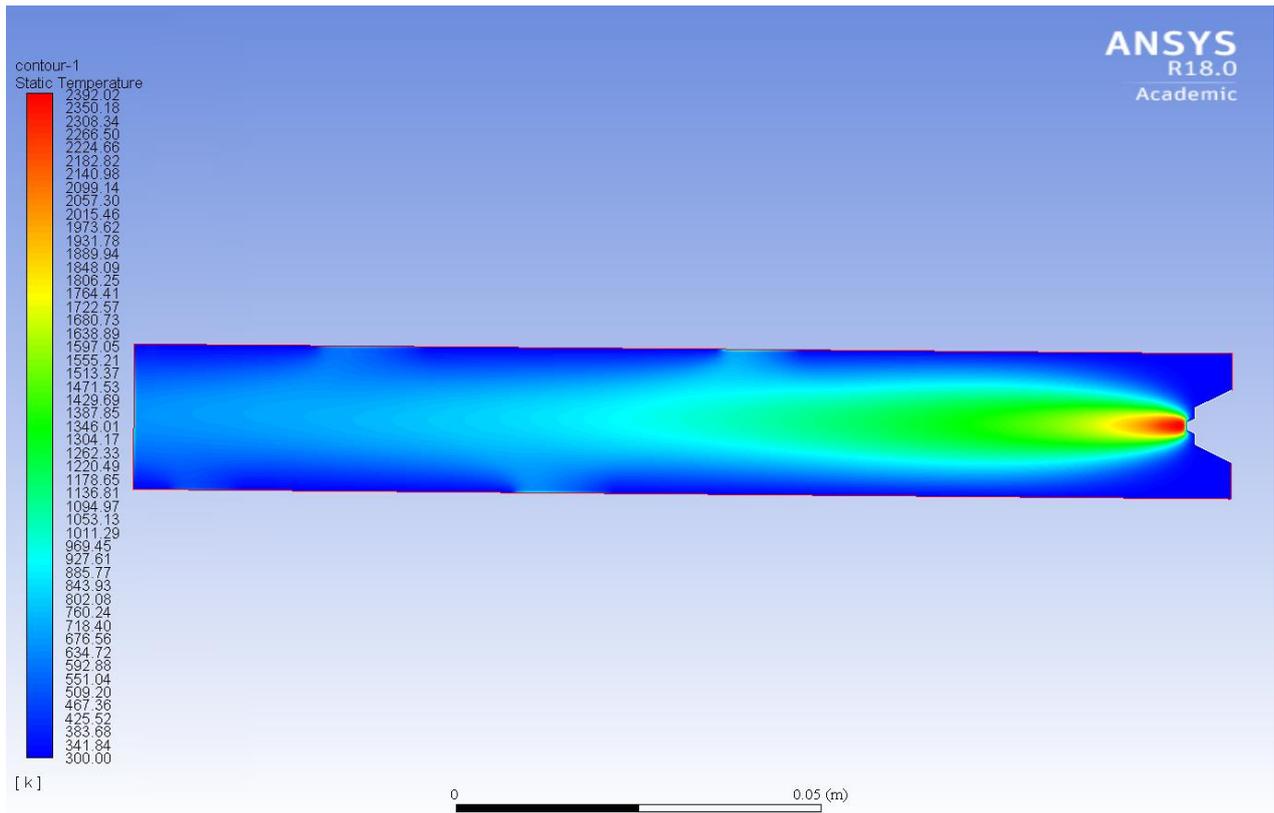


Figure V.15: Profil de température de la flamme pour un débit de 2.5 l/min et une buse de 1 mm de diamètre

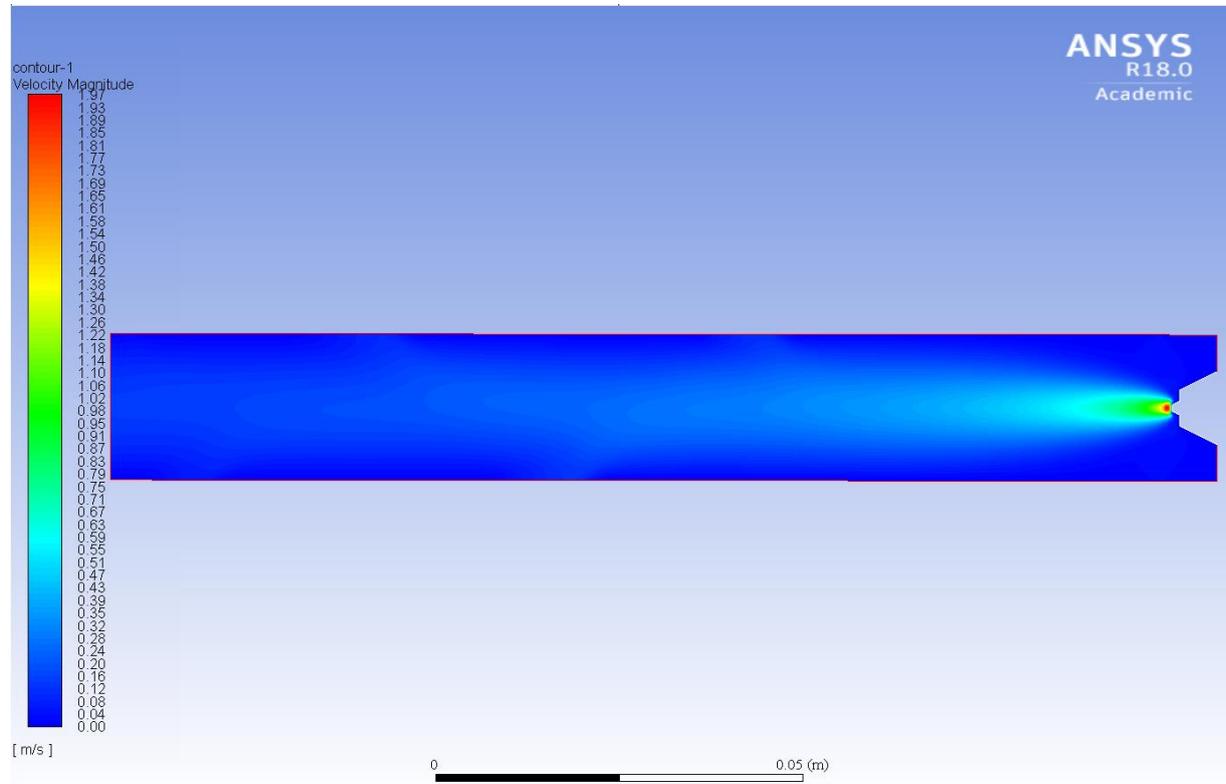


Figure V.16: Profil de vitesse de la flamme pour un débit de 2.5 l/min et une buse de 1mm de diamètre.

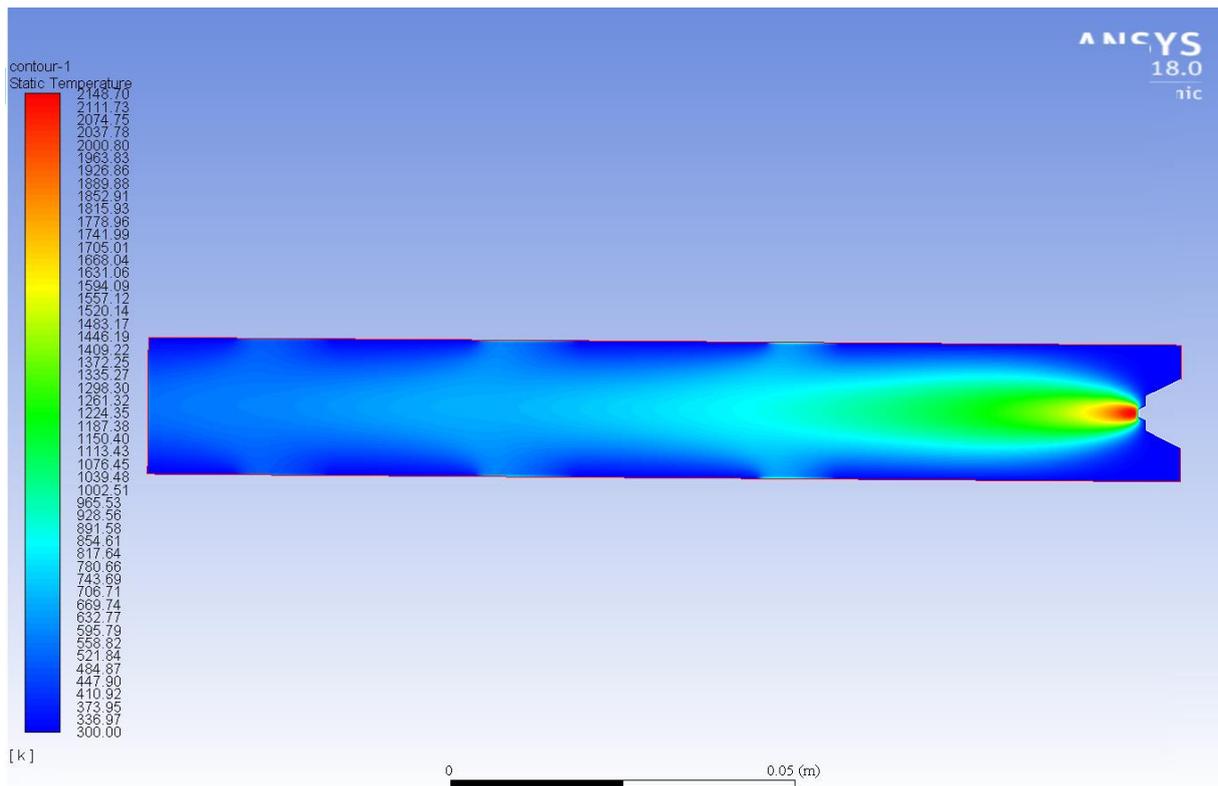


Figure V.17: Profil de température de la flamme pour un débit de 1.9 l/min et une buse de 1mm de diamètre.

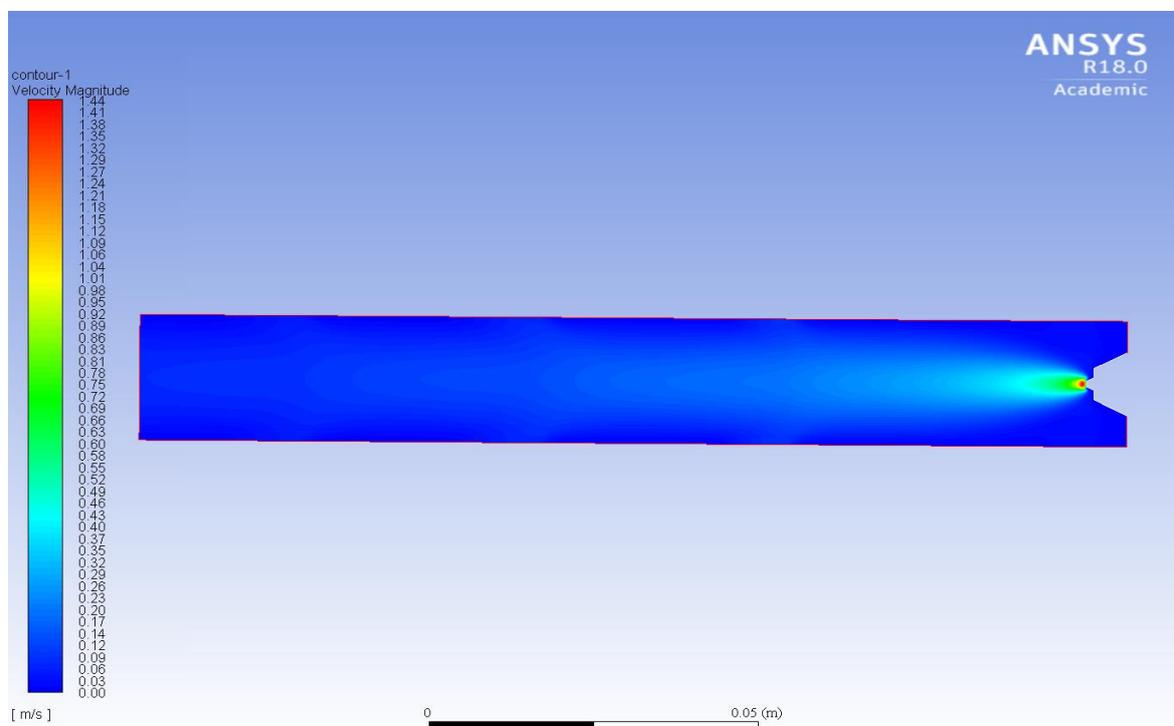


Figure V.18: Profil de vitesse de la flamme pour un débit de 1.9 l/min et une buse de 1mm de diamètre.

### V.3.3. Simulation pour une buse, de 0.7 mm, de diamètre:

Le tableau V.3 donne les valeurs de la vitesse de la flamme ainsi que la température correspondante pour une buse de 0,7 mm de diamètre.

Tableau V-5: Valeurs des vitesses de flammes et des températures en fonction du débit volumique pour une buse de diamètre 0,7mm.

$Q_V$ (l/min)	$T_{Max}$ (K)	$V_{Max}$ (m/s)
2.5	4033	2.28
2.3	3583	2.1
2.1	3486	1.88
1.9	3373	1.66
1.7	3243	1.44
1.5	3118	1.22
1.4	3351	1.09
1.3	3265	0.98
1	2818	0.68
0.8	2537	0.49
0.5	1936	0.25

Les figures V.19 et V.20 montrent respectivement, l'évolution de la vitesse de sortie de gaz et la température correspondante, en fonction du débit volumique pour une buse de 0,7 mm de diamètre. Il est à noter que pour un débit d'environ 1,4 l/min, la température décroît suite à la légère augmentation de vitesse correspondante à ce débit, ce phénomène est dû à notre sens au fait qu'avec l'augmentation de la vitesse de sortie, la combustion ne fait pas assez rapidement, induisant ainsi une diminution de la température du panache.

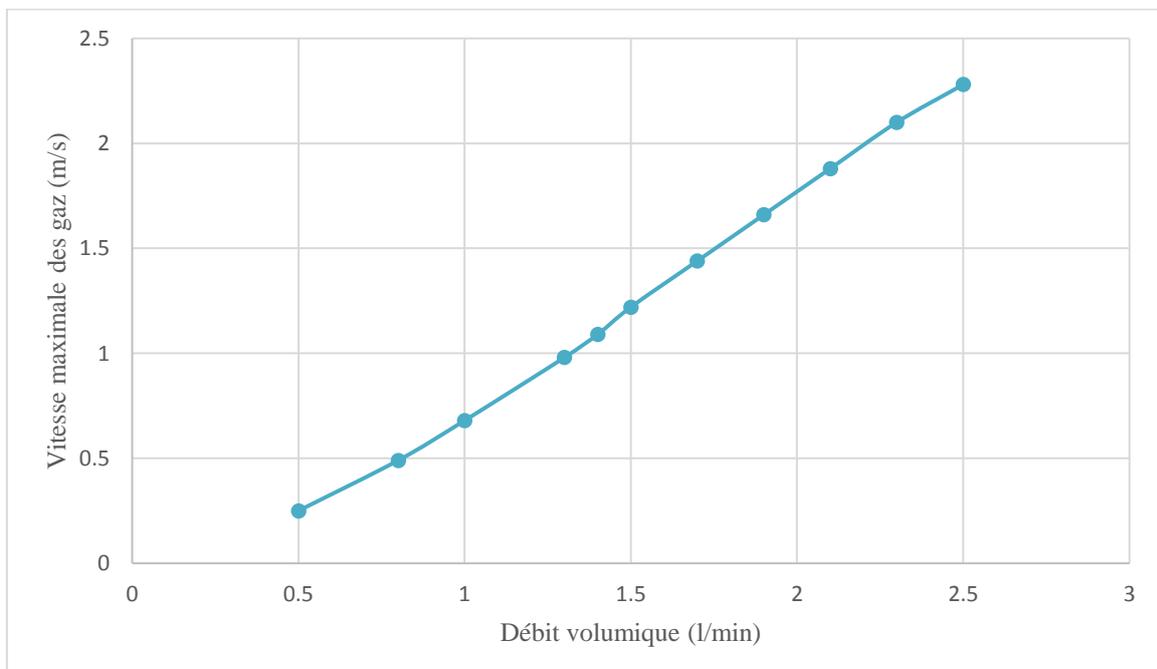


Figure V.19: Evolution de la vitesse de flamme en fonction du débit pour une buse de diamètre 0,7mm.

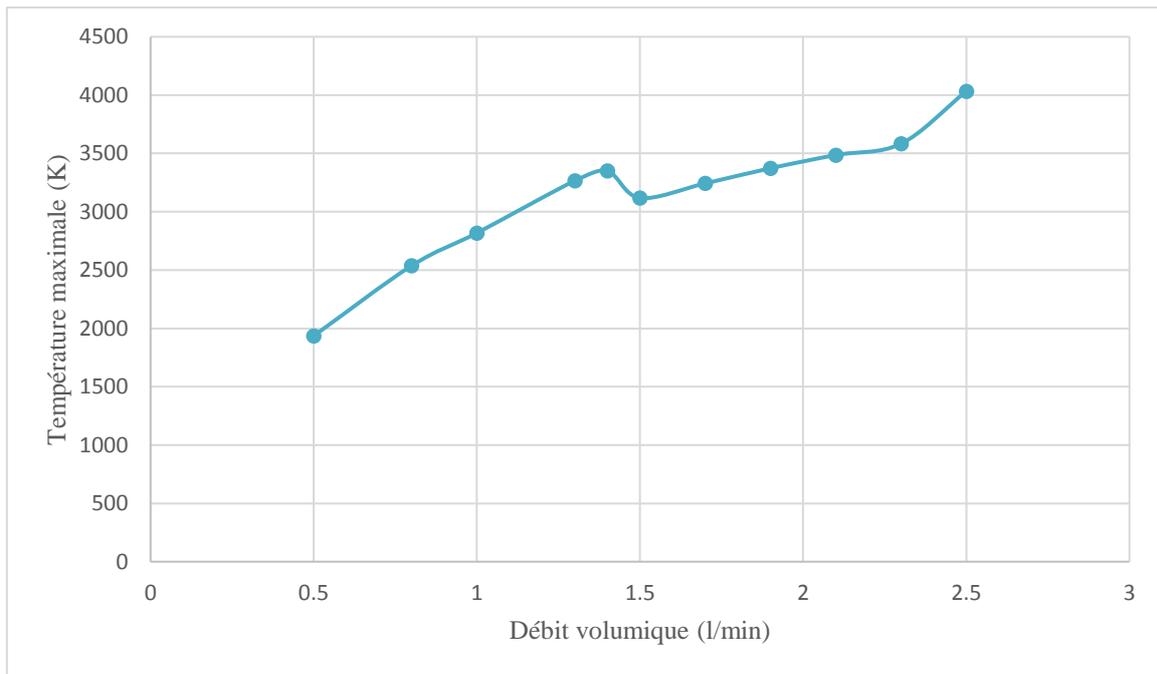


Figure V.20: Evolution de la température en fonction du débit pour une buse de diamètre 0,7mm.

Sur la figure V.20 on note que la flamme atteint une température maximale de près de 4000 K et une vitesse maximale de sortie de gaz de 2.28 m/s. Le profil de température et de vitesse de sortie de gaz se fait sur 3 paliers bien distincts :

- de 0.5 l/min à 1.4 l/min : la température croît d'une façon logarithmique et la vitesse des gaz croît linéairement ;
- De 1.4 l/min à 1.5 l/min: la température décroît fortement et la vitesse augmente avec une croissance plus prononcée que sur la plage précédente ;
- De 1.5 l/min à 2.5 l/min : la température croît d'une façon logarithmique avec un coefficient directeur moins prononcé que sur la première plage et la vitesse des gaz croît linéairement avec un coefficient directeur plus prononcé que sur la première plage et moins prononcé que sur la deuxième.

Les figures V.21 et V.22 montrent respectivement les profils, de température et de vitesse, pour un débit de gaz de 2,5 l/min et pour une buse de 0.7 mm de diamètre. On note que la température et la vitesse maximales, sont environ égales à 4033 K et 2,28 m/s.

Les figures V.23 et V.24 donnent respectivement les profils, de température et de vitesse, pour un débit de gaz de 1,9 l/min et pour une buse de 0.7 mm de diamètre. On note que la température et la vitesse maximales, sont environ égales à 3337 K et 1,66 m/s.

On note de plus que la flamme est moins prononcée lorsqu'on diminue le débit volumique. La valeur du débit volumique est donc proportionnelle au panache de la flamme.

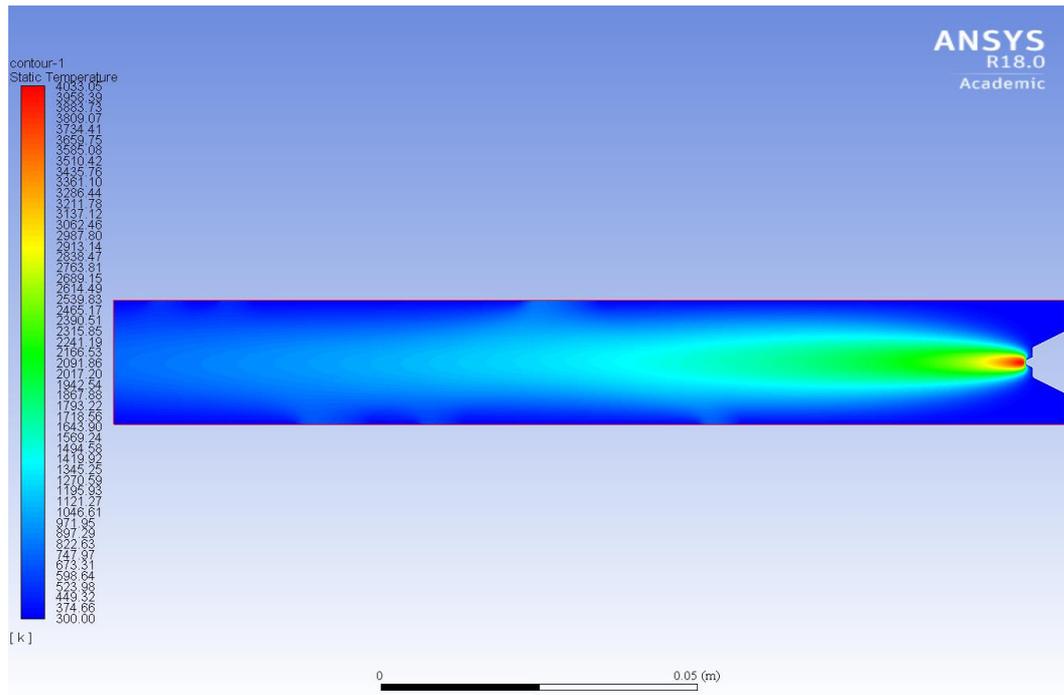


Figure V.21: Profil de température de la flamme pour un débit de 2.5 l/min et une buse de 0,7mm de diamètre.

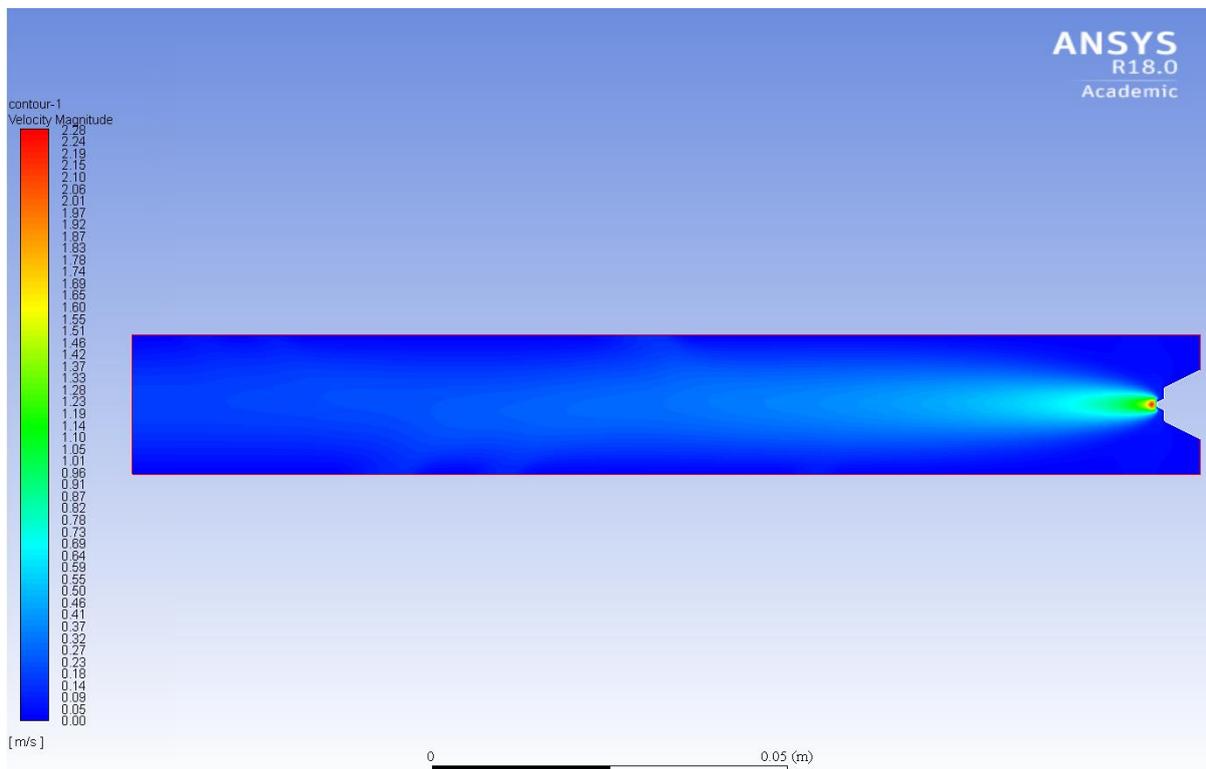


Figure V.22: Profil de vitesse de la flamme pour un débit de 2.5 l/min et une buse de 0,7mm de diamètre.

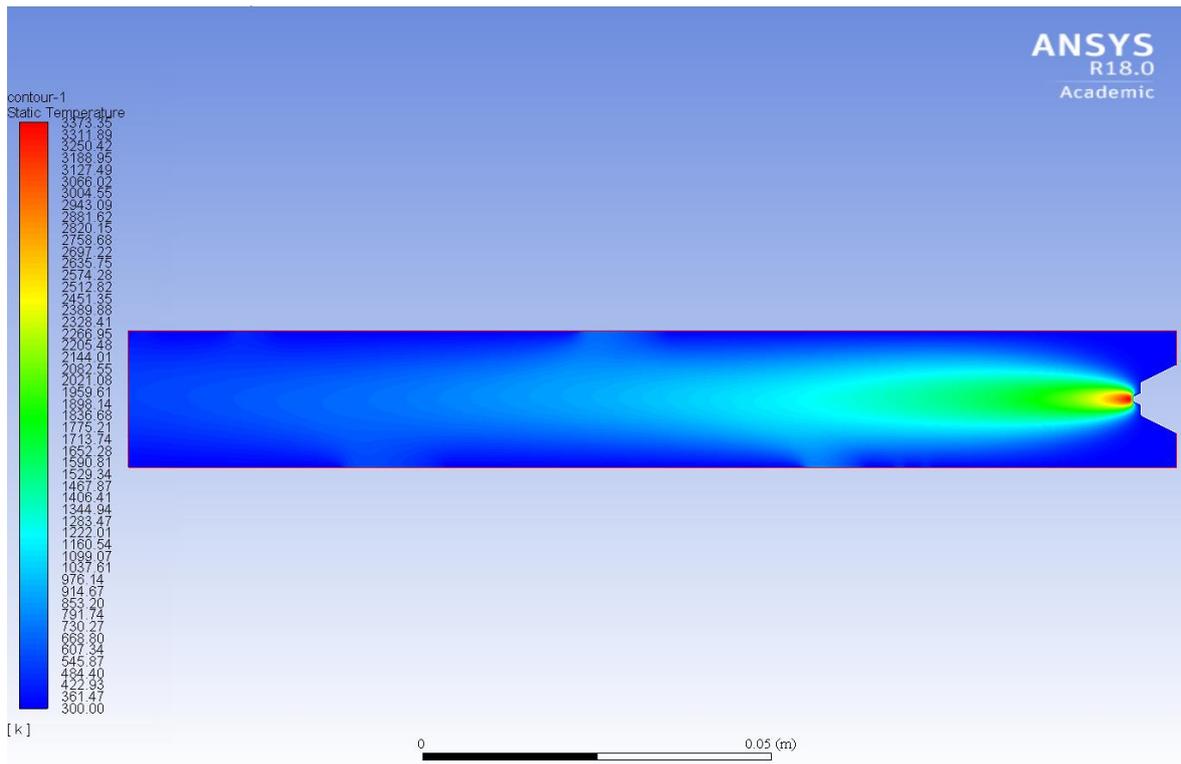


Figure V.23: Profil de température de la flamme pour un débit de 1.9 l/min et une buse de 0,7mm de diamètre.

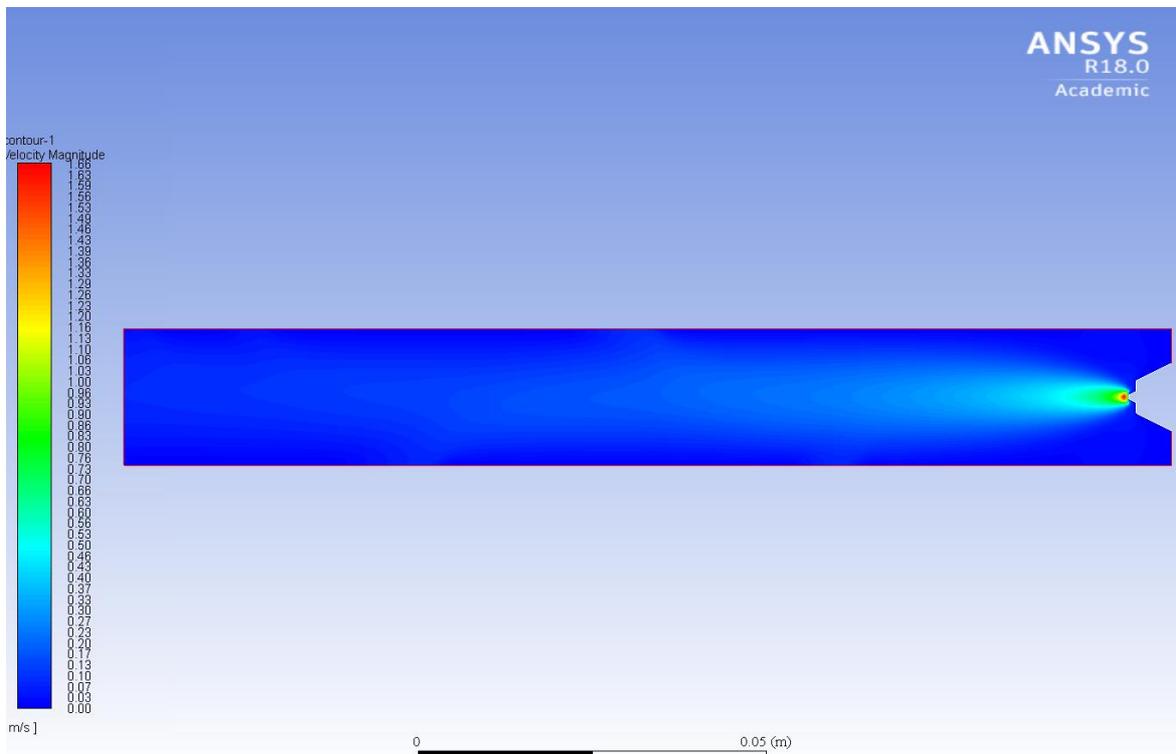


Figure V.24: Profil de vitesse de la flamme pour un débit de 1.9 l/min et une buse de 0,7mm de diamètre.

### V.3.4. Simulation pour une buse de, 0.4 mm, de diamètre:

Le tableau V.4 donne les valeurs de la vitesse de la flamme ainsi que la température correspondante pour une buse de 0,4 mm de diamètre.

Tableau V-6: Valeurs des vitesses de flammes et des températures en fonction du débit volumique pour une buse de diamètre 0,4 mm.

$Q_V$ (l/min)	$T_{Max}$ (K)	$V_{Max}$ (m/s)
2.5	2842	2.75
2.3	2783	2.5
2.1	2715	2.25
1.9	2636	2.01
1.7	2545	1.76
1.5	2431	1.52
1.3	2304	1.29
1	2048	0.94
0.8	1830	0.71
0.7	2415	0.49
0.6	2226	0.39
0.5	2005	0.29
0.4	1746	0.21
0.3	1443	0.13

Les figures V.25 et V.26 montrent respectivement, l'évolution de la vitesse de sortie de gaz et la température correspondante, en fonction du débit volumique pour une buse de 0,4 mm de diamètre. Il est à noter que pour un débit d'environ 0,7 l/min, la température décroît suite à la légère augmentation de vitesse correspondante à ce débit, ce phénomène est dû à notre sens au fait qu'avec l'augmentation de la vitesse de sortie, la combustion ne fait pas assez rapidement, induisant ainsi une diminution de la température du panache.

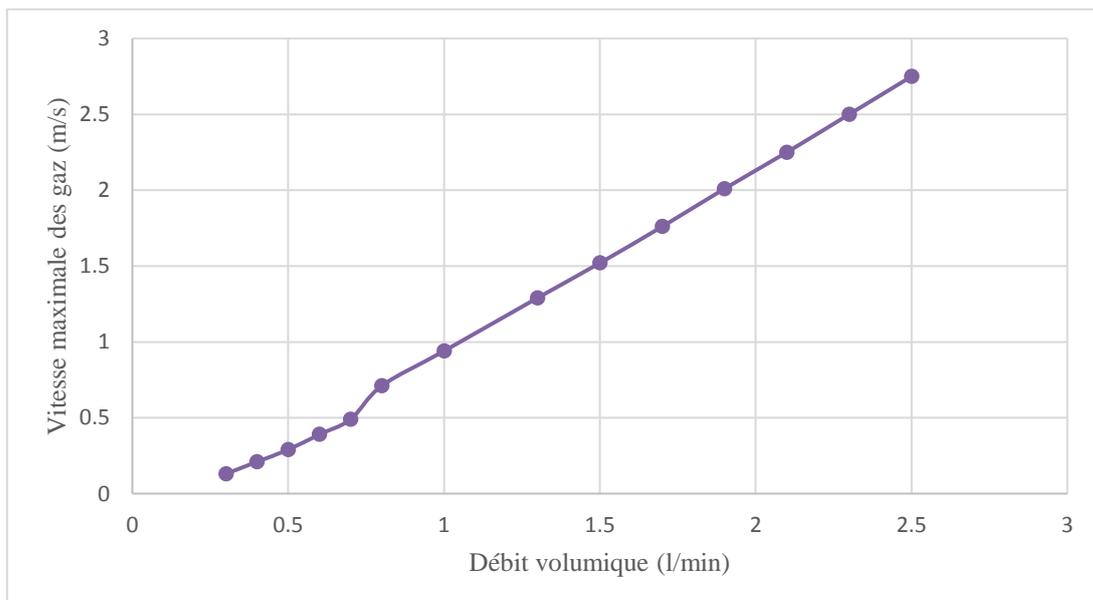


Figure V.25: Evolution de la vitesse de flamme en fonction du débit pour une buse de diamètre 0,4mm.

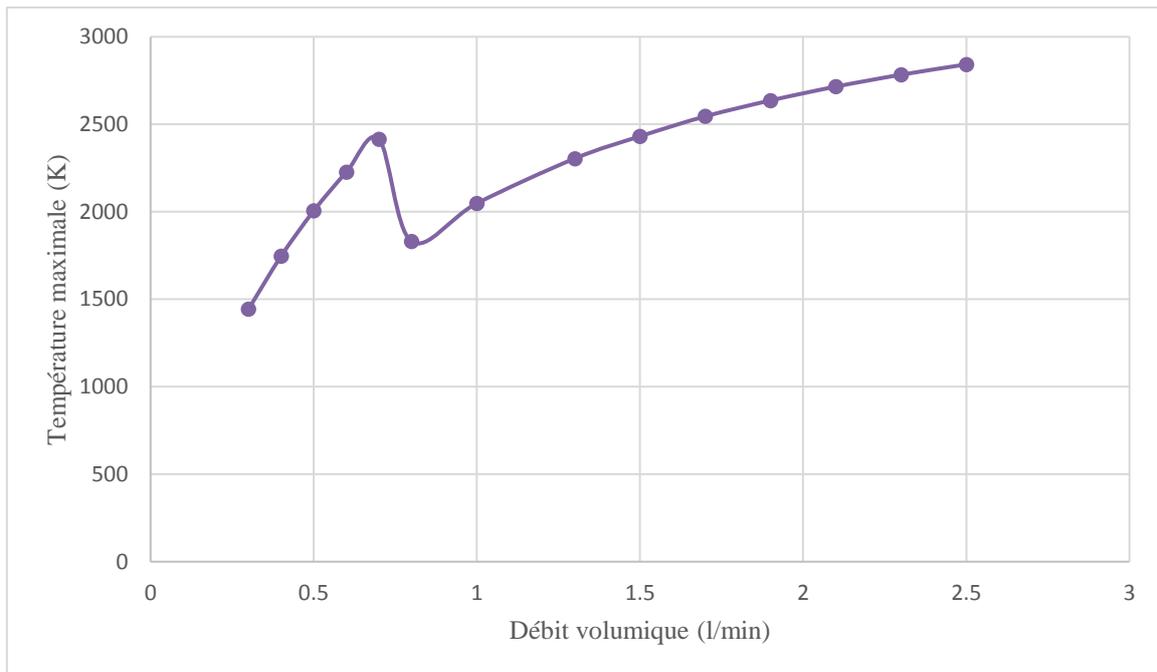


Figure V.26: Evolution de la température en fonction du débit pour une buse de diamètre 0,4mm.

Sur la figure V.26 on note que la flamme atteint une température maximale de près de 2570 K et une vitesse maximale de sortie de gaz de 2,75 m/s. Le profil de température et de vitesse de sortie de gaz se fait sur 3 paliers bien distincts :

- de 0.5 l/min à 0.7 l/min : la température croît d'une façon logarithmique et la vitesse des gaz croît linéairement ;
- De 0.7 l/min à 0.8 l/min: la température décroît fortement et la vitesse augmente avec une croissance plus prononcée que sur la plage précédente ;
- De 0.8 l/min à 2.5 l/min : la température croît d'une façon logarithmique avec un coefficient directeur moins prononcé que sur la première plage et la vitesse des gaz croît linéairement avec un coefficient directeur plus prononcé que sur la première plage et moins prononcé que sur la deuxième.

Les figures V.27 et V.28 montrent respectivement les profils, de température et de vitesse, pour un débit de gaz de 2,5 l/min et pour une buse de 0.4 mm de diamètre. On note que la température et la vitesse maximales, sont environ égales à 2842 K et 2,75 m/s.

Les figures V.29 et V.30 donnent respectivement les profils, de température et de vitesse, pour un débit de gaz de 1,9 l/min et pour une buse de 0.4 mm de diamètre. On note que la température et la vitesse maximales, sont environ égales à 2636 K et 2,01 m/s.

On note de plus que la flamme est moins prononcée lorsqu'on diminue le débit volumique. La valeur du débit volumique est donc proportionnelle au panache de la flamme.

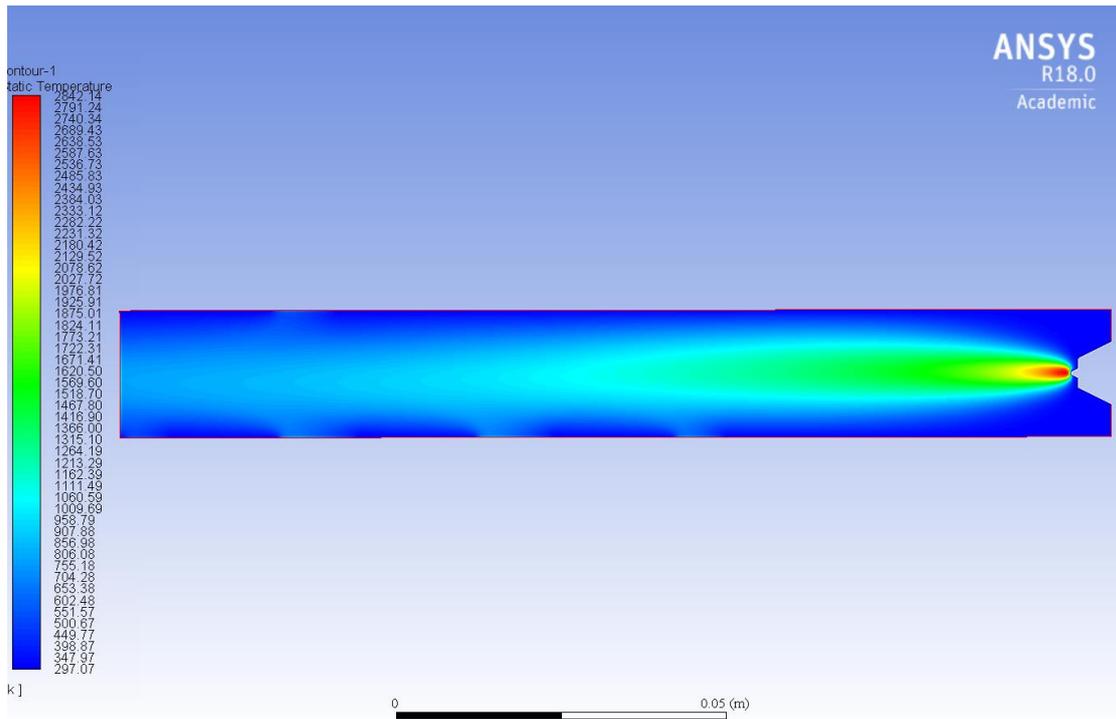


Figure V.27: Profil de température de la flamme pour un débit de 2.5 l/min et une buse de 0,4mm de diamètre.

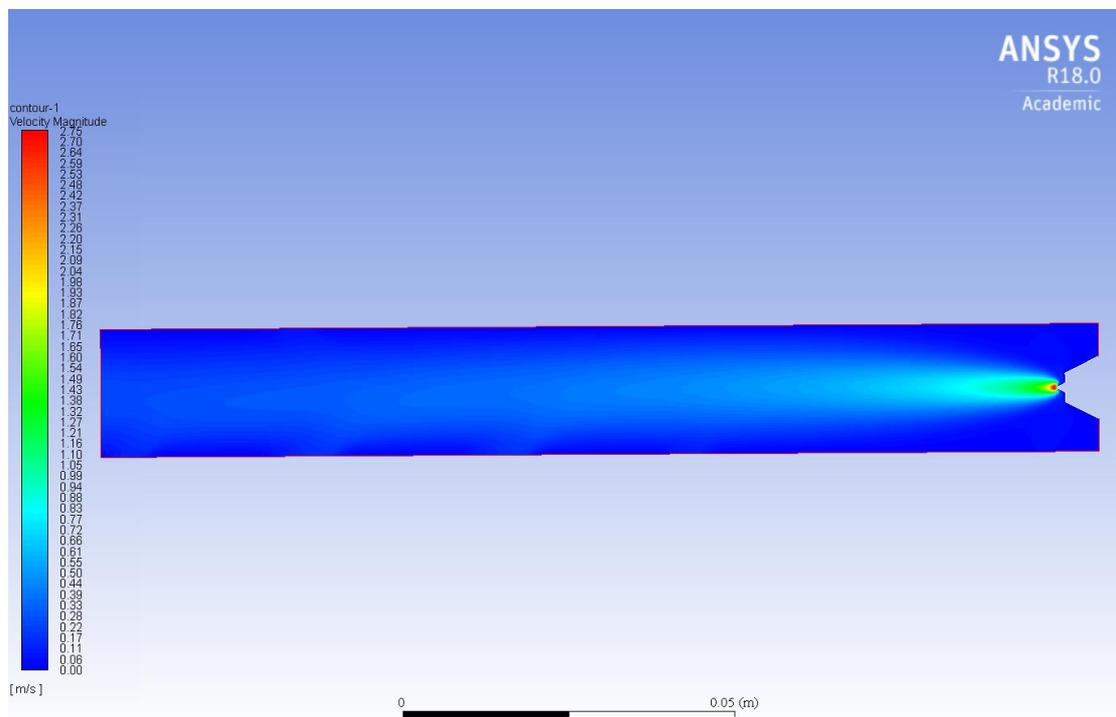


Figure V.28: Profil de vitesse de la flamme pour un débit de 2.5 l/min et une buse de 0,4mm de diamètre.

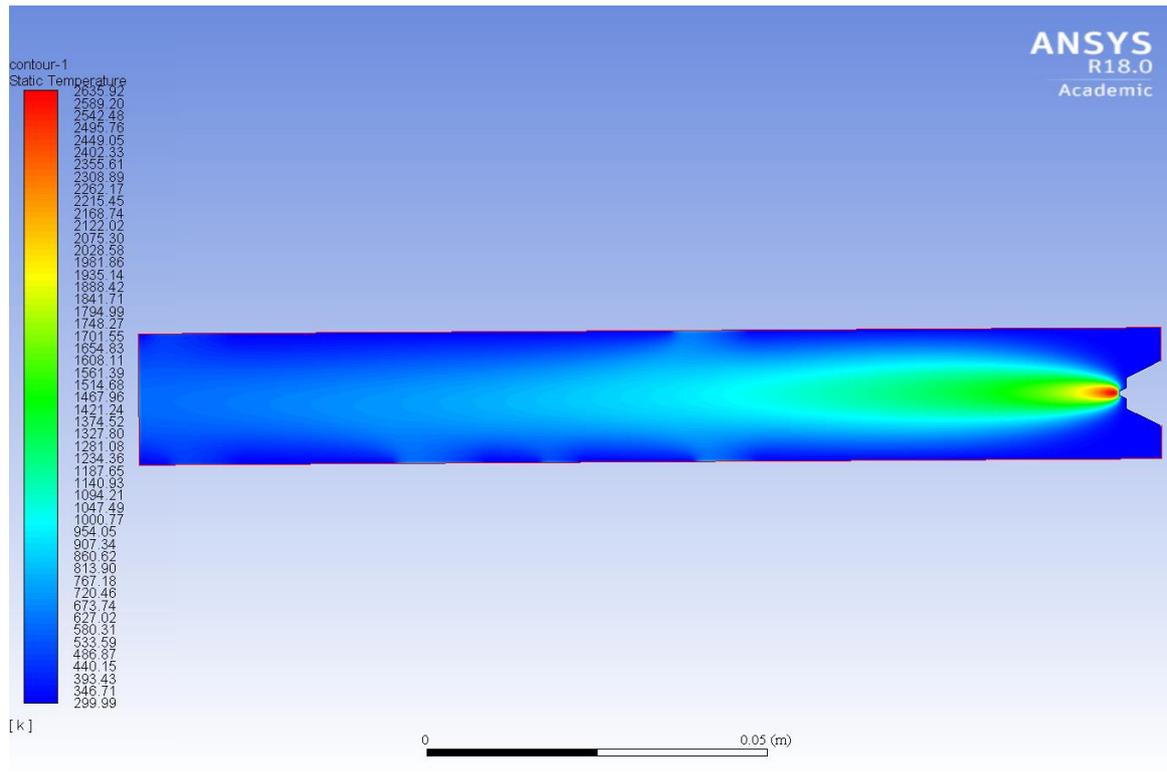


Figure V.29: Profil de température de la flamme pour un débit de 1.9 l/min et une buse de 0,4mm de diamètre.

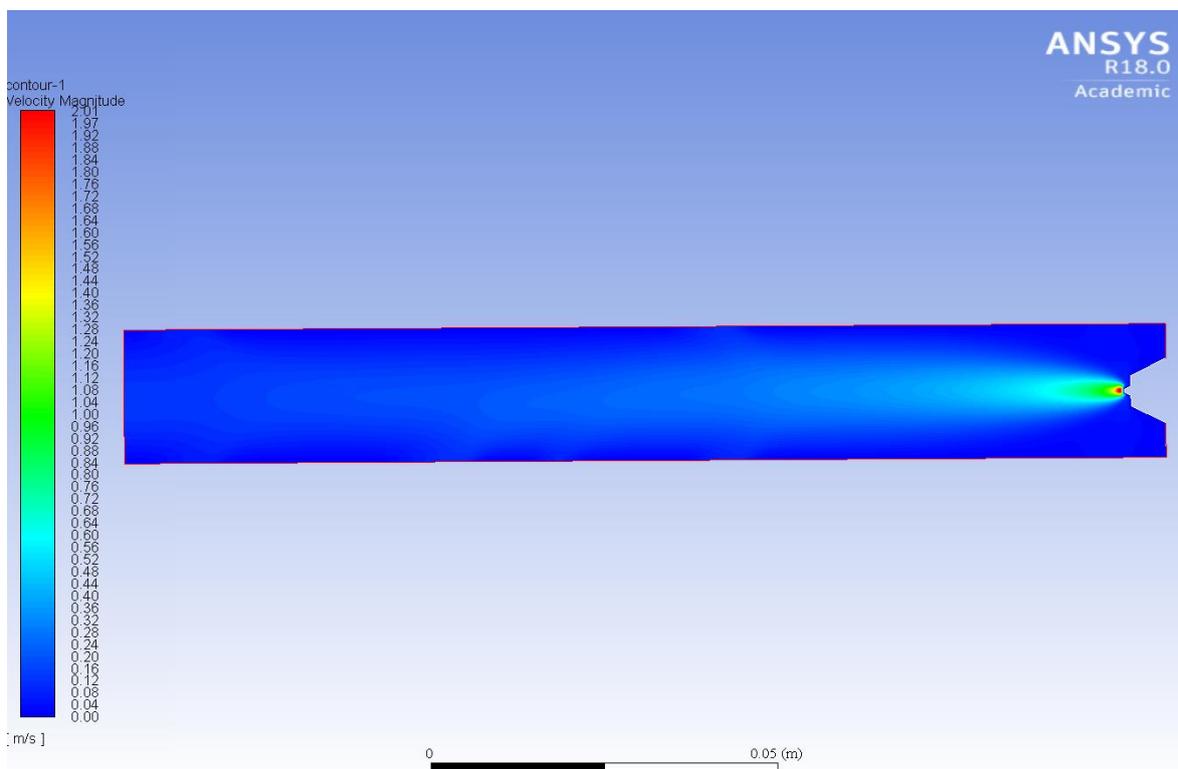


Figure V.30: Profil de vitesse de la flamme pour un débit de 1.9 l/min et une buse de 0,4mm de diamètre.

#### V.4.Comparaison de résultats :

Les figures V.31 et V.32 montrent respectivement, les résultats de comparaison relatives à l'évolution de la vitesse de sortie de gaz et la température correspondante, en fonction du débit volumique pour différents diamètres de buses. On note que la buse de 0.4 mm donne la vitesse la plus élevée par contre, la buse de 0.7 mm donne la température la plus élevée. La figure V.33 montre les profils du panache thermique pour différents diamètres de buses. On note que le panache thermique est plus large pour le diamètre de 1 mm.

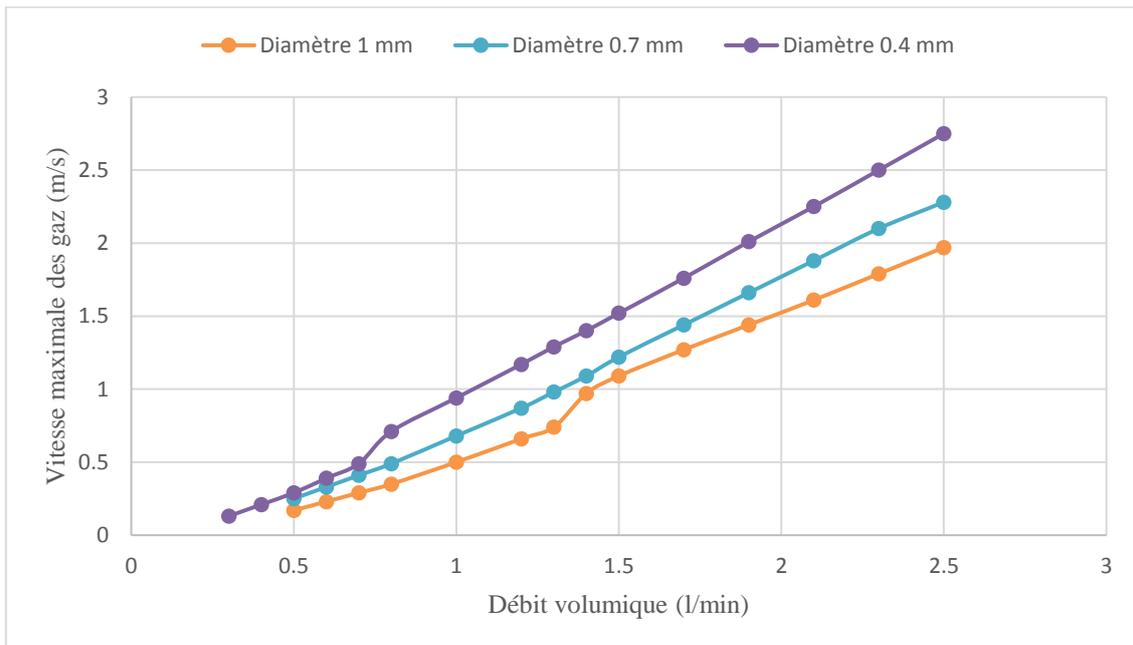


Figure V.31: Evolution de la vitesse de la flamme en fonction du débit pour 3 diamètres de buses.

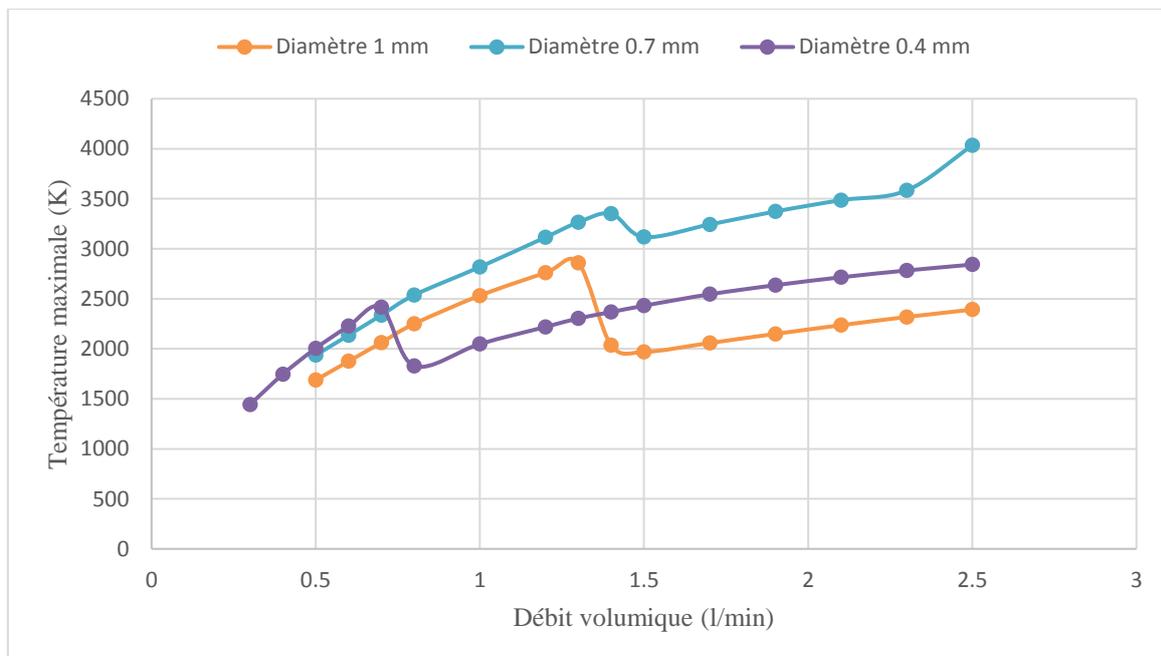


Figure V.32: Evolution de la température de la flamme en fonction du débit pour 3 diamètres de

buses.

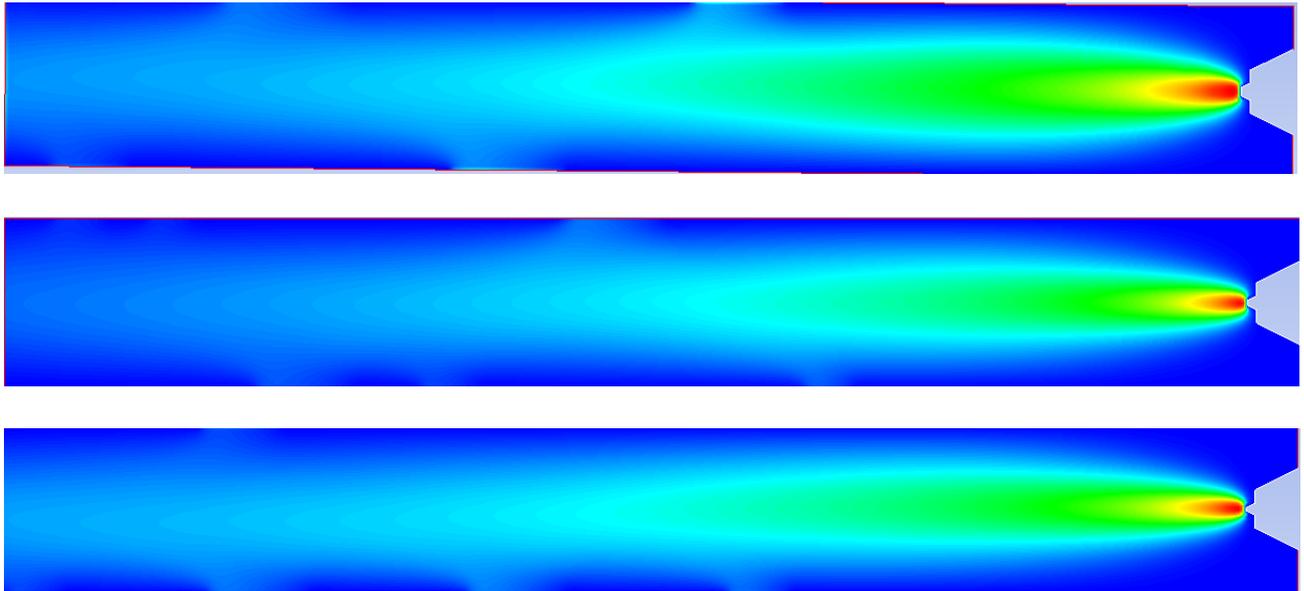


Figure V.33: Profils du panache thermique des flammes pour un débit de 1.9 l/min pour des buses de diamètres : 1mm, 0.7mm et 0.4mm respectivement à partir du haut.

## V.5. Etude économique

### V.5.1. Coût du chalumeau :

#### V.5.1.1. Coût de fabrication :

Les différents éléments constitutifs de notre chalumeau ainsi que leur prix sont spécifiés dans le tableau V.5.

Tableau V-7: Prix des différents composants en dinars algériens.

Élément	Nombre	Prix à l'unité (DA)	Prix total (DA)
Plaque en inox 304	23	89	2045
Plaque en plexiglas	2	400	800
Tige filetée	7	95	665
Ecrou	134	2	268
Rondelle	54	3	162
Joint	24	125	3000
Tétine en inox	1	140	140
Raccord	1	120	120
Collier	3	25	75
Réservoir	1	3000	3000
Support	2	65	130
Boite buller	1	50	50
Clapet anti-retour de flamme	1	600	600
Bec du chalumeau	1	1800	1800
Tuyau en plastique Ø17	0.3 mètre	50 DA le mètre	15
Tuyau en polyuréthane Ø12	0.5 mètre	250 DA le mètre	125
Tuyau en polyuréthane Ø8	2.5 mètres	180 DA le mètre	450
Câble électrique Ø4	3 mètres	75 DA le mètre	225
<b>TOTAL</b>			<b>13670 DA</b>

Le prix de fabrication de notre prototype de chalumeau oxyhydrique est de 13670 DA, ce qui correspond à 125.7 \$.

Afin d'effectuer un bénéfice de vente de 133 %, le prix de vente de notre chalumeau sera :

$$125.7 \times 2.33 = 292.881 \approx 293 \$$$

#### V.5.1.2. Coût énergétique :

Afin de fonctionner normalement pendant une heure, notre chalumeau nécessite une solution de 3 l à base d'eau distillé avec une concentration de 1% de soude correspondant à 30 grammes. Il nécessite entre-autres une tension de 12 V ainsi qu'un courant de 300 A environ. Il consomme ainsi :

$$\frac{12 \times 300}{3600 \times 1000} = 0.001 \text{ kWh}$$

Notre chalumeau consommera alors : 0.001 kWh.

Le prix du kwh en Algérie est de 4.179 DA [52].

Le prix de l'hydroxyde de sodium (soude) est de 0.85 \$/kg [53].

Le prix de l'eau distillée est de 40DA/l ce qui correspond à 0.37 \$/l

Le tableau V.6 résume le coût énergétique de notre prototype.

Tableau V-8: Coût énergétique du chalumeau à hydrogène.

	Eau distillée	Electricité	Soude
Consommation par heure	3 L/h	0.001 kWh	0.03 kg/h
Prix de vente	0.37 \$/L	0.04 \$/kWh	0.85 \$/kg
Coût par heure (\$/h)	1.1 \$/h	0 \$/h	0.03 \$/h
<b>Coût total (\$/h)</b>	<b>1.14 \$/h</b>		

Le coût en énergie de notre chalumeau est donc de 1.14 \$ par heure.

#### V.5.2. Comparaison avec un chalumeau oxyhydrique sur le marché :

Après de nombreuses recherches sur le web, nous avons trouvé en vente un chalumeau oxyhydrique avec des performances semblables aux nôtres, son prix étant fixé à 880 \$ [54].

Le coût en énergie étant le même, nous ne le comparerons qu'avec le prix de fabrication de notre chalumeau. Ainsi :

$$\frac{\text{Prix d'un chalumeau sur le marché}}{\text{Prix de notre chalumeau}} = \frac{880}{125.7} = 7.00079554 \approx 7$$

Le coût de fabrication de notre chalumeau est donc 7 fois moins cher que le prix de vente d'un chalumeau possédant les mêmes performances.

$$\frac{880}{293} = 3.00341297 \approx 3$$

Au final, même avec un gain de 133%, notre chalumeau sera toujours 3 fois moins cher à la vente que ceux trouvés sur le marché.

### V.5.3.Comparaison avec un chalumeau oxyacétylénique :

#### V.5.3.1.Comparaison de coût de fabrication :

Le prix d'un chalumeau oxyacétylénique sur le marché est de 230 \$ [55].

Afin de comparer ses performances avec notre chalumeau oxyhydrique, nous devons ajouter à ce dernier un transformateur 12 V/300 A coutant sur le marché 36 \$ [56]. Le prix sera alors :

$$293 + 36 = 329 \$$$

Le prix de notre chalumeau avec transformateur sera donc de 329 \$.

Le gain sera :

$$329 - 230 = 99 \$$$

Notre chalumeau sera donc 99 \$ plus cher qu'un chalumeau classique.

#### V.5.3.2.Comparaison du coût énergétique

Le coût énergétique des deux chalumeaux sera différent.

Le tableau V.7 résume le coût énergétique du chalumeau classique.

Tableau V-9: Coût énergétique du chalumeau acétylénique [57], [58], [59].

Gaz	Acétylène	Oxygène
Consommation (L/h)	80	85
Prix de vente	92.79 \$ pour 1600 L	67.79 \$ pour 2300 L
Coût par heure (\$/h)	4.64 \$/h	2.51 \$/h
<b>Coût total</b>	<b>7.15 \$/h</b>	

Le coût en énergie d'un chalumeau oxyacétylène est donc de 7.15 \$ par heure.

#### V.5.3.3.Comparaison globale

Le chalumeau oxyacétylénique a beau être moins cher à l'achat que notre chalumeau oxyhydrique, son coût énergétique par heure reste cependant plus élevé.

Calculons à partir de combien d'heures il sera plus rentable d'utiliser notre chalumeau plutôt qu'un chalumeau classique que l'on trouve sur le marché.

$$\left| \frac{\text{Prix de notre chalumeau} - \text{Prix d'un chalumeau classique}}{\text{Coût énergétique de notre chalumeau} - \text{Coût énergétique d'un chalumeau classique}} \right|$$

$$\left| \frac{329 - 230}{1.14 - 7.15} \right| = \frac{99}{6.01} = 16.47$$

Notre chalumeau sera donc plus rentable qu'un chalumeau classique à partir de 17 heures d'utilisation.

# *Conclusion Générale*

## Conclusion générale

*Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à la conception et à la réalisation d'un chalumeau utilisant l'hydrogène comme combustible.*

*En effet, avec l'utilisation irrationnelle des combustibles fossiles et le risque d'épuisement précoce de la réserve mondiale des combustibles fossiles, l'hydrogène semble être un vecteur énergétique assez intéressant pour constituer une alternative adéquate à la situation, de par son abondance, d'une part, et de l'énorme quantité d'énergie libérée par sa combustion, d'autre part. Ces deux paramètres le placent en tête de liste des vecteurs énergétiques du futur. Le chalumeau à hydrogène est une réalisation que nous avons faite dans le cadre de ce projet de fin d'études afin de matérialiser cette vision de « l'hydrogène, comme combustible du futur ».*

*Bien que la combustion de l'hydrogène soit une problématique très intéressante à aborder, les travaux consacrés à son étude restent peu nombreux. Les ingénieurs ne songent pas encore l'utiliser comme combustible à part entière, mais plutôt un élément d'appoint à la combustion des hydrocarbures afin de réduire la consommation énergétique de ces derniers.*

*La recherche bibliographique sur les flammes a permis de faire deux conclusions importantes :*

- la flamme oxhydrique, issue d'un mélange  $H_2 + O_2$ , est plus puissante et génère une température plus importante que celle d'un mélange  $H_2 + \text{air}$  ;*
- Les flammes pré-mélangées sont plus efficaces en terme de dégagement d'énergie et sont plus stables.*

*Ces critères nous ont directement conduits à l'utilisation d'un générateur HHO, vu qu'il satisfait parfaitement ces deux critères.*

*La comparaison entre les deux cellules possibles pour notre générateur a montré que la « dry cell » est beaucoup plus pratique que la « wet cell » car elle produit plus de gaz, consomme moins de solution et est plus compacte.*

*La quantité de gaz que peut produire une cellule d'un générateur varie selon plusieurs paramètres : la surface active, l'intensité du courant, la différence de potentiel électrique, le matériau constituant les électrodes ainsi que leurs nombre, la distance entre elles, l'électrolyte et sa concentration. L'étude de l'influence de chaque paramètre sur la production des gaz peut faire le sujet d'étude d'un projet de fin d'études pour les électrochimistes.*

*En plus du choix de la cellule, nous avons choisi un montage de sorte à avoir une pression bien répartie dans le système étudié et éviter toutes contraintes supplémentaire.*

*La deuxième partie de l'étude a consisté en des calculs de dimensionnement afin de fabriquer une cellule pouvant fournir un débit de 2.5 L/min, alimentée d'un courant continu provenant d'une batterie 12V. Le dimensionnement était suivi par la fabrication de la cellule et la vérification de ses performances par mesure directe. Les résultats des mesures étaient très satisfaisants, nous avons effectivement atteint le débit désiré avec un rendement faradique de 84,18, montrant que la réalisation était couronnée de succès.*

*Après une étude comparative entre les différents types de cellules de production d'hydrogène, la réalisation du système a été effectuée. Deux cellules HHO ont été réalisées : une « cellule sèche » et une « cellule humide ». Des testes de performances sur chacune des cellules ont été effectués.*

*La troisième partie du travail a consisté en une étude paramétrique sur la combustion oxydrique du chalumeau, objet de l'étude. Cette dernière est basée essentiellement sur un calcul CFD en utilisant le logiciel de simulation « ANSYS Fluent », à travers l'analyse de l'influence de la variation du débit massique du mélange hydrogène- oxygène et la taille de la buse, sur la propagation du panache.*

*La flamme a été simulée avec les conditions de fonctionnement de base : un débit de 2,5 l/min et une buse de soudage de diamètre 1 mm. Nous avons fait varier le débit ( de 2,5 jusqu'à 1 l/min) et simuler la flamme pour des diamètres de buse de 0.4, 0.7 et 1 mm.*

*Les résultats obtenus ont montré que le maximum de température est atteint pour une buse de diamètre 0.7mm et un débit de gaz de 2,5 litres/min. Cette température est égale à 3760 °C. La vitesse maximale est atteinte pour une buse de 0,4mm de diamètre et un débit de 2,5 l/min. Cette plage de vitesse, température et panache, permet aux utilisateurs de faire les réglages adéquats à leur application.*

*Il est à souligner que les objectifs fixés dans ce projet ont été largement atteints compte tenu que le chalumeau est fonctionnel en dépit des soucis techniques rencontrés qui sont liés essentiellement au manque d'instrumentation de mesure adaptée (caméra thermique, pyromètres). En effet, nous avons contacté plusieurs établissements, universitaires et de recherches (CDER, Centre de soudure de chéraga, USTHB, ENP etc...), pour ces instruments de mesure, hélas sans aucun résultat tangible. Le pyromètre du département QHSE de l'ENP ne permet pas la mesure des températures au-delà de 1000°C !!*

*Comme perspectives, le projet peut encore être amélioré et donner lieu à de nombreuses études dans le domaine électrochimique lié à la partie production d'hydrogène, le domaine électrique lié à l'alimentation du dispositif, ou encore le domaine énergétique relatif à l'étude de la combustion et la flamme oxydrique.*

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

- [1] <https://www.notre-planete.info/ecologie/energie/>
- [2] <http://danslredutemps.blogspot.com/2012/02/solaire-lalternative-energetique.html>.
- [3] MABEY, Nick. *Delivering climate security. International Security Responses to a Climate Changed World. Whitehall Paper. New York et al.: Routledge, 2008.*
- [4] <http://www.aps.dz/economie/47189-l-hydrog%C3%A8ne,-une-source-d-%C3%A9nergie-durable-et-alternative>.
- [5] <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Les-sources-d-energie/L-hydrogene>.
- [6] GRANJON, H. *Basic Metallurgy of Welding (Bases Metallurgiques du Soudage). Publications de la Soudure Autogene, 32 Blvd. De la Chapelle, 75880 Paris Cedex 18, France, 1989. 233, 1989.*
- [7] ROZIER, François et BLAINVILLE, Henri-Marie Ducrotay. *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts. Bachelier, 1777. P184-187.*
- [8] <http://chalumo29.free.fr/>
- [9] AMONTONS, Guillaume. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences avec les Mémoires de Mathématique et de Physique. Paris : Imprimerie Royale, vol. 1777, pp. 592 600.*
- [10] CHANDLER, D. W., KITSOPOULOS, T. N., BUNTINE, M. A., et al. *Gas-Phase Chemical Reaction Systems: Experiments and Models 100 Years after Max Bodenstein*, edited by J. Wolfrum, H.-R. Volpp, R. Rannacher, and J. Warnatz.
- [11] SHILOV, Alexander E. *NN Semnov and the chemistry of 20th century (to 100th anniversary of his birth). Pure and applied chemistry, 1997, vol. 69, no 4, p. 857-864.*
- [12] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_d%27Arrhenius](https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_d%27Arrhenius)
- [13] giovangigli V, Smooke MD (1986) Report ME-103-86, yale university
- [14] DE SOETE, Gerard et FEUGIER, Alain. *Aspects physiques et chimiques de la combustion. Éditions Technip, 1976.*
- [15] *Investigation numérique et expérimentale d'une flamme de diffusion d'impact par Nadjib GHITI Ecole militaire Polytechnique - Magister en Aérodynamique et propulsion 2007*
- [16] BORGHI, Roland et DESTRIAU, Michel. *Combustion et les flammes. Editions OPHRYS, 1995*



- [32] MICHELSON, W. Ueber die normale Entzündungsgeschwindigkeit explosiver Gasgemischen. *Annalen der Physik*, 1889, vol. 273, no 5, p. 1-24
- [33] GELFAND, Boris E., SILNIKOV, Mikhail V., MEDVEDEV, Sergey P., et al. *Thermo-gas dynamics of hydrogen combustion and explosion*. Springer Science & Business Media, 2012. P 17
- [34] ANDREWS, G. E. et BRADLEY, D. Determination of burning velocities: a critical review. *Combustion and Flame*, 1972, vol. 18, no 1.
- [35] KOMATSU technical report 2004 vol.50 NO.154.
- [36] TUŠEK, Janez et ŠRAJ, Miha. Oxy-hydrogen flame for cutting of steels. *Metalurgija*, 2007, vol. 46, no 3, p. 211-215.
- [37] Simulation numérique d'une flamme turbulente prémélangée axisymétrique par le code fluent, CHERAD Ibrahim OUBADI Abdelghani Oum El Bouaghi - Ingénieur d'état en génie mécanique énergétique 2009
- [38] VEYNANTE, Denis. *Flamme de diffusion laminaire*. Ed. Techniques Ingénieur, 1999.
- [39] GAUDUCHEAU, J.L. et al, A numerical study of lean CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Air premixed flames at high pressure, *Combust. Sci. & Tech.* 1998, Vol. 137, pp. 81-99.
- [40] G. S. Jackson et al, Influence of H<sub>2</sub> on the response of lean premixed CH<sub>4</sub> flames to high strained flows, *Combustion & Flame* 132 (2003) 503-511.
- [41] E.R. Hawkes & J.H. Chen, Direct numerical simulation of hydrogen enriched lean premixed methane-air flames, *Combustion & flame* 138 (2004) 242-258.
- [42] Lachaux .T, Etude des effets de la haute pression sur la structure et la dynamique des flammes turbulentes de prémélange pauvre de méthane-air, Thèse de doctorat, univ. D'Orléans 2004.
- [43] NOUI SAMIRA. Mémoire magistère, étude numérique de la combustion des gaz dans les fours industriels, chapitre 2. 2006
- [44] FELLAG, Abdelhadi. Modélisation des échanges thermiques dans une chaudière à biomasse. 2011. Thèse de doctorat. Larbi LOUKARFI.
- [45] GÖKALP, Iskender. Sur les Interrelations entre domaines scientifiques. *Revue de synthèse*, 1989, vol. 110, no 3, p. 453-468.
- [46] FAWZY EL-MAHALLAWY. SAAD EL-DIN HABIK, fundamentals and technology of combustion, tableau 2-2 page 97 Cairo Egypt 2002
- [47] MOKHTARI L., étude numérique des écoulements réactifs turbulents dans un chambre de combustion d'un moteur diesel, thèse de magister université de Constantine. 2003

- [48] KUO, Kenneth Kuan-yun et ACHARYA, Ragini. *Fundamentals of turbulent and multi-phase combustion*. John Wiley & Sons, 2012.
- [49] MAAMERI A. *Simulation Numérique de la Stabilisation d'une Flamme Turbulente de Méthane en Régime Pauvre Par Ajout d'Hydrogène*, Centre Universitaire Larbi BEN M'HIDI, Oum El Bouaghi Algérie 2007
- [50] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fraction\\_molaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fraction_molaire)
- [51] Kenneth .K KUO, *Principles of combustion*, 2nd ed. John Wiley & Sons ed. 2005
- [52] <https://prix-elec.com/etranger/maghreb>
- [53] [https://www.alibaba.com/product-detail/25-kg-bag-market-price-of\\_60631486702.html?s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/25-kg-bag-market-price-of_60631486702.html?s=p)
- [54] [http://www.hydrogengarage.com/store/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=28](http://www.hydrogengarage.com/store/index.php?main_page=product_info&products_id=28)
- [55] [https://www.amazon.com/Biltek-Professional-Portable-Acetylene-Victor-Style/dp/B06Y1C79NB/ref=lp\\_13400591\\_1\\_5?s=hi&ie=UTF8&qid=1498274657&sr=1-5](https://www.amazon.com/Biltek-Professional-Portable-Acetylene-Victor-Style/dp/B06Y1C79NB/ref=lp_13400591_1_5?s=hi&ie=UTF8&qid=1498274657&sr=1-5)
- [56] <http://fr.farnell.com/abb/2csg226005r1101/transformateur-de-courant-300a/dp/2543733>
- [57] <http://wattrin.e-monsite.com/pages/infos-utiles/tableau-de-consommation-de-gaz-de-chalumeaux-en-soudage-et-coupage-tableau-de-conversion-de-pression-bar-psi-psi-bar.html>
- [58] <https://www.laboutiquedusoudeur.com/bouteille-acetylene-dues-mobil-1-6-m3-linde.html>
- [59] <https://www.laboutiquedusoudeur.com/bouteille-oxygene-dues-mobil-2-3-m3-linde.html>

# ***ANNEXES***

**ANNEXE A : Résultat d'un test de performance entre la  
wet cell et la Dry cell.**

<b>Caractéristiques</b>	<b>Dry cell</b>	<b>Wet cell</b>
Surface active (m <sup>2</sup> )	0,265	0,41652
Electrolyte	NaOH	NaOH
Concentration électrolyte	0,3%	0,3%
Tension (volts)	12	12
Espace entre électrode (mm)	7	7
Volume (m <sup>3</sup> )	9,5 10 <sup>-4</sup>	6 10 <sup>-3</sup>
Rapport surface volume	279	69,42
Débit fourni (litres/min)	0,45	0,2

## ANNEXE B : Résultats du calcul itératif pour le dimensionnement.

$\Delta x$ théorique	densité de courant	Courant entre deux électrode	Nombre d'électrode	$\Delta x$ réel
0,005	13446,9802	297,024926	0,73800975	0,83393177
0,01	6723,4901	148,512463	1,4760195	4,33213647
0,015	4482,32673	99,0083088	2,21402924	9,4982047
0,02	3361,74505	74,2562316	2,95203899	14,6642729
0,025	2689,39604	59,4049853	3,69004874	19,8303412
0,03	2241,16337	49,5041544	4,42805849	24,9964094
0,035	1920,99717	42,4321323	5,16606823	30,1624776
0,04	1680,87252	37,1281158	5,90407798	35,3285459
0,045	1494,10891	33,0027696	6,64208773	40,4946141
0,05	1344,69802	29,7024926	7,38009748	45,6606823
0,055	1222,45275	27,002266	8,11810722	50,8267506
0,06	1120,58168	24,7520772	8,85611697	55,9928188
0,065	1034,38309	22,8480713	9,59412672	61,158887
0,07	960,498585	21,2160662	10,3321365	66,3249553
0,075	896,465346	19,8016618	11,0701462	71,4910235
0,08	840,436262	18,5640579	11,808156	76,6570917
0,085	790,998835	17,4720545	12,5461657	81,82316
0,09	747,054455	16,5013848	13,2841755	86,9892282
0,095	707,7358	15,6328909	14,0221852	92,1552964
0,1	672,34901	14,8512463	14,760195	97,3213647
0,105	640,33239	14,1440441	15,4982047	102,487433
0,11	611,226373	13,501133	16,2362144	107,653501
0,115	584,651313	12,9141272	16,9742242	112,819569
0,12	560,290842	12,3760386	17,7122339	117,985638
0,125	537,879208	11,8809971	18,4502437	123,151706
0,13	517,191546	11,4240356	19,1882534	128,317774
0,135	498,036304	11,0009232	19,9262632	133,483842
0,14	480,249293	10,6080331	20,6642729	138,649911
0,145	463,688972	10,2422388	21,4022827	143,815979
0,15	448,232673	9,90083088	22,1402924	148,982047
0,155	433,773555	9,58144924	22,8783022	154,148115
0,16	420,218131	9,28202895	23,6163119	159,314183
0,165	407,484248	9,00075535	24,3543217	164,480252
0,17	395,499418	8,73602725	25,0923314	169,64632
0,175	384,199434	8,48642647	25,8303412	174,812388
0,18	373,527228	8,2506924	26,5683509	179,978456
0,185	363,431897	8,02770071	27,3063607	185,144525
0,19	353,8679	7,81644543	28,0443704	190,310593
0,195	344,794364	7,61602375	28,7823802	195,476661
0,2	336,174505	7,42562316	29,5203899	200,642729