



**HAL**  
open science

# Etude des flammes non-prémélangées de biogaz assistées par plasma

Ahlem Ghabi

► **To cite this version:**

Ahlem Ghabi. Etude des flammes non-prémélangées de biogaz assistées par plasma. Physique [physics]. Université d'Orléans, 2023. Français. NNT : 2023ORLE1087 . tel-04633647

**HAL Id: tel-04633647**

**<https://theses.hal.science/tel-04633647>**

Submitted on 3 Jul 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

## ÉCOLE DOCTORALE

*Énergie, Matériaux, Sciences de la Terre et de l'Univers*

Institut de Combustion Aérodynamique Réactivité et Environnement (ICARE)  
UPR 3021 du CNRS

Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés (GREMI)  
UMR 7344 de l'université d'Orléans

# THÈSE

 présentée par :

**Ahlem GHABI**

Soutenue le **05 décembre 2023**

Pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : **Énergétique**

## Etude des flammes non-prémélangées de biogaz assistées par plasma

### THÈSE dirigée par :

**M. BOUSHAKI Toufik**

**M. ROBERT Éric**

**M. ESCOT BOCANEGRA Pablo**

Maître de conférences HDR, Université d'Orléans - ICARE

Directeur de recherche, CNRS - GREMI

Maître de conférences, Université d'Orléans - GREMI

### RAPPORTEURS :

**M. SCHULLER Thierry**

**Mme LACOSTE Deanna**

Professeur des universités, Université Toulouse 3 - IMFT

Associate Professor, HDR, KAUST- CCRC

### JURY :

**M. SCHULLER Thierry**

**Mme. LACOSTE Deanna**

**M. BOUSHAKI Toufik**

**M. ROBERT Éric**

**M. ESCOT BOCANEGRA Pablo**

**M. SAUTET Jean-Charles**

**Mme. CUENOT Benedicte**

Professeur des universités, Université de Toulouse 3 - IMFT

Associate Professor, KAUST- CCRC, KSA

Maître de conférences HDR, Université d'Orléans - ICARE

Directeur de recherche, Université d'Orléans - GREMI

Maître de conférences, Université d'Orléans - GREMI

Professeur des universités, Université de Rouen - CORIA

Professeur / Chercheuse, Université Eindhoven - CERFACS

**Présidente du jury**



*À mes parents*



*“ You never fail until you stop trying ”*

- ALBERT EINSTEIN



---

## Remerciements

---

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance envers M. Philippe Dagaut, M. Christian Chauveau, Mme Nabiha Chaumeix et M. Stéphane Mazouffre, anciens et nouveaux directeurs d'ICARE, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire et pour la confiance qu'ils m'ont accordée.

Un immense merci à mes directeurs et encadrants de thèse pour leur guidance, leur assistance et leur motivation tout au long de cette aventure intellectuelle. Leur expertise, leur disponibilité sans faille et leur engagement envers mon succès académique ont été d'une importance capitale pour la réalisation de ce travail de recherche. Je tiens particulièrement à remercier M. Toufik Boushaki pour sa gentillesse, son soutien inconditionnel et surtout pour son sens de l'humour rafraîchissant qui a contribué à maintenir mon moral élevé durant les moments difficiles. Sa contribution a été d'une valeur inestimable, et je lui suis infiniment reconnaissante pour son soutien continu. Je lui suis également reconnaissante de m'avoir offert la possibilité d'enseigner à l'IUT. Je souhaite également exprimer ma gratitude envers mon directeur de thèse au GREMI, M. Eric Robert, pour son expertise en plasma et ses conseils précieux sur cette partie de ma thèse. Son soutien, surtout pendant les derniers jours avant la soutenance, a été d'une aide inestimable. Enfin, un grand merci à M. Pablo Ecot Bocanegra pour son assistance et son soutien tout au long les 3 années de thèse.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers les membres du jury de ma soutenance pour avoir pris le temps d'évaluer avec soin et rigueur mes travaux de thèse. Je suis particulièrement reconnaissante envers Mme Deanna Lacoste et M. Thierry Schuller pour leur rôle de rapporteurs et pour les précieux commentaires qui ont contribué à l'amélioration de mon manuscrit. Un grand merci à Mme Bénédicte Cuénot pour avoir présidé le jury et pour ses remarques constructives. Enfin, je souhaite exprimer ma sincère gratitude à M. Jean-Charles Sautet pour ses remarques et questions envoyé par email, son intérêt pour mon travail et notre échange ont été très appréciés.

Ce travail ne serait pas ce qu'il est sans l'aide de plusieurs personnes. Je tiens à remercier très profondément M. Stéphane Pellerin et M. Maxime Wartel de GREMI Bourges pour leur support sur la technique de spectroscopie d'émission optique et de m'avoir formé sur le logiciel, d'avoir transporté, mis en place, aligné l'ensemble du matériel, et assuré son bon fonctionnement. Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers M. Amine Koched pour ses précieuses aides et son support sur la technique de la PIV. Mes remerciements vont également à M. Mahmoud Idir pour leur assistance précieuse sur la technique de la PIV. Leur soutien technique et leur expertise ont grandement contribué à la qualité de mes travaux de recherche.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers les équipes de gestion administrative du laboratoire ICARE (Isabelle, Vincent, Patrick) et de l'université d'Orléans (Stéphanie et Frédérique) pour leur soutien constant et leur efficacité dans la gestion des aspects administratifs de ma thèse.

Mes remerciements vont également aux techniciens de l'atelier du laboratoire ICARE (Fabrice, Stéphane, Nicolas) pour leur serviabilité et leur expertise. Leur assistance précieuse a facilité la réalisation de mes expériences de recherche.

J'adresse mes plus vifs remerciements à toutes les personnes que j'ai pu côtoyer pendant ces trois ans aux laboratoires ICARE et GREMI. En particulier, je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à M. Brahim Sarh pour sa gentillesse, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ma thèse. Un immense merci également à M. Christian Chauveau pour son assistance administrative et scientifique précieuse. Je suis également reconnaissante envers M. Fabien Halter pour son aide, notamment en ce qui concerne le matériel nécessaire à la réalisation de mes expériences. Mes remerciements vont également à M. Philippe Dagaut pour sa bienveillance, son soutien moral et son assistance administrative dans les démarches auprès de l'université d'Orléans (CAPRYSES). Enfin, je souhaite exprimer ma vive reconnaissance envers M. Jean-Michel Pouvesle pour son soutien sur la partie plasma, particulièrement au début de ma thèse, ainsi que pour la formation qu'il m'a dispensée sur ce sujet. Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude envers tous les maîtres de conférences, chercheurs et professeurs à ICARE et au GREMI, notamment M. Stéphane Bostyn, Mme Véronica Belandria, M. Wahid Mellouki, Mme Nabihha Chaumeix, et d'autres, qui ont toujours été disponibles pour apporter leur aide sans hésitation.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers tous les doctorants, ingénieurs et post docs avec qui j'ai partagé ces trois années au laboratoire ICARE. Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers mes meilleurs amis et les personnes avec qui j'ai commencé ma thèse, Jean Noël "Juju", Hajar "Bout de Sucre" et Lydia "Lili d'Amour". Depuis 2020, ces amis exceptionnels, rencontrés au laboratoire, ont été mes compagnons à travers les moments difficiles et les moments de bonheur. Ensemble, nous avons vécu les années les plus mémorables de nos vies. Merci infiniment pour tout. Je n'aurais jamais imaginé ces années passées sans votre soutien infaillible, votre aide précieuse, votre humour irrésistible et nos éclats de rire inoubliables. Vous avez été mes piliers et mes sources constantes de réconfort. Merci du fond du cœur pour votre amitié et votre présence tout au long de ce parcours. Vous avez rendu cette aventure incroyable.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Zizou (Zahraa Dbouk) pour son soutien et sa générosité sans bornes, ainsi que pour chaque moment passé ensemble. Merci aussi à moi-même de lui avoir permis de faire la sieste dans mon bureau mdr :D. J'ai vraiment hâte de rencontrer "Habibi" - même si nous savons désormais que son vrai nom est Jawad, le bébé d'Icare. Tu es vraiment chanceux, Jawad, tu auras la meilleure maman au monde !

Un grand merci aussi à notre entrepreneur émérite, Brian, pour avoir été là à chaque étape, écoutant attentivement mes préoccupations et m'encourageant. C'est grâce à toi et zizou que le manuscrit a été imprimé le jour de la soutenance ! Merci infiniment ! Je te souhaite tout le succès du monde !

Je tiens à remercier tous mes autres collègues et amis à ICARE, notamment Alka, Fabian et Anthony, pour leur soutien et leur bonne humeur tout au long de cette aventure. Un grand merci également à Ayan, Diak, Nesrine, Melissa, Guillaume, Outmane, Antoine, Samuel, Valentin, Alaa, Romdan, Letitia, Hajar Z, Fanny, Hugo, Etienne, Ronan, etc. J'espère avoir fait le tour :D.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers mes étudiants à l'IUT et les stagiaires avec qui j'ai travaillé.

Mes plus sincères remerciements vont à ma famille, merci papa, c'est à toi que je dois là où je suis aujourd'hui. Merci maman, sans toi je n'en serai jamais arrivée là. Merci pour votre amour, votre soutien, et votre confiance. Je vous remercie pour tous les sacrifices que vous avez consentis pour je puisse réussir, j'aimerais que vous sachiez que je suis très fière d'être votre fille. C'est à vous que je dédie ce manuscrit.

À mon frère Hatem et à ma belle-sœur Naoures, ainsi qu'à mes adorables nièces Menyar et Molka, je vous adresse également mes plus sincères remerciements. Votre soutien, votre encouragement et votre aide ont été une source d'inspiration et de réconfort inestimable pour moi. Je vous suis infiniment reconnaissant et je vous aime énormément

Je voudrais aussi exprimer ma sincère reconnaissance envers les plus gentille des sœurs, Ibtissem, pour son soutien, son support et son assistance pendant mes études. De plus, je dédie cette réussite à mes deux adorables nièces Ritej et Julia, ainsi qu'à mon neveu Iyed. Vi voglio molto bene, miei cari.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon frère Helmi et à sa femme Hela pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants, ainsi qu'à leurs enfants Emir et Sophia. Je vous aime tous très fort, meine Lieben.

Je tiens également à remercier ma deuxième famille, spécialement envers ma belle-mère Hedia et mon beau-père Aych, pour leur soutien et leurs encouragements précieux. Je suis également reconnaissante envers mon beau-frère Aymen, et surtout envers bachboucha pour sa présence qui a illuminé ma vie durant les 3 ans passés à Orléans. Un grand merci également à ma belle-sœur Marwa pour sa gentillesse et son encouragement, ainsi qu'à mes chères Eline et Nadine pour leur soutien constant.

À l'amour de ma vie, Selim, je veux dire que les mots ne suffisent pas pour exprimer toute ma reconnaissance pour ton soutien inconditionnel, ton aide et tes encouragements. Tu as été ma famille tout au long de ces années, je t'aime énormément. Ta présence a été ma source de force et de bonheur, et je suis infiniment reconnaissante de t'avoir à mes côtés. Merci pour tout ce que tu as fait et pour tout ce que tu es pour moi.

A ma meilleure amie Raghd, merci pour ton soutien inestimable depuis nos années passées ensemble à l'école d'ingénieurs jusqu'aux derniers moments avant la soutenance de ma thèse. Ta présence constante et support ont été une source d'inspiration pour moi. Merci d'avoir été à mes côtés tout au long de ce parcours, et je sais que notre amitié restera toujours solide et présente.

Un immense merci également à Farah, ma confidente précieuse, pour tout le soutien et les encouragements, particulièrement lorsque la pression était à son comble avant la soutenance. Ta présence et tes mots encourageants ont vraiment fait la différence, et je suis incroyablement reconnaissante de t'avoir à mes côtés.

Je veux aussi exprimer ma gratitude à mes amies d'enfance depuis onze ans, Imene et Marwa. Merci mes sœurs d'âme pour votre soutien sans faille au fil des années. Votre amitié précieuse

a été un véritable pilier dans ma vie, et je suis reconnaissante d'avoir des amies aussi incroyables.

Cette thèse, financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet CAPRYSESSES, a été réalisée à l'Institut de Combustion Aérodynamique Réactivité et Environnement (ICARE) et au GREMI, à Orléans, du 01 octobre 2020 au 30 Septembre 2023.

---



---

**Table des matières**


---

Remerciements .....	v
Table des matières .....	1
Liste des publications scientifiques .....	6
Liste des communications orales et posters .....	7
Liste des Figures.....	9
Liste des Tableaux.....	19
Nomenclature et abréviations.....	20
Introduction générale.....	22
<b>Chapitre I. Généralités et état de l'art.....</b>	<b>27</b>
I.1. Introduction.....	29
I.2. Notions générales sur la combustion des flammes swirlées et non-prémélangées	29
I.2.1. Combustion : flammes non-prémélangées .....	30
I.2.1.1. Structure d'une flamme non-prémélangée.....	30
I.2.1.2. Comportement d'une flamme non-prémélangée.....	33
I.2.1.2.a. Flamme accrochée au brûleur .....	33
I.2.1.2.b. Flamme décrochée du brûleur .....	34
I.2.1.2.c. Les mécanismes de décrochage des flammes non-prémélangées.....	36
I.2.2. Combustion dans un écoulement swirlé .....	37
I.2.2.1. Le nombre de swirl.....	37
I.2.2.2. L'effet du swirl sur la stabilité des flammes .....	39
I.2.2.3. L'effet du swirl sur la formation des émissions polluantes .....	41
I.2.3. Les mécanismes de formation de composés polluants .....	42
I.2.3.1. Formation des oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ) .....	42
I.2.3.1.a. NO <sub>x</sub> précoce (prompt).....	42
I.2.3.1.b. NO <sub>x</sub> thermique .....	43
I.2.3.2. Formation de CO .....	43
I.2.3.3. Formation des suies et des particules solides.....	44
I.2.4. Influence de la présence de dioxyde de carbone dans le combustible.....	45
I.2.4.1. Effet de la dilution .....	45
I.2.4.2. Effet de la chimie.....	45
I.2.4.3. Effet thermique.....	46
I.2.4.4. Revue de la littérature sur l'effet de la présence de CO <sub>2</sub> sur la combustion	46
I.3. Notions générales sur les plasmas.....	47

---

I.3.1.	Fondamentaux .....	47
I.3.2.	Classification des plasmas.....	50
I.3.2.1.	Plasma thermique .....	50
I.3.2.2.	Plasma non thermique.....	51
I.3.3.	Les régimes du plasma.....	52
I.3.3.1.	La décharge couronne.....	52
I.3.3.2.	La décharge luminescente .....	52
I.3.3.3.	La décharge d'arc .....	53
I.3.4.	Principe et caractéristiques du plasma impulsionnel microseconde.....	54
I.3.5.	Applications des plasmas .....	55
I.4.	Combustion assistée par plasma .....	56
I.4.1.	Principe de la combustion assistée par plasma.....	56
I.4.1.1.	Effet thermique.....	56
I.4.1.2.	Effet cinétique .....	57
I.4.1.3.	Effet de transport .....	59
I.4.2.	Revue de la littérature sur la combustion assistée par plasma .....	60
I.4.2.1.	Combustion assistée par plasma impulsionnel nanoseconde .....	60
I.4.2.2.	Combustion assistée par plasma à arc glissant continu .....	65
I.4.2.3.	Combustion assistée par plasma impulsionnel microseconde .....	68
I.5.	Conclusion .....	70
<b>Chapitre II.</b>	<b>Dispositif expérimental et techniques de mesure .....</b>	<b>71</b>
II.1.	Introduction:.....	72
II.2.	Dispositif expérimental .....	72
II.2.1.	Chambre de combustion.....	72
II.2.2.	Brûleur coaxial à swirl.....	73
II.2.2.1.	Brûleur à injection radiale.....	74
II.2.2.2.	Brûleur à injection axiale.....	76
II.2.3.	Configuration des électrodes .....	77
II.2.3.1.	Les générateurs de haute tension.....	77
II.2.3.2.	Les configurations des électrodes .....	78
II.2.3.2.a.	Arc glissant.....	79
II.2.3.2.b.	Pointe-Tige-Pointe.....	79
II.2.3.2.c.	Tige-Anneau .....	80
II.3.	Techniques de mesure .....	81
II.3.1.	Technique de chimiluminescence sur OH*.....	81
II.3.1.1.	Principe.....	81
II.3.1.2.	Montage expérimental .....	82

II.3.2.	Analyse des gaz brûlés et mesure de températures.....	84
II.3.3.	Tension de décharge .....	86
II.3.4.	Spectroscopie d'émission optique .....	87
II.3.4.1.	Ocean FX-XR1-ES.....	88
II.3.4.2.	Acton Research Corporation SP2750i.....	89
II.3.5.	Vélocimétrie par images de particules (PIV) .....	89
II.3.5.1.	Principe de la PIV 2D.....	89
II.3.5.2.	Dispositif expérimental.....	90
II.3.5.2.a.	Système d'ensemencement .....	90
II.3.5.2.b.	Plan lumineux.....	92
II.3.5.2.c.	Calibration, acquisition des images et calculs des vitesses.....	92
II.4.	Paramètres opératoires .....	93
II.5.	Conclusion .....	96
<b>Chapitre III.</b>	<b>Brûleur à injection radiale .....</b>	<b>98</b>
III.1.	Introduction.....	99
III.2.	Configuration des électrodes: Arc Glissant .....	99
III.2.1.	Caractérisation du plasma.....	99
III.2.2.	Caractérisation de la flamme sans plasma.....	101
III.2.2.1.	Stabilité des flammes de biogaz.....	101
III.2.2.1.a.	Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> dans le combustible .....	101
III.2.2.1.b.	Effet de la richesse globale .....	109
III.2.2.1.c.	Effet de l'intensité de swirl .....	110
III.2.2.2.	Émissions polluantes.....	111
III.2.3.	Combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant.....	115
III.2.3.1.	Effet du plasma sur la stabilité et les émissions polluantes.....	115
III.2.3.2.	Spectroscopie d'émission optique.....	117
III.2.3.2.a.	Effet de la fréquence de répétition des impulsions.....	118
III.2.3.2.b.	Effet de la position d'acquisition du spectre d'émission.....	120
III.2.3.2.c.	Etude des espèces détectées .....	121
III.2.3.3.	Effet du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif.....	124
III.3.	Configuration des électrodes : Tige-Anneau .....	132
III.3.1.	Caractérisation du plasma.....	132
III.3.2.	Effet de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension électrique appliquée	133
III.3.2.1.	Stabilité des flammes de biogaz.....	133
III.3.2.2.	Emissions polluantes.....	135
III.3.3.	Effet du plasma sur les spectres d'émission optique.....	136

III.4. Conclusion .....	140
<b>Chapitre IV. Brûleur à injection axiale .....</b>	<b>142</b>
IV.1. Introduction.....	143
IV.2. Configuration des électrodes: Pointe-Tige-Pointe (PTP).....	143
IV.2.1. Combustion de biogaz assistée par plasma Pointe-Tige-Pointe .....	144
IV.2.1.1. Caractérisation du plasma .....	144
IV.2.1.1. Effet de la fréquence de répétition des impulsions et de l'amplitude de la tension appliquée .....	145
IV.2.1.1.a. Stabilité des flammes de biogaz.....	145
IV.2.1.1.b. Emissions polluantes .....	148
IV.2.1.2. Spectroscopie d'émission optique .....	151
IV.2.1.2.a. Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> dans le combustible.....	151
IV.2.1.2.b. Effet du plasma sur les spectres d'émission optique.....	152
IV.3. Configuration des électrodes: Arc glissant autour d'une tige fixe longue .....	161
IV.3.1. Caractérisation des flammes de biogaz sans plasma.....	161
IV.3.1.1. Stabilité des flammes de biogaz .....	162
IV.3.1.2. Formation des émissions polluantes .....	166
IV.3.1.3. Températures des produits de combustion .....	168
IV.3.2. Combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant.....	169
IV.3.2.1. Caractérisation du plasma .....	169
IV.3.2.2. Effet de l'activation du plasma.....	170
IV.3.2.2.a. Stabilité des flammes de biogaz.....	170
IV.3.2.2.b. Emissions polluantes .....	171
IV.3.2.2.c. Températures des produits de combustion .....	172
IV.4. Configuration des électrodes : Arc glissant autour d'une tige amovible courte. 173	
IV.4.1. Caractérisation de la flamme sans plasma.....	173
IV.4.1.1. Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> dans le combustible sur la structure de la flamme	173
IV.4.1.2. Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> dans le combustible sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif.....	176
IV.4.2. Combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant autour d'une tige amovible	181
IV.4.2.1. Effet du plasma sur la stabilité et les émissions polluantes .....	181
IV.4.2.2. Spectroscopie d'émission optique .....	184
IV.4.2.2.a. Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> sur les spectres d'émissions dans la flamme	185
IV.4.2.2.b. Effet du plasma sur les spectres d'émissions optiques.....	186
IV.4.2.3. Effets du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif.....	189

IV.5. Conclusion .....	197
Conclusion générale et perspectives.....	199
Annexe A. Calculs des propriétés des flammes de biogaz .....	212
Annexe B. Effet de la flamme sur le plasma .....	229
Annexe C. Etude préliminaire sur l'effet du plasma impulsionnel microseconde sur la production des suies .....	233
Annexe D. Effet de diamètre de la tige centrale de brûleur sur les spectres d'émission optiques .....	237
Annexe E. Résultats PIV - Brûleur à injection axiale .....	238

---

## Liste des publications scientifiques

---

**A. Ghabi**, P. Escot Bocanegra, B. Sarh, S. Dozias, E. Robert, T. Boushaki, Experimental study of stability and pollutant emissions of turbulent biogas flames under microsecond pulsed plasma, *Fuel*, Volume 353, 2023, DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129180.

**A. Ghabi**, T. Darny, S. Dozias, P. Escot Bocanegra, J-M Pouvesle, B. Sarh, E. Robert, T. Boushaki, Effects of pulsed gliding arc plasma on non-premixed CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>– air flame stability, *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 40. 2023, 101764, DOI: 10.1016/j.tsep.2023.101764.

**A. Ghabi**, P. Escot Bocanegra, E. Robert, T. Boushaki, Experimental investigation on microsecond pulsed plasma supported biogas combustion, *Engineering for Gas Turbines and Power*, 2023, *Accepté*.

**A. Ghabi**, T. Boushaki, P. Escot Bocanegra, E. Robert, Laminar Burning Velocity, Adiabatic Flame Temperature, and Pollutants of Biogas/Air Mixture at Various CO<sub>2</sub> Concentrations and Plasma Assist, *Combustion Science and Technology*, 2023, DOI: 10.1080/00102202.2023.2182202.

**A. Ghabi**, P. Escot Bocanegra, E. Robert, T. Boushaki, Microsecond pulsed tip-to-plane assisted non-premixed swirling biogas/air flames, *Energies*, 2023. *En cours de correction*.

S. Chakchak, A. Hidouri, **A. Ghabi**, A.F. Ghoniem, T. Boushaki, Experimental investigation on the stability of turbulent swirling methane/air-O<sub>2</sub> flames, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 141, 2023,110772.

S. Chakchak, A. Hidouri, **A. Ghabi**, M. Chrigui, and T. Boushaki, “Numerical Study of Turbulent Swirling Diffusion Flame Under Lean and Rich Conditions Using Turbulence Realizable k-epsilon Model, *Combustion Science and Technology*, vol. 195, pp. 1–22, DOI: 10.1080/00102202.2023.2182196

T. Boushaki, H. Zaidaoui, S. Chakchak, **A. Ghabi**, A. I. Abd El-Rahman, A. Ghoniem, Impact of Oxygen Enrichment and CO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O Dilution on Stability and Pollutant Emissions of Non-Premixed Swirling Turbulent Flames. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2023, DOI: 10.21203/rs.3.rs-2882573/v1

---

## Liste des communications orales et posters

---

**A. Ghabi**, T. Boushaki, P. Escot Bocanegra, E. Robert, Experimental Investigation on Microsecond Pulsed Plasma Assisted Biogas Combustion, ASME Turbo Expo 2023, Turbomachinery Technical Conference & Exposition (GT2023), June 26-30, 2023, Boston, Massachusetts, USA. *Oral+ Article*.

**A. Ghabi**, P. Escot Bocanegra, S. Dozias, Brahim Sarh, E. Robert, T. Boushaki, Effects of microsecond pulsed discharge plasma on biogas combustion: Stabilization, flame behavior, and pollutant emissions, 11th European Combustion Meeting (ECM11), April 26-28, 2023, Rouen, France. *Article + Poster*.

**A. Ghabi**, T. Boushaki, P. Escot Bocanegra, E. Robert, Effects of pulsed plasma discharges on a non-premixed swirling biogas/air flame, Mediterranean Combustion Symposium, MCS 12, Luxor, Egypt, January 23-26, 2023. *Article + Oral*.

**A. Ghabi**, T. Boushaki, P. Escot Bocanegra, E. Robert, Laminar Burning Velocity and Adiabatic Flame Temperature of Biogas/Air Mixture at various CO<sub>2</sub> Concentrations, 28<sup>th</sup> ICDERS, June 19-24, 2022, Napoli, ITALY. *Oral+ Article*.

**A. Ghabi**, T. Darny, S. Dozias, E. Robert, P. Escot Bocanegra, T. Boushaki, Effects of pulsed gliding arc plasma on non-premixed CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>- air flame stability, European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, INFUB-13, Algarve, Portugal, 19-22 April 2022. *Article + Oral+ Poster*.

**A. Ghabi**, F. Manseur, P. Escot Bocanegra, B. Sarh, T. Boushaki, Numerical and experimental study of laminar syngas flames, 10th European Combustion Meeting (ECM 2021), April 14-15, Napoli, Italy. *Article + Poster*.

**A. Ghabi**, P. Escot Bocanegra, E. Robert and T. Boushaki, Plasma-assisted stabilization of non-premixed swirling biogas/air flames by microsecond pulsed discharges, 3rd International Conference on Biofuels and Bioenergy, November 10-11, 2022, Paris, France. *Abstract + Oral*.

T. Boushaki, **A. Ghabi**, and H. Zaidaoui, Control of combustion and pollutant emissions by EGR "Exhaust Gas Recirculation, 2nd Global Summit and Expo on Aerospace and Mechanical Engineering (GSEAME2022), October 17-19, 2022, Dubai, UAE. *Abstract + Oral*.

T. Darny, **A. Ghabi**, S. Dozias, E. Robert, M. Wartel, S. Pellerin, P. Escot-Bocanegra and T. Boushaki. Study of the interaction between a methane-air flame and a microsecond pulsed plasma discharge. International workshop on plasma-assisted combustion, June 9<sup>th</sup> and 10<sup>th</sup>, 2022, Centrale-Supélec, Gif sur Yvette, France. *Abstract + Oral*.

T. Boushaki, S. Shanbhogue, **A. Ghabi**, A.I. Abdelrahman, A.F. Ghoniem, Turbulent premixed combustion of CH<sub>4</sub>-NH<sub>3</sub> in a swirl burner, 11th European Combustion Meeting (ECM11), April 26-28, 2023, Rouen, France. *Article + Poster*.

T. Boushaki, S. Shanbhogue, **A. Ghabi**, A.I. Abd El-Rahman, A.F. Ghoniem, Stability of CH<sub>4</sub>-NH<sub>3</sub> turbulent premixed swirling flame, IFRF, TOTeM 49 – Chemical energy carriers for long-term storage and long-distance transport of renewable energies, Mulhouse, France, June 14-15, 2023. *Abstract + Poster*.

S. Chakchak, A. Hidouri, **A. Ghabi**, M. Chrigui, T. Boushaki, Experimental and numerical investigation of dynamic and scalar behavior of turbulent swirled flame, Mediterranean Combustion Symposium, MCS 12, Luxor, Egypt, January 23-26, 2023. *Article + Oral*.

T. Boushaki, H. Zaidaoui, S. Chakchak, **A. Ghabi**, A.F. Ghoniem, Impact of oxygen enrichment and CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O dilution on stability and pollutant emissions of non-premixed swirling turbulent flames, Mediterranean Combustion Symposium, MCS 12, Luxor, Egypt, January 23-26, 2023. *Article + Oral*.

B. Sarh, V. Belandria, **A. Ghabi**, Y. Rahib, T. Boushaki, I. Gokalp, P. Gillon, S. Bostyn, Experimental Study of Gasification of Argan Nut Shell and Olives Pomace. Syngas Flame Characteristics, 28<sup>th</sup> ICDERS, June 19-24, 2022, Napoli, ITALY. *Abstract + Poster*.

## Chapitre I. Généralités et état de l'art

**Figure I.1.** Structure d'une flamme non-prémélangée

**Figure I.2.** Structure d'une flamme non-prémélangée selon l'approximation de Burke-Schumann

**Figure I.3.** Stabilisation d'une flamme non-prémélangée sur la lèvre d'un brûleur

**Figure I.4.** Stabilisation d'une flamme non-prémélangée décrochée et apparition d'une flamme triple

**Figure I.5.** Schéma du phénomène d'hystérésis

**Figure I.6.** Schéma des mécanismes de décrochage

**Figure I.7.** Un système de coordonnées cylindriques pour illustrer le calcul du nombre de swirl

**Figure I.8.** Processus de stabilisation de la flamme

**Figure I.9.** Formation et destruction de suies dans la flamme de non-prémélangée

**Figure I.10.** Diagramme  $\Phi$ -T de Pischinger

**Figure I.11.** Schéma de la différence entre gaz neutre et plasma

**Figure I.12.** Classification des plasmas par densité et température

**Figure I.13.** Température des électrons et des espèces lourdes dans le plasma

**Figure I.14.** Exemple de décharge de couronne

**Figure I.15.** Composition d'une décharge lumineuse

**Figure I.16.** Illustration d'un arc électrique entre deux métaux

**Figure I.17.** Diagramme des régimes du plasma

**Figure I.18.** Propulseur à effet hall PPS@5000

**Figure I.19.** Interaction plasma-combustion.

**Figure I.20.** Constantes de vitesse (a) et flux de réaction (b) pour les réactions de dissociation par impact électronique à des valeurs de champ électrique égales à 200 Td et 500 Td et les réactions de branchement en chaîne

**Figure I.21.** Schéma des voies d'amélioration cinétique et thermique de la combustion assistée par plasma pour les combustibles liquides à haute, moyenne et basse température

**Figure I.22.** Les voies d'amélioration de la combustion utilisant des décharges du plasma hors équilibre.

**Figure I.23.** Carte de stabilité du brûleur avec et sans décharges NRP pour différents facteurs de fractionnement de fuel et puissances thermiques de la flamme

**Figure I.24.** Comparaison de l'efficacité de combustion et des émissions, avec et sans les décharges NRP appliquées à 33 kHz avec une énergie moyenne déposée de  $3.4 \pm 0.8$  mJ, dans une flamme en forme de tulipe de 50 kW

**Figure I.25.** Images de la chimiluminescence OH\* dans les deux cas expérimental et numérique sans plasma (gauche) et avec plasma à 20 kHz (droite)

**Figure I.26.** Localisation du bord d'attaque de la flamme (a) sans et (b) avec activation du plasma à une PRF de 8 kHz

**Figure I.27.** La stabilité et les limites de décrochage en régime pauvre d'une flamme swirlée de méthane-air avec et sans décharges NRP en fonction de la pression

**Figure I.28.** Les limites de soufflage (LBO) des flammes prémélangées swirlées sans et avec pulsations de flux et avec ou sans allumage d'une décharge de type arc glissant

**Figure I.29.** Images OH-PLIF/PIV moyennées dans le temps des flammes non perturbées sans (a, b) et avec (c, d) décharges à arc glissant

**Figure I.30.** Limites de soufflage (LBO) des flammes  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{air}$  sans et avec les décharges à arc glissant

**Figure I.31.** Émissions de  $\text{NO}_x$  des flammes prémélangées swirlées sans et avec les décharges à arc glissant

**Figure I.32.** La richesse de décrochage et soufflage dans les deux cas sans et avec plasma  $\mu\text{RPD}$

**Figure I.33.** Les émissions des flammes ammoniac/air sans et avec plasma ( $Q_{\text{air}} = 20 \text{ L/min}$ )

## Chapitre II. Dispositif expérimental et techniques de mesure

**Figure II.1.** Photographie de la chambre de combustion.

**Figure II.2.** Représentation schématique de la chambre de combustion.

**Figure II.3.** Représentation schématique du brûleur à injection radiale, de ses composantes et circulation des réactifs : (a) vue en perspective ; (b) vue en coupe ; (c) vue en perspective de l'injecteur radial ; (d) vue en perspective du swirler.

**Figure II.4.** Paramètres géométriques du swirler : (a) coupe longitudinale et (b) coupe transversale, (c) représentation tridimensionnelle du swirler.

**Figure II.5.** Représentation schématique du brûleur à injection axiale.

**Figure II.6.** (a) Photographie d'un générateur électrique et (b) schéma électrique du générateur électrique.

**Figure II.7.** (a) Photographie de l'arc glissant en fonctionnement à la sortie de brûleur ( $Q_{\text{air}}=100 \text{ NL/min}$ , amplitude de la tension de 10.5 kV et une fréquence de répétition d'impulsion de 10 kHz) avec l'illustration des vues de (b) face et (c) de dessus de la configuration arc glissant.

**Figure II.8.** (a) Photographie du plasma en fonctionnement ( $\text{IEV}=10.5 \text{ kV}$  et  $\text{PRF}= 6 \text{ kHz}$ ) avec flamme de 80%  $\text{CH}_4$ -20%  $\text{CO}_2/\text{air}$  ( $Q_{\text{air}}= 100 \text{ NL/min}$ ,  $Q_{\text{CH}_4}= 8.5 \text{ NL/min}$ ,  $Q_{\text{CO}_2}=2 \text{ NL/min}$ ,  $\Phi=0.8$  et  $\text{Sn}=0.8$ ) à la sortie de brûleur avec les illustrations des vues de (b) face et (c) de dessus de la configuration Pointe-Tige-Pointe.

**Figure II.9.** (a) Photographie du plasma en fonctionnement ( $\text{IEV}=14 \text{ kV}$  et  $\text{PRF}= 10 \text{ kHz}$ ) avec flamme méthane/air ( $Q_{\text{air}}= 80 \text{ NL/min}$ ,  $Q_{\text{CH}_4}= 8.5 \text{ NL/min}$ ,  $\Phi=1$  et  $\text{Sn}=0.5$ ) à la sortie de brûleur avec les illustrations des vues de (b) face et (c) de dessus de la configuration Tige-Anneau.

**Figure II.10.** Analyse spectrale de l'émission du radical  $\text{OH}^*$  pour la transition  $\text{A}^2\Sigma \rightarrow \text{X}^2\Pi$  ( $v' = 0$ ,  $v'' = 0$ ) à l'aide du logiciel LIFBASE.

**Figure II.11.** Technique de chimiluminescence installée autour du système de combustion.

**Figure II.12.** (a) Caméra PI-MAX2, (b) Objectif Nikon 105 mm F/4.5 UV Nikkor, (c) filtre interférentiel UG11.

**Figure II.13.** Schéma des emplacements des thermocouples.

**Figure II.14.** Schéma du dispositif de mesure de tension du plasma.

**Figure II.15.** Schéma du principe de la spectroscopie d'émission optique.

**Figure II.16.** Schéma d'implantation du spectromètre d'émission optique Ocean FX-XR1-ES avec le système de combustion assistée par plasma.

**Figure II. 17.** Illustration du dispositif de diagnostic spectroscopique avec Acton Research Corporation SP2750i.

**Figure II.18.** Schéma descriptif du système PIV 2D.

**Figure II.19.** Schéma descriptif de l'ensemenceur.

**Figure II.20.** Système optique pour créer la nappe laser.

**Figure II.21.** Principe du calcul par inter-corrélation.

### Chapitre III. Brûleur à injection radiale

**Figure III.1.** Évolution temporelle de l'impulsion HT sans (ligne noire) et avec (ligne grise) activation du plasma. Les formes d'ondes sont moyennées sur 10 impulsions de tension.

**Figure III.2 :** Puissance appliquée à différentes fréquences de répétition des impulsions et tensions électriques appliquées.

**Figure III.3.** Photographies des flammes à différents taux de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour des richesses globales distinctes (0.8, 1 et 1.2), avec un temps d'exposition de 1/125 s.

**Figure III.4.** Images moyennes de la chimiluminescence OH\* en fonction du taux de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) avec un swirl de 0.5

**Figure III.5.** Les hauteurs d'accrochage des flammes avec l'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) et un nombre de swirl fixe Sn=0.5.

**Figure III.6.** Les longueurs des flammes avec l'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) et un nombre de swirl fixe Sn=0.5.

**Figure III.7.** Position du champ de vitesses par rapport à la sortie du brûleur à injection radiale avec tige allongée.

**Figure III.8.** Champs de vitesses radiale U (en haut) et longitudinale V (en bas) pour les deux cas 0% CO<sub>2</sub> (à gauche) et 30% CO<sub>2</sub> (à droite) dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et Sn=0.5

**Figure III.9.** Profils de vitesses radiale U (à gauche) et longitudinale V (à droite) à différentes hauteurs (Y=5, 20, 40, 60 et 80 mm) pour les deux cas 0% CO<sub>2</sub> (en rouge) et 30% CO<sub>2</sub> (en vert) dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et Sn=0.5.

**Figure III.10.** Photographies de deux cas de flamme de biogaz (20% CO<sub>2</sub> et 40% CO<sub>2</sub>) en fonction de la richesse globale avec un swirl Sn=0.5.

**Figure III.11.** Images moyennes de la chimiluminescence OH\* en fonction de la richesse globale pour deux cas de flamme de biogaz (20% CO<sub>2</sub> et 40% CO<sub>2</sub>) avec un swirl Sn=0.5.

**Figure III.12.** Photographies de trois cas de flamme de biogaz (0% CO<sub>2</sub>, 20% CO<sub>2</sub> et 40% CO<sub>2</sub>) en fonction du nombre de swirl avec une richesse fixe à 0.8.

**Figure III.13.** Émissions de NO<sub>x</sub> en fonction des pourcentages d'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) et pour trois nombres de swirl (0.5, 0.8 et 1.1).

**Figure III.14.** Émissions de CO en fonction des pourcentages d'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) et pour trois nombres de swirl (0.5, 0.8 et 1.1).

**Figure III.15.** Photographies des flammes de méthane/air et biogaz/air dans deux cas, avec et sans activation du plasma, à différentes fréquences de répétition d'impulsions (2 kHz, 6 kHz et 10 kHz).

**Figure III.16.** Émissions de NO<sub>x</sub> et CO d'une flamme du biogaz (80% CH<sub>4</sub>-20% CO<sub>2</sub>)/air avec PRF à différentes tensions IEV (5 kV et 10.5 kV).

**Figure III.17.** (a) Dispositif expérimental pour la spectroscopie d'émission optique, (b) Positions d'acquisition des spectres.

**Figure III.18.** Spectres d'émission optique dans une flamme de 80% CH<sub>4</sub>-20% CO<sub>2</sub>/air assistée par MPP. Les mesures ont été effectuées à trois positions de vue différentes, nommées Pos1, Pos2 et Pos3, et à différentes fréquences de répétition du plasma.

**Figure III.19.** Spectres d'émission optique dans une flamme de 80% CH<sub>4</sub>-20% CO<sub>2</sub>/air assistée par MPP. Les mesures ont été effectuées à trois positions d'acquisition différentes, nommées Pos1, Pos2 et Pos3, à PRF fixé à 10 kHz et IEV à 10.5 kV.

**Figure III.20.** Spectres d'émission optique dans une flamme de 80% CH<sub>4</sub>-20% CO<sub>2</sub>/air assistée par MPP. Les mesures ont été effectuées à deux positions d'acquisition différentes, nommées Pos2 et Pos3, à PRF fixé à 10 kHz et IEV à 10.5 kV.

**Figure III.21.** SEO de OH\* dans la plage 304-316 nm sans et avec plasma à trois différentes PRFs pour deux tensions IEV différentes (5 kV et 10.5 kV).

**Figure III.22.** SEO de CH\* dans la plage 428-434 nm sans et avec plasma à trois différentes PRFs avec deux tensions IEV différentes (5 kV et 10.5 kV).

**Figure III.23.** SEO de O\* dans la plage de 750-790 nm sans et avec plasma à trois différentes PRFs avec deux tensions IEV différentes (5 kV et 10.5 kV).

**Figure III.24.** Champs moyens de vitesses (en échelle de couleurs) radiale U (en haut) et longitudinale (en bas) avec le champ des vecteurs issus de la composition des deux vitesses pour le cas 0% CO<sub>2</sub> dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $S_n=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure III.25.** Profils de vitesse radiale U (à gauche) et longitudinale (à droite) à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas 0% CO<sub>2</sub> dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $S_n=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure III.26.** Profils de fluctuations de vitesse longitudinale  $V'$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60, 80$  et  $100$  mm) pour le cas 0% CO<sub>2</sub> dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $S_n=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure III.27.** Champs moyens de vitesses radiale U (à gauche) et longitudinale V (à droite) avec le champ des vecteurs issus des deux vitesses pour le cas 30% CO<sub>2</sub> dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $S_n=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure III.28.** Profils de vitesse radiale U à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas 30% CO<sub>2</sub> dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $S_n=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure III.29.** Évolution temporelle de l'impulsion HT avant et après l'initiation du plasma.

**Figure III.30.** Puissance consommée par le plasma pour différentes fréquences et tensions appliquées au plasma.

**Figure III.31.** Photographies des flammes de CH<sub>4</sub> et de CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> sans plasma et avec plasma à différentes fréquences. Les lignes pointillées rouges indiquent le bas de chaque flamme avant l'activation du plasma.

**Figure III.32.** Images moyennes de la chimiluminescence OH\* en fonction de la fréquence de répétition d'impulsions pour deux cas de flammes 0% CO<sub>2</sub> et 30% CO<sub>2</sub> dans le combustible.

**Figure III.33.** Les émissions de NO<sub>x</sub> des flammes de CH<sub>4</sub>-Air et 70% CH<sub>4</sub> / 30% CO<sub>2</sub>-Air en fonction de la PRF à différentes IEV (7 kV et 14 kV).

**Figure III.34.** Les émissions de CO des flammes de CH<sub>4</sub>-Air et 70% CH<sub>4</sub> / 30% CO<sub>2</sub>-Air en fonction de la PRF à différentes IEV (7 kV et 14 kV).

**Figure III.35.** Spectres d'émission optique des flammes CH<sub>4</sub>-Air et 70%CH<sub>4</sub>/30%CO<sub>2</sub>-Air avec et sans activation plasma. Le temps d'intégration est de 2s. Le cercle rouge dans les images à droite de chaque spectre indique la position d'acquisition de l'installation optique.

**Figure III.36.** SEO d'OH\* dans la région de longueur d'onde 280-330 avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV).

**Figure III.37.** SEO dans la région de longueur d'onde 425-435 nm avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV) à PRF= 10 kHz.

**Figure III.38.** SEO dans la région de longueur d'onde 490-430 avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV) à PRF= 10 kHz.

**Figure III.39.** SEO dans la région de longueur d'onde 320-400 avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV) à PRF= 10 kHz.

**Figure III.40.** SEO dans la région de longueur d'onde 650-670 nm avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV) à PRF= 10 kHz.

## Chapitre IV. Brûleur à injection axiale

**Figure IV.1.** Évolution temporelle (a) des impulsions HT avec plasma ; (b) d'une impulsion HT sans (ligne noire) et avec (ligne rouge) initiation du plasma. Les formes d'onde sont moyennées sur 25 impulsions de HT.

**Figure IV.2.** Photos directes de la flamme dans les deux cas Plasma-OFF et Plasma-ON avec différentes fréquences de répétition des impulsions du plasma (de 0.5 kHz à 10 kHz).

**Figure IV.3.** Images moyennes de 100 images instantanées d'intensité d'émission OH\* de la flamme CH<sub>4</sub>/air avec et sans activation du plasma en fonction de l'augmentation de la PRF.

**Figure IV.4.** Images moyennes de 100 images instantanées d'intensité d'émission OH\* de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/air avec et sans activation du plasma en fonction de l'augmentation de la PRF

**Figure IV.5.** Hauteur d'accrochage de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air à différentes PRFs du plasma.

**Figure IV.6.** Émissions de CO de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air en fonction de la PRF à différentes IEV.

**Figure IV.7.** Émissions de NO<sub>x</sub> de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air en fonction de la PRF à différentes tensions électriques appliquées.

**Figure IV.8.** Émissions de O<sub>2</sub> de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air en fonction de la PRF à différentes tensions électriques appliquées.

**Figure IV.9.** Émissions de CO<sub>2</sub> de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air en fonction de la PRF à différentes tensions électriques appliquées.

**Figure IV.10.** (a) SEO mesurés à partir des flammes avec trois compositions de mélange de combustible (100% CH<sub>4</sub>, 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>, 71%CH<sub>4</sub>-29%CO<sub>2</sub>) (voir Tableau II.6), (b) Spectres d'émission OH\* mesurés à partir des flammes avec différentes compositions de mélange de combustible.

**Figure IV.11.** Six sous-sections de longueurs d'ondes combinées des SEO (200-300. 300-400. 400-500. 500-600. 600-700. 700-800 nm) de la flamme 83% CH<sub>4</sub>-17% CO<sub>2</sub>/Air à différentes fréquences de répétition du plasma.

**Figure IV.12.** Spectre d'émission de NO\* dans la plage de 244-256 nm à 3 différentes PRFs: a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

**Figure IV.13.** Spectre d'émission de OH\* dans la plage de 305-315 nm à 3 différentes PRFs: a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

**Figure IV.14.** Spectres d'émission de NH (336 nm) et de N<sub>2</sub>\* (336 nm) dans la plage de 331-341 nm à 3 différentes PRFs : a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

**Figure IV.15.** Spectre d'émission de N<sub>2</sub>\* dans la plage de 350-362 nm à 3 différentes PRFs: a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

**Figure IV.16.** Spectre d'émission CN\* dans la plage de 380-390 nm à 3 différentes PRFs: a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

**Figure IV.17.** Spectre d'émission CH\* dans la plage de 430-434 nm à 3 différentes PRFs : a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

**Figure IV.18.** Spectre d'émission C<sub>2</sub>\* dans la plage de 509-521 nm à 3 différentes PRFs : a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

**Figure IV.19.** Spectre d'émission H<sub>α</sub> dans la plage de 650-660 nm à 3 différentes PRFs : a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

**Figure IV.20.** Photographies des flammes avec un temps d'exposition de 1/100 s en faisant varier le taux de CO<sub>2</sub> pour trois différentes richesses globales (0.4, 0.6 et 0.8). La ligne rouge en pointillé montre la base de la flamme sans CO<sub>2</sub>.

**Figure IV.21.** Images moyennes de la chimiluminescence OH\* en fonction des taux de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour différentes richesses (0.4, 0.6 et 0.8)

**Figure IV.22.** Hauteur d'accrochage en fonction des différents pourcentages d'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour les flammes décrochées avec des richesses de 0.4 et 0.6, à des puissances de flamme de 2.6 kW et 3.6 kW respectivement, et un Sn= 0.8.

**Figure IV.23.** Émissions de NO<sub>x</sub> et de CO en fonction du pourcentage d'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour une richesse de a) Φ=0.4, b) Φ=0.6 et c) Φ=0.8.

**Figure IV.24.** Température des gaz brûlés (à 3 différentes positions dans la chambre de combustion) en fonction du taux de CO<sub>2</sub> à une richesse de Φ=0.4.

**Figure IV.25.** Évolution temporelle de l'impulsion HV sans activation du plasma (ligne noire) et avec activation du plasma (ligne rouge). Les formes d'onde sont moyennées sur 15 impulsions de tension.

**Figure IV.26.** Photographies (temps d'exposition de 1/100s) de la flamme dans le cas du plasma éteint (OFF) et du plasma activé (f=10kHz) (ON) avec différentes fractions du CO<sub>2</sub> (0%, 23% et 33%) à Φ=0.4.

**Figure IV.27.** Effet du plasma PGA sur les émissions de NO<sub>x</sub> et de CO à Φ=0.4 avec différents pourcentages de CO<sub>2</sub> dans le combustible.

**Figure IIV.29.** Effet du plasma PGA sur la température des gaz brûlés (T1) dans le cas du plasma éteint (OFF) et du plasma activé (ON).

**Figure IV.29.** Images moyennes de la chimiluminescence OH\* en fonction des taux de CO<sub>2</sub> dans le combustible en utilisant deux différentes diamètres de tige centrale 4 mm et 8 mm.

**Figure IV.30.** (a) Longueurs et (b) hauteurs d'accrochage des flammes avec l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour deux différents diamètres de tige centrale 4 mm et 8 mm.

**Figure IV.31.** Positions du champ de vitesses par rapport à la sortie du brûleur et les profils horizontales Y de vitesses.

**Figure IV.32.** Champs moyens de vitesse radiale U avec le champ de vecteurs (a et b) et lignes de courant (c et d) pour les deux cas 0% CO<sub>2</sub> (a et c) et 30% CO<sub>2</sub> (b et d) dans le cas  $\Phi=0.7$ , tige centrale de 4 mm et Sn=0.5.

**Figure IV.33.** Champs moyens de vitesse longitudinale V (en échelle de couleur) avec le champ de vecteurs pour les deux cas 0% CO<sub>2</sub> et 30% CO<sub>2</sub> dans le mélange de combustible,  $\Phi=0.7$ , tige centrale de 4 mm et Sn=0.5.

**Figure IV.34.** Profils de vitesses radiale U (à gauche) et longitudinale V (à droite) à différentes hauteurs (Y=5, 20, 40, 60 mm) pour les deux cas 0% CO<sub>2</sub> (en noir) et 30% CO<sub>2</sub> (en bleu),  $\Phi=0.7$ , Tige 4 mm et Sn=0.5.

**Figure IV.35.** Photographies (temps d'exposition de 1/250 s) de la flamme de méthane (0% CO<sub>2</sub>) sans plasma (plasma-OFF) et avec plasma à différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).

**Figure IV.36.** Photographies (temps d'exposition de 1/250 s) de la flamme du biogaz (15% CO<sub>2</sub>) sans plasma (plasma-OFF) et avec plasma à différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).

**Figure IV.37.** Photographies (temps d'exposition de 1/250 s) de la flamme du biogaz (30% CO<sub>2</sub>) sans plasma (plasma-OFF) et avec plasma à différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).

**Figure IV.38.** Les émissions de NO<sub>x</sub> et de CO des flammes de biogaz avec des différentes PRFs, en utilisant deux diamètres de tige (4 et 8 mm), pour les cas (a) 0%, (b) 15% et (c) 30% de CO<sub>2</sub>.

**Figure IV.39.** Positions d'acquisition pour la spectroscopie d'émission optique.

**Figure IV.40.** Spectroscopie d'émission optique des flammes de biogaz à différentes concentrations de CO<sub>2</sub> (0%, 15% et 30%) dans le combustible, (a) sans plasma et (b) avec plasma à une PRF de 10 kHz, à la position d'observation Pos 2 en utilisant une tige centrale de 8 mm.

**Figure IV.41.** SEO de la flamme (a) de méthane (0% CO<sub>2</sub>) et (b) de biogaz (85%CH<sub>4</sub>-15%CO<sub>2</sub>), à la position de vision Pos 2, avec et sans plasma pour différentes PRFs en utilisant une tige centrale de 8 mm.

**Figure IV.42.** Plages de longueurs d'onde (280-350 nm, 350-420 nm, 420-440 nm, 500-530 nm, 750-800 nm) pour les SEO d'une flamme de méthane à la position de vision Pos 2, sans et avec plasma, en utilisant une tige centrale de 8 mm et 3 différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).

**Figure IV.43.** SEO à la position de vision Pos 1 de la flamme de méthane ((a) 0% CO<sub>2</sub>) et biogaz ((b) 15% CO<sub>2</sub>), pour 3 différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).

**Figure IV.44.** Champs moyens de la vitesse radiale U (en haut) et vitesse longitudinale V (en bas) (en échelle de couleur) et les vecteurs issus des deux composantes de vitesses pour le cas 0% CO<sub>2</sub> dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , tige centrale de 8 mm et Sn=0.5, sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à f=10 kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure IV.45.** Profils horizontaux de vitesse radiale U (à gauche) et vitesse longitudinale V (à droite) à différentes hauteurs (Y=5, 20, 40, 60 et 80 mm) pour le cas 0% CO<sub>2</sub> dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , tige centrale de 8 mm et Sn=0.5, sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à f=10 kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure IV.46.** Profils horizontaux de fluctuations (RMS) de vitesse longitudinale  $V'$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 80$  et  $100$  mm) pour le cas  $0\%$   $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , tige centrale de  $8$  mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.

**Figure IV.47.** Champs moyens de vitesses radiale  $U$  (à gauche) et longitudinale  $V$  (à droite) (en échelle de couleur) avec le champ des vecteurs vitesses pour le cas  $30\%$   $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , tige centrale de  $8$  mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.

**Figure IV.48.** Profils horizontaux de la vitesse longitudinale  $V$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $30\%$   $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , tige centrale de  $8$  mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.

## Annexes

**Figure A.1.** Schéma de la structure d'une flamme laminaire

**Figure A.2.** Vitesse de flammes laminaires ( $S_L$ ) du mélange  $\text{CH}_4$ -air en fonction de la richesse, à  $1$  bar et  $300$  K. Les résultats de calcul avec différents mécanismes chimiques sont comparés aux résultats expérimentaux de la littérature

**Figure A.3.** Vitesses des flammes laminaires ( $S_L$ ) en fonction de la richesse ( $\phi$ ) à  $1$  bar et  $300$  K de : a)  $90\%$   $\text{CH}_4$ - $10\%$   $\text{CO}_2$ /air ; b)  $80\%$   $\text{CH}_4$ - $20\%$   $\text{CO}_2$ /air ; c)  $60\%$   $\text{CH}_4$ - $40\%$   $\text{CO}_2$ /air ; d)  $50\%$   $\text{CH}_4$ - $50\%$   $\text{CO}_2$ /air. Comparaison des calculs numériques avec différents mécanismes chimiques aux résultats expérimentaux de la littérature.

**Figure A.4.** Évolution de la vitesse de flamme laminaire ( $S_L$ ) en fonction de la richesse pour des mélanges de  $100\%$   $\text{CH}_4$ - $0\%$   $\text{CO}_2$  ;  $90\%$   $\text{CH}_4$ - $10\%$   $\text{CO}_2$ /air ;  $80\%$   $\text{CH}_4$ - $30\%$   $\text{CO}_2$ /air ;  $60\%$   $\text{CH}_4$ - $40\%$   $\text{CO}_2$ /air et  $50\%$   $\text{CH}_4$ - $50\%$   $\text{CO}_2$ /air à  $1$  bar et  $298$  K.

**Figure A.5.** Vitesse de flamme laminaire ( $S_L$ ) en fonction du pourcentage de  $\text{CO}_2$  dans le combustible pour les richesses  $0.6 - 1$ .

**Figure A.6.** Vitesse de flamme laminaire de biogaz à différentes compositions en fonction de la richesse à  $T=307$  K et  $P=1$  bar.

**Figure A.7.** Évolution de la vitesse de flamme laminaire en fonction de la pression initiale à une température initiale de  $300$  K et richesse égale à  $1$ .

**Figure A.8.** Évolution de la vitesse de flamme laminaire en fonction de la température initiale à pression initiale de  $1$  bar et richesse égale à  $1$ .

**Figure A.9.** Variation de la vitesse de flamme laminaire ( $S_L$ ) en fonction de la pression finale de compression.

**Figure A.10.** Température de flamme adiabatique en fonction de la richesse pour différentes compositions de biogaz, à  $1$  bar et  $300$  K.

**Figure A.11.** Fraction massique de  $\text{CO}$  en fonction de la richesse pour différentes compositions de biogaz, à  $1$  bar et  $300$  K.

**Figure A.12.** Fraction massique de  $\text{NO}_x$  en fonction de la richesse pour différentes compositions de biogaz, à  $1$  bar et  $300$  K.

**Figure B.1.** (a) Configuration des électrodes Pointe-Tige, (b) Image chimiluminescence  $\text{OH}^*$  d'une flamme de méthane et plasma avec  $\text{PRF}=1$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV montrant les positions d'acquisition pour la spectroscopie d'émission optique.

**Figure B.2.** Spectres d'émission de OH et de  $N_2^*$  dans la plage de 300-340 nm à différentes zones dans l'arc du plasma (Tip, Flame edge, Filament et contact point)

**Figure B.3.** Spectres d'émission de H $\alpha$  la plage de 652-660 nm à différentes zones dans l'arc du plasma (Tip, Flame edge, Filament et contact point)

**Figure B.4.** Spectres d'émission de O dans la plage de 770-780 nm à différentes zones dans l'arc du plasma (Tip, Flame edge, Filament et contact point)

**Figure B.5.** Évolution temporelle de l'impulsion HT avant et après l'initiation du plasma (PRF=1 kHz) au niveau des électrodes dans les deux cas en présence de flamme ( $Q_{air}=1$  NL/min ;  $Q_{air}=10$  NL/min,  $\phi=1$ ) et sans flamme.

**Figure C.1.** Système de récupération de suies.

**Figure C.2.** Photographies de flamme du biogaz étudiée biogaz ( $Q_{air}=50$  NL/min ;  $Q_{CH_4}=7$  NL/min et  $Q_{CO_2}=2$  NL/min) avec une richesse globale  $\Phi$  de 1.35, dans les deux cas sans plasma (Plasma OFF) et avec plasma (Plasma ON) avec  $f=10$  kHz et  $U=14$  kV.

**Figure C.3.** (a) Spectres Raman réalisés sur l'échantillon sans plasma. (b), mapping réalisé à différents endroits de l'échantillon.

**Figure C.4.** Images MO des particules détectés dans les gaz brûlés d'une flamme du biogaz ( $Q_{air}=50$  NL/min ;  $Q_{CH_4}=7$  NL/min et  $Q_{CO_2}=2$  NL/min) avec une richesse globale  $\Phi$  de 1,35, dans les deux cas sans et avec activation du plasma ( $f=10$  kHz ;  $U=14$  kV). Grossissement  $\times 20$  et  $\times 100$ .

**Figure D.1.** OES d'une flamme du biogaz contenant 15% de  $CO_2$  dans le combustible avec plasma à PRF=10 kHz, observée à deux positions de vision différentes : (a) Pos 1 et (b) Pos 2, en utilisant des diamètres de tige centrale différents (4 mm et 8 mm).

**Figure E.1.** Profils horizontaux de la vitesse radiale  $U$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas 30%  $CO_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 8 mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure E.2.** Profils horizontaux de fluctuation (RMS) de vitesse longitudinale  $V'$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas 30%  $CO_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 8 mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure E.3.** Champs moyens de vitesse radiale  $U$  avec le champ des vecteurs issus des deux vitesses  $U$  et  $V$  pour le cas 0%  $CO_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 4 mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure E.4.** Profils horizontaux de vitesse radiale  $U$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas 0%  $CO_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 4 mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure E.5.** Champs moyens de vitesse longitudinale  $V$  avec le champ des vecteurs vitesse pour le cas 0%  $CO_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 4 mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure E.6.** Profils horizontaux de vitesse longitudinale  $V$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas 0%  $CO_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 4 mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure E.7.** Champs moyens de vitesse radiale  $U$  avec le champ des vecteurs vitesses pour le cas 30%  $CO_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 4 mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.

**Figure E.8.** Profils horizontaux de vitesse radiale  $U$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40$  et  $60$  mm) pour le cas  $30\% \text{ CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de  $4$  mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $IEV= 10.5$  kV.

**Figure E.9.** Champs moyens de vitesse longitudinale  $V$  avec le champ des vitesses pour le cas  $30\% \text{ CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de  $4$  mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $IEV= 10.5$  kV.

**Figure E.10.** Profils horizontaux de vitesse longitudinale  $V$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $30\% \text{ CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de  $4$  mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $IEV= 10.5$  kV.

---

## Liste des Tableaux

---

### Chapitre I. Généralités et état de l'art

**Tableau I.1.** Relations entre  $Z$ ,  $Y_F$ ,  $Y_O$ ,  $Y_P$

**Tableau I.2.** Les réactions principales dans le système de réaction  $H_2/O_2/N_2$  assisté par plasma.

### Chapitre II. Dispositif expérimental et techniques de mesure

**Tableau II.1.** Dimensions des deux swirlers utilisés dans cette étude.

**Tableau II.2.** Evaluation des incertitudes des mesures de hauteur d'accrochage et de longueur de flamme

**Tableau II.3.** Caractéristiques des analyseurs de gaz Horiba PG250 et ABB 02020.

**Tableau II.4.** Positions et types des thermocouples

**Tableau II.5.** Tableau récapitulatif des conditions opératoires avec le brûleur à injection radiale et les deux configurations du plasma Arc glissant et Tige-Anneau.

**Tableau II.6.** Tableau récapitulatif des conditions opératoires avec le brûleur à injection axiale et les deux configurations du plasma Pointe-Tige-Pointe et Arc glissant autour d'une tige fixe.

**Tableau II.7.** Tableau récapitulatif des conditions opératoires avec le brûleur à injection axiale et la configuration des électrodes Arc glissant autour d'une tige amovible courte de différents diamètres.

### Annexes

**Tableau A.1.** Températures et Pressions finales de compression

---

## Nomenclature et abréviations

---

### Méthodes expérimentales et autres termes techniques

MPP	Plasma impulsif microseconde ou « Microsecond pulsed plasma » en anglais
PTP	Pointe-Tige-Pointe
DBD	Décharge à barrière diélectrique
NRP	Plasma nanoseconde répétitives
GA	Arc glissant ou « Gliding arc » en anglais
ZRC	Zone de recirculation centrale
IRZ	Zone de recirculation interne
LBO	Limite de soufflage
PIV	Vélocimétrie par imagerie de particules
$\mu$ RPD	Décharges impulsif microseconde à faible puissance
EGR	Exhaust gas recirculation (en anglais)
ICCD	« Intensified charge-coupled device » en anglais
T	Température initiale [K]
P	Pression initiale [bar]
Q	Débit volumique [NL/min]
$S_L$	Vitesse de flamme laminaire [cm/s]
$T_{ad}$	Température adiabatique de flamme [K]
U	Vitesse d'écoulement axial [m/s]
V	Vitesse d'écoulement longitudinal [m/s]
$U'$	Fluctuation (RMS) de vitesse radiale [m/s]
$V'$	Fluctuation (RMS) de vitesse longitudinale [m/s]
RMS	Fluctuation ou « Root Mean square » en anglais
F	Combustible
O	Oxydant
P	Produit de combustion
HT	Haute tension
PRF	Fréquence de répétition des impulsions ou « pulse repetition frequency » en anglais [kHz]
IEV	Tension délivrée par le générateur électrique ou « Input electrical voltage » en anglais [kV]
SEO	Spectroscopie d'émission optique ou « Optical emission spectroscopy (OES) » en anglais
UV	Ultra-violet
$L_f$	Longueur de flamme [mm]
$H_f$	Hauteur d'accrochage ou « Lift-off height » en anglais [mm]
$V_{fuel}$	Vitesse d'injection de fuel [m/s]
$V_{air}$	Vitesse d'injection de l'air [m/s]
$T_g$	Température des gaz [K]
$T_e$	Température des électrons [K]
$U_a$	Vitesse d'accrochage [m/s]
$U_1$	Vitesse de décrochage [m/s]

$Y_O$	Fraction massique de l'oxydant
$Y_F$	Fraction massique du combustible
$G_x$	Flux de quantité de mouvement axial
$G_\theta$	Flux de quantité de mouvement angulaire
$Sn$	Nombre de swirl
$s$	Epaisseur de la pale du swirler [mm]
$z$	Nombre de pales du swirler
$R$	Rayon externe du tube annulaire du swirler [mm]
$R_h$	Rayon externe du tube central du swirler [mm]
$W_i$	Masse moléculaire de l'espèce $i$ [u]
$\dot{\omega}_i$	Taux de production molaire de l'espèce $i$

### Symboles et unités

$\Phi$	Richesse
$\rho$	Masse volumique [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\Psi$	Facteur de blocage
$\mu$	Viscosité dynamique [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
u.a	Unité arbitraire ou « arbitrary unit (a.u) » en anglais
ppm	Partie par million ( $10^{-6}$ ), 1000 ppm=0.1%
kHz	Kilohertz : mesure de fréquence des ondes radioélectriques du système international (1 kHz=1000 Hz)
eV	Electron-volt : Unité de mesure d'énergie (1eV=1.6. $10^{-19}$ J, où J=Joule)
$\mu\text{m}$ et nm	Micromètre et Nanomètre : Unités de longueur (1 nm= $10^{-3}$ $\mu\text{m}$ = $10^{-9}$ m)
K	Kelvin : Unité de température (T(K)= T( $^{\circ}$ C) +273.15)
Pa et bar	Unités de pression (1 bar= $10^5$ Pa)

### Espèces chimiques

$\text{CH}_4$	Méthane
$\text{CO}_2$	Dioxyde de carbone
$\text{NO}_x$	Oxydes d'azote
$\text{CO}$	Monoxyde de carbone
$\text{O}_2$	Oxygène
$\text{ZrO}_2$	Oxyde de zirconium
$\text{N}_2$	Diazote
$\text{NO}$	Monoxide d'azote
$\text{C}_2$	Molécule de décarbure
$\text{O}$	Oxygène atomique
$\text{CH}$	Radical Méthylidyne
$\text{OH}$	Radical hydroxyle
$\text{CN}$	Radical cyanogène
$\text{H}_\alpha$	Raie spectrale de balmer de l'hydrogène

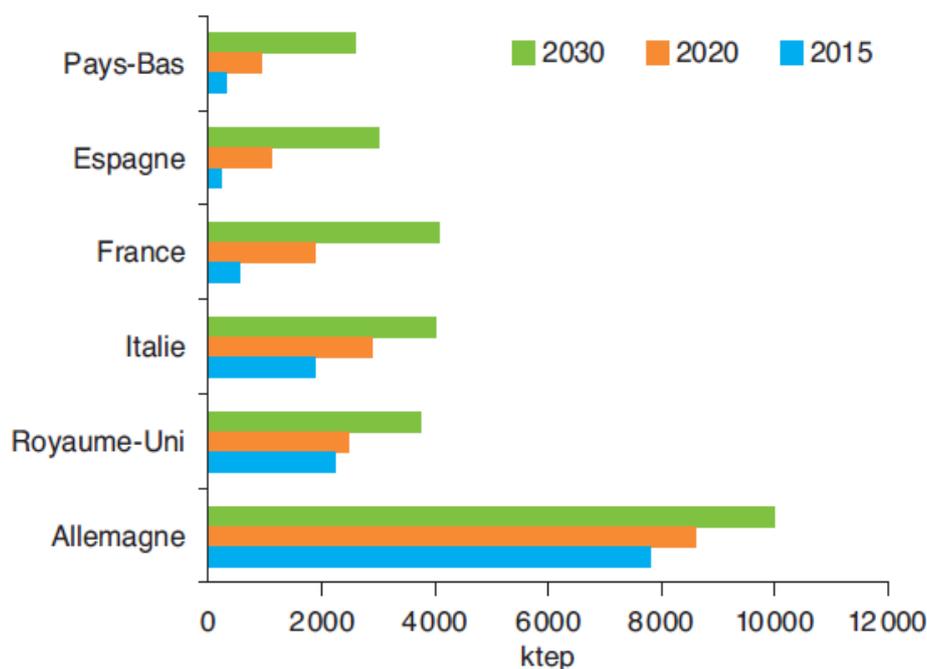
---

## Introduction générale

---

Le conflit persistant en Ukraine met en lumière la dépendance des nations européennes vis-à-vis des pays producteurs de gaz et atteste de la nécessité d'atteindre l'indépendance énergétique. Dans ce contexte, le secteur du gaz renouvelable s'impose comme une opportunité stratégique à saisir. Face à la crise climatique mondiale, le biogaz, issu de la dégradation anaérobie de la matière organique, se présente comme une source d'énergie prometteuse et durable. Le biogaz est composé principalement de méthane, de dioxyde de carbone, et de petites quantités d'azote et d'oxygène. Cette diversité chimique en fait une source d'énergie adaptable, utilisable pour la production d'électricité, de chaleur, l'injection dans les réseaux de gaz naturel, les véhicules, et même les piles à combustible [1].

La Figure 1 présente le potentiel de développement des biogaz en Europe entre 2015 et 2030 [2]. L'importance du biogaz dans la transition énergétique européenne est indiscutable, comme en témoigne une étude commandée par la Commission européenne [3]. Cette étude révèle un potentiel considérable de production de biogaz à partir de déchets, estimé entre 30 et 40 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) sur la période de 2015 à 2030. Cela représente environ 3 % de la consommation totale d'énergie en Europe et près de 10 % de la consommation de gaz à l'horizon 2030.



Source : Ifpen

**Figure 1.** Potentiel de développement des biogaz en Europe entre 2015 et 2030 [2].

L'Allemagne se positionne en tant que leader incontesté dans la production de biogaz, mais d'autres pays tels que l'Italie, la France, l'Espagne, et d'autres encore, sont également en mesure de jouer un rôle majeur dans cette transition énergétique. En ce qui concerne la France, son potentiel de production de biogaz est estimé à 4 Mtep d'ici 2030, un volume comparable à celui du Royaume-Uni ou de l'Italie, comme le montre la Figure 1.

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les avantages associés à la production de biogaz peuvent contribuer à répondre à plusieurs priorités en matière de durabilité dans les économies en développement. Les trois quarts de la croissance de la production mondiale de biogaz sont liés à la résolution de problèmes de durabilité [4]. La Chine, déjà à l'origine d'environ un tiers de la production mondiale, vise à développer la production de biogaz en milieu rural afin de réduire la pollution de l'air due à l'utilisation du charbon tout en améliorant la gestion des déchets. Elle prévoit d'atteindre une capacité de production d'environ 17 Mtep d'ici 2030 (contre environ 7 Mtep actuellement) [4]. En parallèle, l'Inde soutient financièrement les centrales de cogénération locales utilisant le biogaz et supervise la mise en place de plus de 5 millions d'unités de biogaz domestiques pour la cuisson propre. De plus, les perspectives pour le biogaz sont renforcées par les objectifs plus larges en matière de bioénergie dans des pays tels que l'Indonésie, la Malaisie et la Thaïlande. Ces pays cherchent à développer un marché du biogaz en exploitant les vastes quantités de résidus disponibles issus de certains secteurs industriels, notamment l'industrie de l'huile de palme. La majeure partie du biogaz produit est utilisée pour le chauffage et la production d'électricité, le reste étant destiné aux carburants de transport et aux processus industriels.

L'augmentation de l'utilisation du biogaz non seulement réduit les émissions de carbone fossile, mais également offre une solution pour l'élimination des déchets organiques. Toutefois, malgré ses avantages environnementaux évidents, la combustion du biogaz n'est pas dénuée de défis. Son intervalle d'inflammabilité relativement étroit en fait un combustible difficile à utiliser efficacement dans les équipements conventionnels au gaz naturel. Cela nécessite des innovations pour optimiser la combustion du biogaz et en maximiser les avantages environnementaux et énergétiques. Une de ces innovations prometteuses est l'utilisation du plasma, une technologie qui offre des perspectives d'amélioration significative des systèmes de combustion et de réduction des émissions polluantes. Le plasma, en tant qu'état de la matière caractérisé par la présence d'espèces neutres chimiques réactives et de particules chargées, telles que des ions et des électrons, présente des caractéristiques intéressantes lorsqu'il est appliqué à la combustion du biogaz [5]. Cette technologie offre une approche novatrice pour optimiser la combustion du biogaz, en exploitant ses capacités réactives pouvant conduire au contrôle de transferts thermiques et à la mise en œuvre d'une cinétique chimique réactionnelle favorables aux processus de combustion. Différentes technologies plasma ont été développées dans cette perspective, notamment les décharges à barrière diélectrique (DBD), les décharges nanosecondes répétitives pulsées (NRP), l'arc glissant et le plasma micro-ondes. Par exemple, Minesi et al. [6] ont étudié les effets des décharges NRP sur les gaz brûlés d'une flamme pauvre. De même, Li et al. [6] ont mis en lumière l'impact d'une torche plasma micro-ondes sur l'assistance à la combustion non-prémélangée du méthane. Stockman et al. [7] ont réalisé des mesures des propriétés de combustion dans une flamme assistée par micro-ondes. Zhang et al. [8] ont exploré les effets d'une décharge plasma DBD sur une flamme turbulente prémélangée

méthane-air, tandis que Sun et al. [9] ont démontré les effets essentiels des décharges à arc glissant, alimentées par une alimentation électrique à courant alternatif, sur les limites de stabilité des flammes turbulentes méthane/air perturbées de manière externe.

Cependant, malgré les nombreuses recherches menées dans ce domaine, il existe un manque notable d'exploration de la décharge plasma impulsionnelle microseconde en tant que stabilisateur de flamme dans les processus de combustion. Ce type de plasma présente plusieurs avantages substantiels par rapport à d'autres sources du plasma impulsionnel, notamment une intensité de courant plus élevée, une durée d'impulsion plus courte et moins d'interférences électromagnétiques [10]. Les sources d'énergie MPP offrent une durée d'impulsion plus courte et un courant de crête plus élevé que les sources d'énergie de milliseconde, ce qui les rend plus adaptées à certaines applications, telles que la combustion assistée par plasma. Comparées aux sources d'énergie utilisant des impulsions nanosecondes, les sources d'énergie du plasma impulsionnel microseconde sont capables de libérer toute leur énergie en peu de temps mais avec moins d'interférences électromagnétiques [10]. Ces avantages font du plasma impulsionnel microseconde un choix judicieux pour les applications de combustion.

Néanmoins, il y a actuellement peu de recherches portant sur l'utilisation de ce type de plasma pour la combustion, en particulier dans un contexte complexe avec une flamme non-prémélangée turbulente et swirlée. Notre étude représente donc une contribution novatrice à ce domaine. Ce travail de thèse est consacré à l'utilisation des plasmas impulsionnels microseconde en vue d'améliorer la combustion non-prémélangée du biogaz. Les travaux menés visent à explorer une gamme étendue de conditions de combustion et de paramètres du plasma afin d'approfondir la compréhension des mécanismes sous-jacents. L'objectif de cette thèse est de déterminer les effets du plasma sur les caractéristiques des flammes pour exploiter pleinement le potentiel du biogaz en tant que source d'énergie renouvelable. Cette recherche a pour finalité de contribuer à la transition vers une production énergétique plus propre, durable, et moins tributaire des ressources fossiles.

Ce travail de thèse est le fruit d'une collaboration de deux laboratoires orléanais, ICARE (Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement), spécialiste de combustion, et GREMI (Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés) spécialiste des plasmas, avec le soutien financier du Labex CAPRYSES (Cinétique chimique et Aérothermodynamique pour des Propulsions et des Systèmes Energétiques Propres et Sûrs). Ce travail vise à améliorer la compréhension du comportement des flammes non-prémélangées turbulentes swirlées biogaz/air assistées par plasma impulsionnel microseconde.

Ce manuscrit se compose de cinq chapitres, chacun explorant un aspect essentiel de la combustion non-prémélangée de biogaz assistée par plasma impulsionnel.

Dans le **premier chapitre**, intitulé "Généralités et état de l'art," nous établirons le contexte de notre recherche en fournissant une introduction globale au sujet. Nous examinerons les notions fondamentales de la combustion des flammes swirlées et non-prémélangées, en mettant l'accent sur la structure et le comportement de ces flammes. De plus, nous aborderons les concepts de base liés aux plasmas, en détaillant leur classification et leurs différents régimes.

Enfin, nous effectuerons une revue de la littérature sur la combustion assistée par plasma, en examinant les différentes approches existantes.

Le **deuxième chapitre**, "Dispositif expérimental et techniques de mesure," se concentrera sur la présentation du dispositif expérimental utilisé pour mener nos recherches. Nous décrirons la chambre de combustion, les types de brûleurs coaxiaux utilisés (injection radiale et axiale), ainsi que les configurations du plasma mises en œuvre. De plus, nous expliquerons les spécificités des générateurs de haute tension et des configurations d'électrodes pour la production du plasma. Enfin, nous passerons en revue les différentes techniques de mesure employées, telles que la chimiluminescence OH\*, l'analyse des gaz brûlés, la spectroscopie d'émission optique et la vélocimétrie par images de particules (PIV).

Le **troisième chapitre**, intitulé "Brûleur à injection radiale," se divise en deux parties distinctes, chacune traite une configuration spécifique du plasma. Dans la première section, nous explorons la configuration des électrodes "Arc glissant." Au sein de cette partie, nous examinons en détail la caractérisation de cette configuration, incluant son impact sur la stabilité des flammes de biogaz, les émissions polluantes, les spectres d'émission optique, ainsi que la dynamique de l'écoulement réactif. Il convient de noter que l'étude des champs dynamiques à l'aide de la PIV rapide était une étude complémentaire effectuée à la fin de la dernière année de thèse, visant à évaluer l'effet global du plasma sur l'écoulement. Les résultats de cette section ont été documentés dans un article accepté dans le journal "Engineering for Gas Turbines and Power". La deuxième partie du chapitre est consacrée à la configuration des électrodes "Tige-Anneau." De manière similaire à la première section, nous étudions les effets des paramètres du plasma spécifiques à cette configuration sur la stabilité des flammes de biogaz, les émissions polluantes, ainsi que les spectres d'émission optique. Les résultats de cette section ont été publiés dans un article dans le journal « Combustion Science and Technology » [11].

Le **quatrième chapitre**, "Brûleur à injection axiale", se penche sur une autre configuration de brûleur, en explorant en détail deux configurations du plasma distinctes dans le contexte de la combustion assistée par plasma du biogaz. Dans la première partie de ce chapitre, nous examinons la configuration des électrodes "Pointe-Tige-Pointe". Nous effectuons une caractérisation approfondie de cette configuration des électrodes, en mettant l'accent sur son impact sur la stabilité des flammes de biogaz, les émissions polluantes et les spectres d'émission optique. De plus, nous analysons les effets de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension sur les propriétés des flammes. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous nous concentrons sur la configuration des électrodes "Arc Glissant" qui s'accompagne d'une tige fixe longue intégrée dans le brûleur. Nous débutons par une caractérisation des flammes de biogaz sans plasma. Ensuite, nous explorons la combustion de biogaz assistée par plasma dans cette configuration, en analysant la caractérisation du plasma et l'effet de l'activation du plasma sur les caractéristiques de la combustion (stabilité, polluants, température des produits de combustion). De plus, nous utilisons la spectroscopie d'émission optique pour examiner les variations des spectres d'émission optique liées à l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible et à l'activation du plasma. Cette section a donné lieu à la publication de résultats dans le journal « Thermal Science and Engineering Progress » [12]. La dernière section de ce chapitre traite la configuration des électrodes "Arc glissant" avec une tige amovible courte.

Nous débutons par une caractérisation de la flamme sans plasma, en évaluant l'effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible sur la structure de la flamme et sa dynamique. Ensuite, nous étudions la combustion de biogaz assistée par plasma, en analysant l'effet du plasma sur le comportement des flammes (stabilité, polluants, spectres d'émission optique). Cette partie inclut également une évaluation de l'impact de l'ajout de CO<sub>2</sub> sur les spectres d'émission optique dans la flamme, ainsi que l'effet global du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement. Un article dans le journal « Fuel » [13] a été publié pour les résultats de cette section.

Une **conclusion générale**, regroupant les principales découvertes tirées de l'ensemble de ce manuscrit viendra clôturer ce manuscrit de thèse.

---

## Chapitre I. Généralités et état de l'art

---

I.1.	Introduction.....	29
I.2.	Notions générales sur la combustion des flammes swirlées et non-prémélangées	29
I.2.1.	Combustion : flammes non-prémélangées .....	30
I.2.1.1.	Structure d'une flamme non-prémélangée.....	30
I.2.1.2.	Comportement d'une flamme non-prémélangée.....	33
I.2.1.2.a.	Flamme accrochée au brûleur.....	33
I.2.1.2.b.	Flamme décrochée du brûleur .....	34
I.2.1.2.c.	Les mécanismes de décrochage des flammes non-prémélangées.....	36
I.2.2.	Combustion dans un écoulement swirlé .....	37
I.2.2.1.	Le nombre de swirl.....	37
I.2.2.2.	L'effet du swirl sur la stabilité des flammes .....	39
I.2.2.3.	L'effet du swirl sur la formation des émissions polluantes .....	41
I.2.3.	Les mécanismes de formation de composés polluants .....	42
I.2.3.1.	Formation des oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ) .....	42
I.2.3.1.a.	NO <sub>x</sub> précoce (prompt).....	42
I.2.3.1.b.	NO <sub>x</sub> thermique .....	43
I.2.3.2.	Formation de CO .....	43
I.2.3.3.	Formation des suies et des particules solides.....	44
I.2.4.	Influence de la présence de dioxyde de carbone dans le combustible.....	45
I.2.4.1.	Effet de la dilution.....	45
I.2.4.2.	Effet de la chimie.....	45
I.2.4.3.	Effet thermique.....	46
I.2.4.4.	Revue de la littérature sur l'effet de la présence de CO <sub>2</sub> sur la combustion. .....	46
I.3.	Notions générales sur les plasmas.....	47
I.3.1.	Généralités.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.2.	Classification des plasmas.....	50
I.3.2.1.	Plasma thermique .....	50
I.3.2.2.	Plasma tiède .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.2.3.	Plasma non thermique.....	51
I.3.3.	Les régimes du plasma.....	52
I.3.3.1.	La décharge de couronne .....	52
I.3.3.2.	La décharge luminescente .....	52
I.3.3.3.	La décharge d'arc .....	53

I.3.4.	Principe et caractéristiques du plasma impulsionnel microseconde.....	54
I.3.5.	Applications des plasmas .....	55
I.4.	Combustion assistée par plasma .....	56
I.4.1.	Principe de la combustion assistée par plasma.....	56
I.4.1.1.	Effet thermique.....	56
I.4.1.2.	Effet cinétique .....	57
I.4.1.3.	Effet de transport .....	59
I.4.2.	Revue de la littérature sur la combustion assistée par plasma .....	60
I.4.2.1.	Combustion assistée par plasma impulsionnel nanoseconde .....	60
I.4.2.2.	Combustion assistée par plasma à arc glissant continu .....	65
I.4.2.3.	Combustion assistée par plasma impulsionnel microseconde .....	68
I.5.	Conclusion .....	70

### I.1. Introduction

Ce premier chapitre constitue une introduction essentielle à la thèse qui porte sur les flammes non-prémélangées swirlées de biogaz assistées par plasma. Il vise à situer le contexte de recherche, à présenter la problématique étudiée et à établir les objectifs du travail de recherche. La combustion des flammes swirlées et non-prémélangées est un domaine d'étude complexe et d'une grande importance, tant sur le plan scientifique que sur le plan industriel. Comprendre les mécanismes de combustion dans ces types de flammes est crucial pour améliorer l'efficacité énergétique, réduire les émissions polluantes et promouvoir le développement de sources d'énergie plus durables. Dans cette thèse, nous nous intéressons spécifiquement à l'utilisation du plasma comme moyen d'assister la combustion des flammes swirlées de biogaz. Le plasma, état de la matière hautement énergétique, offre des possibilités prometteuses pour améliorer les performances de combustion en modifiant les caractéristiques des flammes. Cette approche novatrice présente un potentiel considérable pour l'optimisation des processus de combustion et la réduction de l'impact environnemental.

Ce chapitre se divise en plusieurs sections qui abordent différents aspects liés à la combustion des flammes swirlées et non-prémélangées, ainsi qu'à l'utilisation des plasmas dans ce contexte. Nous commencerons par présenter des notions générales sur la structure des flammes non-prémélangées turbulente, les mécanismes de décrochage et la formation des émissions polluantes. Ensuite, nous examinerons la phénoménologie et la dynamique des jets swirlés, ainsi que l'impact de la présence de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dans le mélange de gaz sur les flammes non-prémélangées.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée aux plasmas, où nous fournirons une introduction générale à cet état de la matière et nous présenterons leur classification en fonction de leurs caractéristiques thermiques. Nous aborderons également les différents régimes du plasma, en mettant l'accent sur les plasmas impulsionsnels microseconde, qui sont utilisés dans le cas de notre étude. Enfin, nous discuterons des applications des plasmas dans divers domaines, y compris la combustion assistée par plasma.

A la fin de ce chapitre, nous mettrons en évidence les principes fondamentaux de la combustion assistée par plasma, les types du plasma utilisés et nous effectuerons une revue de la littérature existante sur la combustion assistée par plasma impulsionsnel.

Ce chapitre d'introduction permet ainsi de poser les bases nécessaires pour la compréhension du sujet de recherche et des objectifs de la thèse, tout en situant notre travail dans le contexte plus large de l'état de l'art sur les flammes non-prémélangées et swirlées, la combustion assistée par plasma et leurs implications dans le domaine de l'énergie et de l'environnement.

### I.2. Notions générales sur la combustion des flammes swirlées et non-prémélangées

La combustion des flammes swirlées et non-prémélangées est un domaine de recherche essentiel pour de nombreux secteurs industriels, tels que l'énergie, l'aéronautique et l'environnement. La structure de ces flammes joue un rôle fondamental dans leur performance et leurs caractéristiques. Comprendre la structure d'une flamme non-prémélangée turbulente

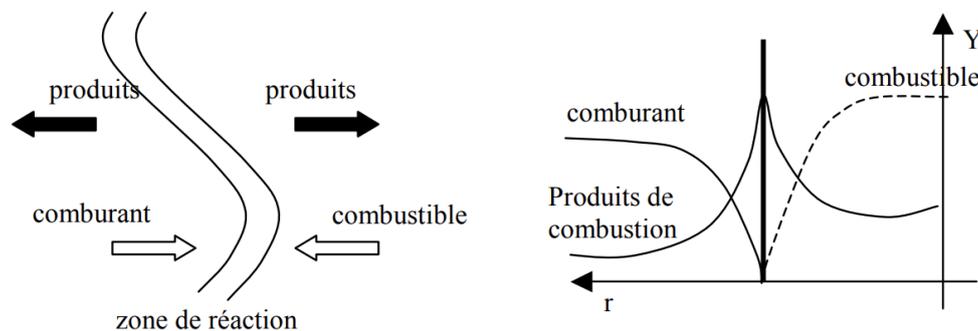
permet d'analyser les interactions complexes entre le mélange de carburant et d'oxydant, les phénomènes de combustion, ainsi que la formation d'émissions polluantes. De plus, l'étude des mécanismes de décrochage du brûleur fournit des informations précieuses sur les conditions qui conduisent à des instabilités et à des perturbations de la flamme. La présence de dioxyde de carbone dans les flammes de biogaz non-prémélangées présente également un intérêt particulier en raison de ses effets sur les caractéristiques de la combustion.

En examinant ces aspects de la structure des flammes swirlées et non-prémélangées, nous visons à approfondir notre compréhension des phénomènes qui se produisent à l'intérieur de ces systèmes. Cette connaissance est cruciale pour le développement de stratégies d'optimisation de la combustion, de réduction des émissions polluantes et d'amélioration de l'efficacité énergétique. Par conséquent, cette section nous permettra d'établir les bases nécessaires pour explorer ultérieurement l'utilisation du plasma comme une approche prometteuse pour assister la combustion et améliorer les performances des flammes swirlées et non-prémélangées.

### I.2.1. Combustion : flammes non-prémélangées

#### I.2.1.1. Structure d'une flamme non-prémélangée

La flamme non-prémélangée, également connue sous le nom de flamme de diffusion, se produit lorsque le comburant et le combustible sont introduits séparément, comme le montre la Figure I.1.



**Figure I.1.** Structure d'une flamme non-prémélangée [14].

Les flammes non-prémélangées ne peuvent exister que dans la région où le combustible et le comburant coexistent en proportions stœchiométriques. Contrairement aux flammes prémélangées, où le mélange du combustible et du comburant est réalisé avant l'inflammation, les flammes non-prémélangées présentent une séparation physique entre le combustible et le comburant lors de leur injection. Cette configuration de combustion, bien qu'elle soit plus facile à maîtriser d'un point de vue opérationnel, présente quelques inconvénients. Les flammes non-prémélangées ont tendance à former davantage de polluants, tels que les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et les particules de suie. Cela est principalement dû aux hautes températures atteintes dans la région frontale de la flamme, où le combustible et le comburant réagissent de manière intense.

La réaction au sein des flammes non-prémélangées se produit uniquement à l'interface où le combustible et le comburant se rencontrent. Les profils de fraction massique, représentés de

manière schématique dans la Figure I.1, illustrent cette séparation. Le taux de réaction des flammes non-prémélangées est principalement contrôlé par la diffusion, qui régule l'apport des réactifs dans la flamme. La structure des flammes non-prémélangées est souvent décrite en termes de rapport entre les temps de diffusion, les temps de réaction chimique et le temps de convection de l'écoulement. Contrairement aux flammes prémélangées, les flammes non-prémélangées ne possèdent pas la même propriété de propagation, car elles ne peuvent exister que dans la région où les réactifs coexistent dans des proportions stœchiométriques ou proche de la stœchiométrie.

L'étude initiale de la flamme non-prémélangée remonte à 1928 avec les travaux pionniers de Burke et Schumann [15]. Ils ont formulé plusieurs hypothèses, notamment :

- Le jet de combustible est caractérisé par une configuration laminaire, stationnaire et axisymétrique, émis à partir d'un injecteur circulaire.
- La réaction chimique associée est la suivante :



Où F représente le combustible, O le comburant ou l'oxydant et P les produits de combustion. Le rapport stœchiométrique s est défini comme le rapport entre le nombre de moles de comburant et le nombre de moles de combustible nécessaires pour une combustion complète.

- Les chaleurs spécifiques des espèces sont identiques.
- Les coefficients de diffusion sont égaux.
- Le flux de diffusion moléculaire obéit à la loi de Fick, c'est-à-dire qu'il est proportionnel au gradient de concentration.
- Le rayonnement est négligé.
- La flamme est verticale et orientée vers le haut.

En prenant en compte ces hypothèses, les équations de conservation peuvent être exprimées de la manière suivante :

Equation de conservation de la masse :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{I.1})$$

Equation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} v_i) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nabla(\tau) + \rho \vec{g} \quad (\text{I.2})$$

Avec  $\tau$ : désigne le tenseur des forces visqueuses.

Equation de conservation de l'énergie :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} C_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \Delta H^0 \dot{w}_F \quad (\text{I.3})$$

Équations des espèces :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_F) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_F) + \dot{w}_F \quad (\text{I.4})$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_O) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_O) + \dot{w}_O \quad (\text{I.5})$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_P) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_P) + \dot{w}_P \quad (I.6)$$

Avec  $\dot{w}_O = s \dot{w}_F$  et  $\dot{w}_P = -(1+s) \dot{w}_F$ , où F représente le combustible et O représente l'oxydant.

Le problème de Burke et Schumann est résolu avec le scalaire passif dit variable de Schvab-Zeldovich

$$Z_{SZ} = Y_F - \frac{Y_O}{s} \quad (I.7)$$

Le scalaire passif ZSZ peut être adimensionné, ce qui conduit à la définition d'une nouvelle grandeur appelée fraction de mélange Z :

$$Z = \frac{1}{\Phi + 1} \left[ \Phi \frac{Y_F}{Y_{F,c}} - \frac{Y_O}{Y_{O,\infty}} + 1 \right] \quad (I.8)$$

Où  $\Phi$  est la richesse de la réaction, défini par :

$$\Phi = \frac{s Y_{F,c}}{Y_{O,\infty}} \quad (I.9)$$

Si la chimie est infiniment rapide, la flamme se situe sur l'iso surface  $Z = Z_{st}$  telle que  $Y_F = Y_O = 0$  :

$$Z_{st} = \frac{1}{\Phi + 1} \quad (I.10)$$

L'équation du scalaire passif est :

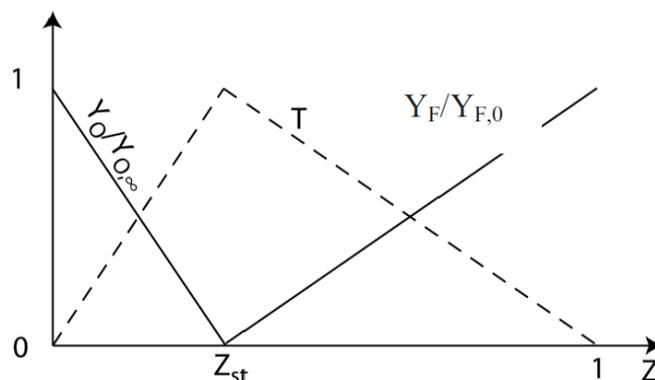
$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Z) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Z) \quad (I.11)$$

Les relations entre Z et les fractions massiques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau I.1.** Relations entre Z, Y<sub>F</sub>, Y<sub>O</sub>, Y<sub>P</sub>

	Z	Y <sub>F</sub>	Y <sub>O</sub>	Y <sub>P</sub>
Combustible	$Z > Z_{st}$	$Y_{F,c} \frac{Z(\Phi + 1) - 1}{\Phi}$	0	$(S+1) \frac{Y_{F,\infty}(1-Z)}{\Phi}$
Comburant	$Z < Z_{st}$	0	$Y_{O,\infty}(1-Z(\Phi+1))$	$(S+1)ZY_{F,\infty}$
Z varie de 0 dans l'écoulement de comburant à 1 dans celui du combustible				

L'analyse réalisée conduit au schéma de Burke-Schumann (Figure I.2), cette analyse qui dépend juste de la diffusion des espèces, permet d'obtenir qualitativement les caractéristiques globales des flammes non-prémélangées.



**Figure I.2.** Structure d'une flamme non-prémélangée selon l'approximation de Burke-Schumann.

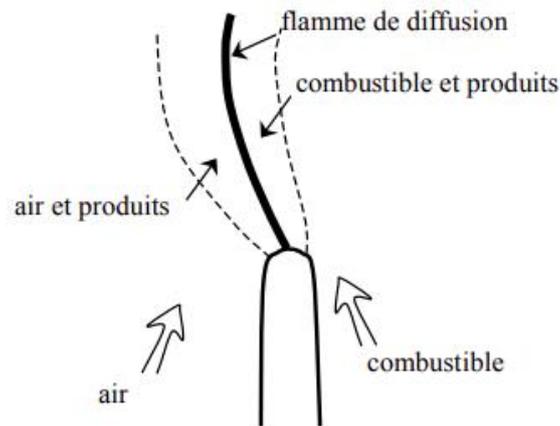
### **I.2.1.2. Comportement d'une flamme non-prémélangée**

La compréhension du comportement des flammes non-prémélangées est essentielle pour étudier leur interaction avec le brûleur et l'écoulement environnant. Cela englobe leur attachement au brûleur, leur stabilité et leur réaction face aux conditions de fonctionnement. L'analyse de ces caractéristiques permet d'approfondir notre connaissance des mécanismes de combustion et de formation des produits de combustion.

#### **I.2.1.2.a. Flamme accrochée au brûleur**

L'accrochage au brûleur des flammes de diffusion est un phénomène important dans le domaine de la combustion. Lorsque la flamme s'accroche au brûleur, elle reste en contact étroit avec la lèvre du brûleur, ce qui permet un échange de chaleur fort entre la flamme et le brûleur. Cela maintient la lèvre du brûleur à une température élevée, favorisant ainsi la stabilité de la flamme, comme illustré dans la Figure I.3. Une flamme de diffusion se stabilise au niveau des lèvres du brûleur lorsque celui-ci est conçu de manière à éviter la formation d'une zone de recirculation en aval des lèvres. Lorsque les jets de comburant et de combustible se rencontrent, une zone de mélange se forme, où les réactifs diffusent mutuellement. Au sein de cette zone de mélange, il existe une ligne caractéristique le long de laquelle la proportion de comburant et de combustible atteint la stoechiométrie nécessaire à la réaction. C'est sur cette ligne de stoechiométrie que la combustion se produit de manière optimale. La présence d'une proportion équilibrée de comburant et de combustible favorise des conditions optimales pour les réactions de combustion, permettant une utilisation maximale du combustible et minimisant la formation de produits indésirables.

Lorsque la flamme non-prémélangée s'établit au niveau des lèvres du brûleur, la zone de mélange est maintenue près du brûleur, assurant ainsi une combustion relativement stable. L'accrochage de la flamme est généralement observé lorsque les conditions de fonctionnement du brûleur sont appropriées. Les caractéristiques du brûleur, telles que sa géométrie, la configuration des injecteurs de combustible et d'oxydant, ainsi que les conditions d'alimentation en combustible et en oxydant, jouent un rôle crucial dans l'accrochage de la flamme.



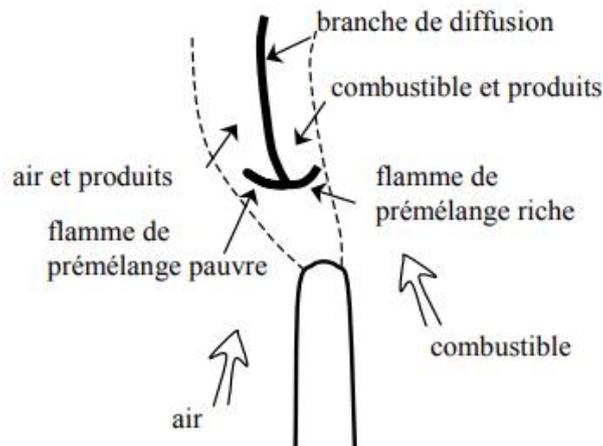
**Figure I.3.** Stabilisation d'une flamme non-prémélangée sur la lèvre d'un brûleur [14].

Cependant, il est important de noter que l'accrochage de la flamme peut être sensible à certains paramètres de fonctionnement. Par exemple, une augmentation excessive de la vitesse du jet de combustible peut perturber l'accrochage de la flamme, entraînant son décrochage ou son extinction. De même, des variations de la composition du combustible ou de l'oxydant peuvent également affecter l'accrochage de la flamme.

#### **I.2.1.2.b. Flamme décrochée du brûleur**

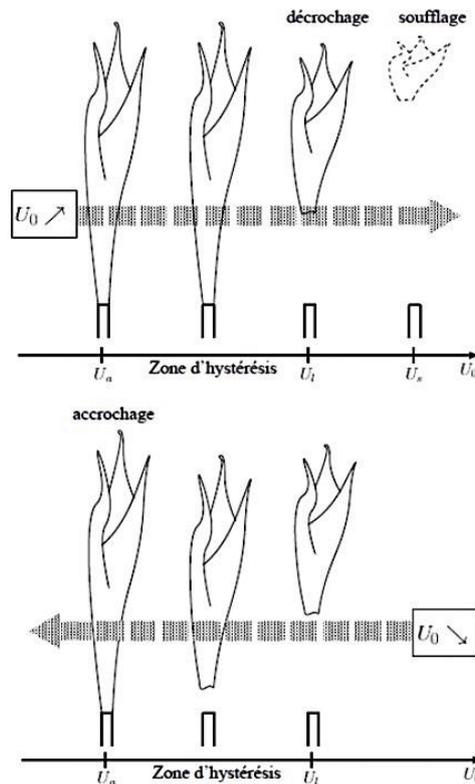
Une augmentation de la vitesse du jet de combustible peut entraîner le décrochage ou l'extinction en raison de la diminution de la température de la lèvre du brûleur. En effet, le comportement des flammes suspendues dépend principalement de la vitesse du jet. Par exemple, selon Kalghatgi [16], l'évolution de la hauteur moyenne de la flamme est quasi-linéaire en fonction de la vitesse de sortie des gaz, indépendamment de la nature du gaz.

Lorsque la vitesse du jet de combustible est augmentée à partir d'une flamme non-prémélangée accrochée au brûleur, elle atteint une valeur critique appelée "vitesse de décrochage". À ce stade, la flamme se détache de l'injecteur et se positionne en aval à une hauteur où les conditions locales d'écoulement et de richesse lui permettent de se stabiliser. La Figure I.4 illustre la structure générale d'une flamme suspendue et stabilisée. Cette configuration particulière de flamme suspendue, dans laquelle coexistent des régions de combustion prémélangée et de diffusion, est couramment désignée sous le nom de flamme partiellement prémélangée ou flamme triple, dans certaines conditions. La présence simultanée de la flamme de prémélange riche et de la flamme de prémélange pauvre dans une configuration de flamme triple, telle qu'illustrée dans la Figure I.4, est le résultat de variations locales de la richesse du mélange combustible. Si la vitesse devient excessivement élevée, la flamme s'éteint. En revanche, lorsque le débit est réduit jusqu'à une valeur appelée "vitesse de raccrochage", la hauteur de la flamme diminue jusqu'à ce qu'elle se raccroche à l'injecteur. Il est important de noter que la vitesse limite de raccrochage est inférieure à la vitesse de décrochage, ce qui met en évidence le phénomène d'hystérésis.



**Figure I.4.** Stabilisation d'une flamme non-prémélangée décrochée et apparition d'une flamme triple [14].

L'intervalle de vitesse entre  $U_a$  (vitesse d'accrochage) et  $U_l$  (vitesse de décrochage) est appelée zone d'hystérésis comme illustrée sur la Figure I.5.



**Figure I.5.** Schéma du phénomène d'hystérésis [17].

A des hauteurs de suspension importantes, la flamme devient très instable. La hauteur de suspension de la flamme, également appelée hauteur d'accrochage ou hauteur de stabilisation, qui représente la distance entre la sortie de l'injecteur et la base de la flamme, constitue donc un paramètre essentiel pour étudier la stabilité des flammes. En fonction de la vitesse du jet de combustible, différents états de flamme peuvent être observés :

- Lorsque  $U_{\text{fuel}} < U_a$ , la flamme reste accrochée au brûleur.
- Dans la plage de vitesses  $U_a < U_{\text{fuel}} < U_1$  (zone d'hystérésis), l'état de la flamme n'est pas déterminé à l'avance : si la flamme est initialement accrochée, elle reste accrochée dans cette zone, tandis que si elle est initialement liftée (décrochée), elle reste liftée. Cependant, ces deux états de flamme ne sont pas stables : en présence d'une perturbation externe, la flamme peut se raccrocher définitivement à l'injecteur ou se détacher.
- Lorsque  $U_{\text{fuel}} > U_a$ , la flamme reste liftée, constituant ainsi une zone de suspension pure. Cependant, dans ce cas, si la vitesse du combustible continue à augmenter jusqu'à atteindre la vitesse critique de soufflage, la flamme liftée s'éteint.

### I.2.1.2.c. Les mécanismes de décrochage des flammes non-prémélangées

Les travaux de Takahashi et Schmoll [18] ont examiné la transition de l'état accroché à l'état lifté en présence d'un coflow d'air. Ils ont principalement observé trois conditions de décrochage.

La première condition, illustrée par la Figure I.6 (A), se produit lorsque la flamme se détache d'un bloc formé par les lèvres du brûleur. Cela se produit à la base de la flamme en raison d'un déséquilibre entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation de la flamme. Selon les travaux de Wyzgolik et Baillot [19], l'augmentation de la vitesse du jet provoque un amincissement de la zone de gaz chauds à la base de la flamme, suivant un mécanisme similaire à une "couche limite" où les transferts thermiques sont modifiés par le changement de la couche de mélange cisailée. Le décrochage de la flamme se produit lorsque les échanges thermiques atteignent un seuil critique.

Une deuxième condition, illustrée par la Figure I.6 (B), est causé par un mécanisme d'extinction du front de flamme près du point de rupture. Comme démontré par Demare and Baillot [20], à cet endroit, les structures tourbillonnaires à petite échelle du jet sont capables d'étirer fortement le front de flamme jusqu'à son extinction locale [17]. Trois possibilités en découlent. Tout d'abord, la flamme se lifte immédiatement (B1). Deuxièmement, il peut arriver que la flamme se divise en deux parties, une partie restant accrochée au brûleur et l'autre se retrouvant en suspension. Lors de cette extinction locale, la partie inférieure peut s'éteindre quasi-instantanément, ce qui donne lieu à une flamme liftée classique (B2). Cela s'explique par le fait que la flamme accrochée subit des effets thermiques similaires à ceux décrits dans le premier processus de décrochage [19]. Enfin, la partie supérieure peut être soufflée, ce qui entraîne l'extinction de la partie accrochée (B3).

La dernière condition de décrochage est due à un manque d'approvisionnement de l'un des réactifs. Pour une flamme accrochée, il existe toujours une petite distance entre la base de la flamme et le brûleur. Dans le cas où la lèvre du brûleur est épaisse, une zone se forme où le combustible et l'oxydant recirculent. Étant bien mélangés dans cette zone, la base de la flamme s'y stabilise. L'augmentation de la vitesse de l'oxydant diminue localement la proportion des réactifs. Cela entraîne une diminution de la richesse du mélange dans cette zone, et finalement une réduction du taux de réaction chimique en raison d'un manque de combustible. Par conséquent, la base de la flamme devient instable, favorisant une extinction locale.

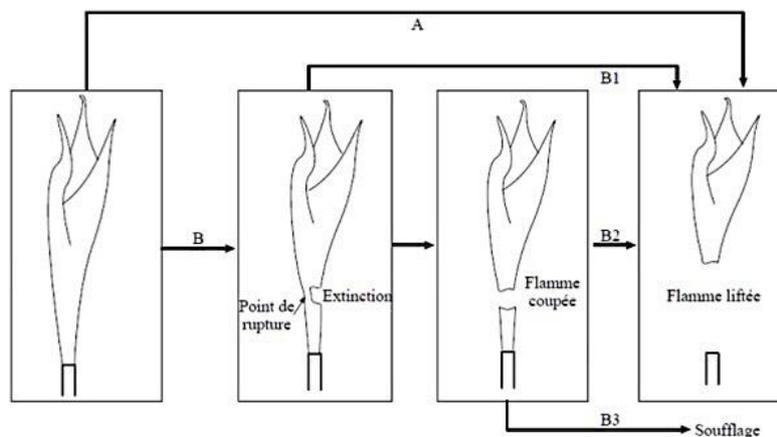


Figure I.6. Schéma des mécanismes de décrochage [20].

### I.2.2. Combustion dans un écoulement swirlé

Les flux tourbillonnaires sont couramment employés dans diverses applications industrielles afin de favoriser la stabilisation des flammes. Un dispositif, connu sous le nom de swirler ou "tourbillonneur", est utilisé pour induire une rotation dans l'injecteur, générant ainsi un écoulement tourbillonnaire. Cette méthode d'injection permet d'accroître la densité de puissance en créant des flammes extrêmement compactes, ce qui permet de réduire considérablement la taille de la zone de combustion.

#### I.2.2.1. Le nombre de swirl

Lorsqu'il s'agit de caractériser un écoulement, deux grandeurs sans dimension sont couramment utilisées. La première, largement connue en mécanique des fluides, est le nombre de Reynolds ( $Re$ ), qui permet de décrire le régime de l'écoulement (laminaire, transitoire, turbulent). La seconde grandeur est le nombre de Swirl ( $Sn$ ), qui quantifie l'intensité de la rotation présente dans l'écoulement. Plus la valeur de ce nombre est élevée, plus le tourbillonnement est prononcé. Il existe différentes méthodes pour calculer le nombre de Swirl, chacune ayant ses avantages et ses limites.

Chigier et Beér [21] furent les premiers à introduire un tel paramètre : le nombre de swirl  $Sn$ . Ce nombre est défini en fonction des flux axial ( $G_x$ ) et angulaire ( $G_\theta$ ) de quantité de mouvement, ainsi que du rayon ( $R$ ), est la suivante :

$$Sn = \frac{G_\theta}{(R * G_x)} \quad (I.12)$$

Les flux  $G_\theta$  et  $G_x$  sont :

$$G_\theta = \int_0^R [(\rho V_z^2 + (p - p_\infty))] r dr \quad (I.13)$$

Et

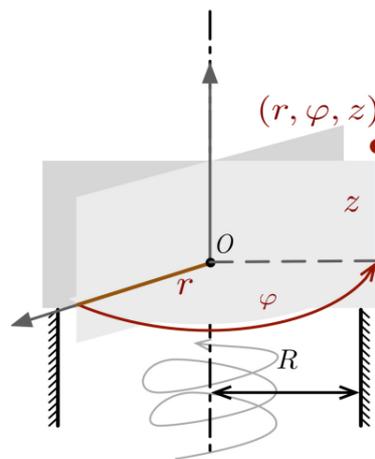
$$G_x = \int_0^R \rho V_z V_\theta r^2 dr \quad (I.14)$$

$(V_r, V_z, V_\theta, p)$  : les composantes du vecteur vitesse en coordonnées cylindriques  $(r, z, \theta)$  et la pression statique.

$p_\infty$  : la pression statique constante dans l'environnement ambiant au repos, loin du jet.

Et  $\rho$  la masse volumique de l'air. Tant que les variations de pression dans le brûleur sont faibles, on peut la considérer invariable.

La Figure I.7 présente une illustration du système de coordonnées cylindriques utilisé pour ce dernier calcul. Cette formule de  $Sn$  présente l'avantage d'être précise et extrêmement polyvalente, car elle peut être adaptée à n'importe quelle géométrie de swirler. Cependant, elle nécessite des mesures précises des vitesses axiales et tangentielles. Dans notre système, le nombre de swirl est abordé plus en détail dans le chapitre II.



**Figure I.7.** Un système de coordonnées cylindriques pour illustrer le calcul du nombre de swirl.

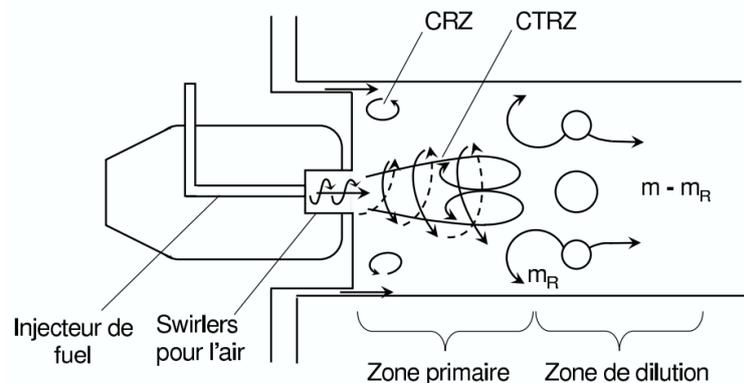
Cependant, dans le contexte des applications industrielles, il peut souvent être difficile de déterminer avec précision le nombre de Swirl. En fonction de la variation de ce nombre, on peut observer différentes topologies d'écoulement :

- Lorsque le nombre de Swirl est faible ( $Sn < 0.6$ ), il n'y a pas de recirculation le long de l'axe de l'écoulement, ce qui correspond à un jet classique. Dans ce cas, l'ouverture du jet augmente progressivement à mesure que le Swirl augmente.
- Lorsque le Swirl dépasse 0.6, une zone de recirculation se forme le long de l'axe de l'écoulement, et une structure hélicoïdale apparaît.
- Lorsque le Swirl continue d'augmenter ( $S \gg 0.6$ ), les gradients de pression deviennent suffisamment importants pour entraîner l'apparition d'un état éclaté caractérisé par une vaste zone de recirculation centrale toroïdale, connue sous le nom de CTRZ (pour "central toroidal recirculation zone").

### I.2.2.2. L'effet du swirl sur la stabilité des flammes

Les écoulements tourbillonnaires sont largement utilisés dans les chambres de combustion des turbines à gaz comme moyen efficace pour améliorer la stabilisation des flammes, ainsi que le mélange air/combustible (dans les cas de non-prémélange).

La plupart des études réactives swirlées utilisent des valeurs élevées du swirl, généralement  $Sn > 0.6$ . Ainsi, la formation d'une zone de recirculation est assurée, ce qui amplifie la dynamique du mélange et participe à la stabilisation de la flamme. Pour illustrer le processus de stabilisation de la flamme, la Figure I.8 présente un schéma simple d'un moteur de turbine à gaz typique. Dans cette configuration, le combustible est injecté dans la chambre entre deux écoulements d'air swirlés. La zone de réaction se situe dans la zone primaire. Des jets de dilution ou de mélange, placés en aval, ont pour but d'arrêter la réaction et de diluer les produits de combustion.



**Figure I.8.** Processus de stabilisation de la flamme [22].

La zone de recirculation centrale joue un rôle essentiel dans la stabilisation de la flamme. Elle est créée et maintenue par l'air provenant du swirler situé autour de l'injecteur de carburant. En plus de favoriser le mélange, cette zone permet d'amener les gaz brûlés vers les gaz frais, assurant ainsi l'auto-allumage sur une large plage de pressions, de vitesses et de richesses. Un autre élément important est la zone de mélange juste derrière la zone primaire. Le débit total d'air injecté est noté  $m$ . Les jets de mélange frappent au centre de la chambre, une partie de l'air ( $m_R$ ) est déviée vers la zone de recirculation centrale en amont, tandis que le reste s'écoule vers le bas de la chambre. L'augmentation de la vitesse à la sortie des jets a deux effets majeurs sur la flamme :

- Tout d'abord, elle augmente le rapport  $m_R/m$ , ce qui réduit l'efficacité de combustion dans la zone primaire.
- Ensuite, cette augmentation intensifie la turbulence des jets, ce qui à son tour accélère la consommation de carburant et améliore l'efficacité de combustion.

Finalement, cet effet se traduit par une augmentation à la fois de l'efficacité de combustion et de la vitesse de propagation de la flamme.

Plusieurs études ont exploré l'effet du swirl sur la stabilité des flammes dans diverses configurations de brûleurs. Par exemple, L'étude menée par Zhu et al. [23] se concentre sur l'effet du swirl sur la stabilité de la flamme dans les mélanges de formiate de méthyle (FA) et de méthane. Les résultats ont montré que l'utilisation d'un brûleur swirl permettait de stabiliser les flammes pré-mélangées dans un large éventail de fractions de combustible FA, de nombres de Reynolds et de nombres swirl. L'augmentation du nombre swirl a un effet non-monotone sur les limites de stabilité, car elle modifie de manière non-monotone la vitesse axiale sur l'axe central du brûleur.

Une autre étude réalisée par Jarpala et al. [24] a examiné l'effet du swirl sur la stabilisation d'une flamme de méthane utilisant un brûleur IISRT-GS1. Ils ont observé que l'utilisation de nombres de swirl différents avait un impact significatif sur la stabilité de la flamme. Le nombre de swirl plus élevé a favorisé une meilleure stabilisation de la flamme, notamment dans des conditions de fonctionnement ultra-pauvres. Cela est dû à l'augmentation de l'écoulement inverse axial, qui ramène les gaz brûlés vers la sortie de l'injecteur et favorise un meilleur mélange du combustible et de l'air. Ainsi, le swirl a été identifié comme un facteur clé dans la stabilisation des flammes, offrant des conditions propices à une combustion stable, même dans des environnements de fonctionnement très pauvres en combustible.

Dans une autre étude menée par Zhang et al. [25], l'effet de l'intensité du swirl sur les caractéristiques de combustion a été étudié dans le contexte de la combustion d'ammoniac/méthane stabilisée par un swirl. Ils ont réalisé des simulations de grande échelle à l'aide de OpenFOAM et ont validé les résultats numériques par des expériences. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence significative de l'intensité du swirl sur le champ d'écoulement et la structure de la flamme. Ils ont observé que la stabilité de la flamme diminue à mesure que l'intensité du swirl augmente. Une intensité de swirl élevée entraîne une extinction de la flamme à sa base, tandis qu'une intensité de swirl faible ne permet pas la génération de la zone de recirculation centrale nécessaire pour stabiliser la flamme. L'effet de l'intensité du swirl sur l'amélioration de la combustion de l'ammoniac présente une relation non linéaire.

Degenève et al. [26] ont récemment réalisé une étude expérimentale sur les effets de swirl sur la structure et stabilisation des flammes de méthane non-prémélangées enrichies en oxygène au-dessus d'un injecteur coaxial, où les deux flux sont éventuellement swirlés. Les résultats de cette étude montrent que l'augmentation de swirl externe ou la réduction du flux axial interne font descendre la position de la zone de recirculation et favorisent l'accrochage de la flamme au rebord de l'injecteur central. À l'inverse, l'augmentation de swirl interne ou du flux axial interne décroche la flamme du rebord central.

De plus, Boushaki et al. [27] ont mené une étude sur le contrôle des flammes de gaz naturel enrichies en oxygène au moyen d'actionneurs à jet tangentiel (afin de générer un flux swirlé) dans un brûleur composé de trois tubes circulaires, un central pour le gaz naturel et deux latéraux pour l'oxygène pur. Les résultats de leur recherche ont révélé que ce système de contrôle permettait de réduire les hauteurs d'accrochage des flammes, tout en améliorant la stabilité de la combustion. L'utilisation d'actionneurs à jet a induit une large dispersion des gaz

injectés ainsi qu'une augmentation de l'intensité de la turbulence, favorisant ainsi un meilleur mélange entre les réactifs et le fluide environnant.

L'étude menée par Chakchak et al. [28] se concentre sur les caractéristiques de combustion des flammes turbulentes tourbillonnantes  $\text{CH}_4$ -air/ $\text{O}_2$  dans un brûleur coaxial avec une injection radiale de combustible. Ils ont découvert que l'augmentation du nombre de swirl favorise la stabilité de la flamme en réduisant la hauteur d'accrochage de la flamme. L'écoulement rotatif présenté dans cette étude, améliore l'entraînement et accroît les limites de stabilité de la flamme.

Bellomo et al. [29] ont également étudié l'injection en swirl dans des moteurs fusés hybrides utilisant de l'oxyde nitreux et de la paraffine. Ils ont découvert que l'amplitude des oscillations de pression de combustion pouvait être significativement réduite grâce à l'injection en swirl par rapport à l'injection axiale.

Ces études mentionnées précédemment ne sont que quelques exemples parmi de nombreuses recherches menées sur l'effet du swirl sur les flammes. Il convient de noter que de nombreuses autres études ont été rapportées dans la littérature scientifique, abordant divers aspects de la combustion swirlée et explorant les effets du swirl sur la stabilité, le mélange et d'autres caractéristiques des flammes.

### **I.2.2.3. L'effet du swirl sur la formation des émissions polluantes**

L'effet du swirl joue un rôle crucial dans la formation des émissions polluantes lors de la combustion. Le mouvement rotatif créé par le swirl favorise le mélange entre le combustible et le comburant, ce qui conduit à une meilleure combustion. En favorisant l'homogénéité du mélange air-combustible, le swirl réduit la formation de zones pauvres en oxygène, qui sont propices à la production de polluants tels que le monoxyde de carbone (CO) et les particules fines. Grâce à l'effet du swirl, la combustion est plus efficace et la température à l'intérieur de la chambre de combustion est mieux contrôlée. Cela permet de réduire les températures de flamme élevées qui favorisent la formation de  $\text{NO}_x$ . La mise en rotation des réactifs engendre un flux swirlé en forme d'hélice, ce qui induit un gradient de pression négatif vers l'axe. Cela crée une zone de recirculation du mélange, qui contribue à la stabilisation de la flamme. De plus, à mesure que l'intensité de la rotation augmente, le temps de séjour dans les régions chaudes de la chambre de combustion diminue en raison de l'accélération de l'écoulement recirculé. Cette dynamique permet également de limiter la formation de  $\text{NO}_x$  [30]. Une étude réalisée par Lim et al. [31] a démontré que l'augmentation de l'intensité du swirl provoque une combustion plus rapide grâce à l'amélioration du mélange air-fuel. Cela se traduit par une diminution de la fraction diesel et permet une utilisation accrue de la recirculation des gaz brûlés (EGR) pour réduire les émissions d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et de fumées produites par le moteur, sans compromettre l'efficacité thermique.

Nazim et al. [32] ont rapporté l'effet du nombre de swirl sur les émissions de  $\text{NO}_x$ . Ils ont constaté qu'une augmentation du nombre de swirl tend à réduire la formation de  $\text{NO}_x$  dans une flamme enrichie en oxygène, en particulier pour un taux d'oxygène supérieur à 27%. Les auteurs expliquent cette évolution par la diminution de la température de la flamme induite par le swirl grâce au mécanisme de Zeldovich.

Chakchak et al. [28] ont étudié l'effet des nombres de swirl de 0.5 et 1.4 sur les émissions de NO<sub>x</sub> d'une flamme de méthane-air non-prémélangée avec un enrichissement en oxygène de 21% à 50%. Ils ont constaté que l'augmentation du nombre de swirl entraîne une diminution des émissions de NO<sub>x</sub> dans les gaz brûlés. Cela est dû à l'augmentation de la dilution par la recirculation des produits de combustion, ce qui réduit la température de la flamme et, par conséquent, le taux de formation de NO<sub>x</sub> thermiques.

### I.2.3. Les mécanismes de formation de composés polluants

La compréhension des mécanismes de formation de composés polluants lors de la combustion des flammes swirlées et non-prémélangées est d'une importance primordiale pour le développement de solutions visant à réduire les émissions nocives. Dans cette section, nous examinons spécifiquement les mécanismes de formation des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et du monoxyde de carbone (CO). Ces polluants sont parmi les plus préoccupants en termes d'impact sur la qualité de l'air et sur la santé humaine. Nous étudions en détail les processus impliqués dans la formation du NO<sub>x</sub> et du CO, en mettant en évidence les différents types d'oxydes d'azote formés. En comprenant ces mécanismes, nous pourrions mieux appréhender les possibilités de réduction des émissions et d'amélioration de l'efficacité de combustion dans les systèmes énergétiques.

#### I.2.3.1. Formation des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)

Il existe quatre principales voies de formation des NO<sub>x</sub> : les NO<sub>x</sub> liés au combustible, les NO<sub>x</sub> précoces, la voie de l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) et la voie thermique. Chacune de ces voies joue un rôle spécifique dans la production et la réduction des émissions de NO<sub>x</sub>. La voie de N<sub>2</sub>O est généralement plus pertinente dans les systèmes de combustion à haute pression [33] et n'est pas d'une grande importance dans un environnement opératoire atmosphérique, comme celui considéré dans cette thèse. Étant donné que le principal combustible étudié dans cette expérience est le biogaz (CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>), les NO<sub>x</sub> résultant de la teneur en azote inhérente au combustible sont également sans importance pour les objectifs de cette étude.

##### I.2.3.1.a. NO<sub>x</sub> précoce (prompt)

Les NO<sub>x</sub> prompts, également connus sous le nom de NO<sub>x</sub> de Fenimore, se forment à la frontière de la flamme à des basses températures (environ 1000 K) lorsqu'ils réagissent avec les radicaux CH issus des combustibles à base d'hydrocarbures [33]. Le processus de formation des NO<sub>x</sub> prompts implique plusieurs étapes chimiques.

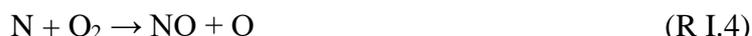
Tout d'abord, la réaction entre les radicaux CH (issus de la décomposition des hydrocarbures) et le diazote (N<sub>2</sub>) conduit à la formation de cyanure d'hydrogène (HCN) et de radicaux N :



Ensuite, le cyanure d'hydrogène réagit avec des radicaux O pour former des espèces intermédiaires, qui finalement conduisent à la formation de NO :



Une autre voie de formation des NO<sub>x</sub> prompts est la réaction entre l'azote (N) et le dioxygène (O<sub>2</sub>), qui conduit directement à la formation de NO :



Ces réactions chimiques se produisent dans la région de la flamme où la concentration de radicaux CH et N est élevée, favorisant ainsi la formation des NO<sub>x</sub> prompts.

### I.2.3.1.b. NO<sub>x</sub> thermique

Les NO<sub>x</sub> thermiques sont produits lors de réactions endothermiques à des températures élevées d'environ 1850 K [34], entraînant la formation de NO. La production de NO est principalement régie par la réaction étendue de Zeldovich, initialement proposée par Zeldovich (1946) et développée par Fenimore et Jones (1957) [35].

Les étapes clés de cette réaction sont les suivantes :



La présence d'azote atmosphérique dans des conditions sous-stœchiométriques ( $\Phi < 1$ ) limite la formation de NO, car à ces conditions l'azote de l'air entre en compétition avec le combustible pour l'oxygène disponible. Cette compétition signifie que l'oxygène disponible est d'abord utilisé par le combustible pour brûler, laissant peu d'oxygène pour réagir avec l'azote [34].

### I.2.3.2. Formation de CO

La formation du monoxyde de carbone (CO) dans les systèmes de combustion peut se produire par différentes voies. La première voie est la combustion incomplète, où le manque d'oxygène disponible entraîne une combustion partielle du combustible, produisant du CO plutôt que du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Cela se produit souvent dans les conditions de mélange riche, où la quantité d'oxygène est insuffisante pour une combustion complète. Dans le cas des flammes non-prémélangées, la formation du CO est naturelle du fait du manque d'homogénéité du mélange. Dans le cas d'une combustion incomplète, le monoxyde de carbone se forme selon l'équilibre de Boudouard [36] :

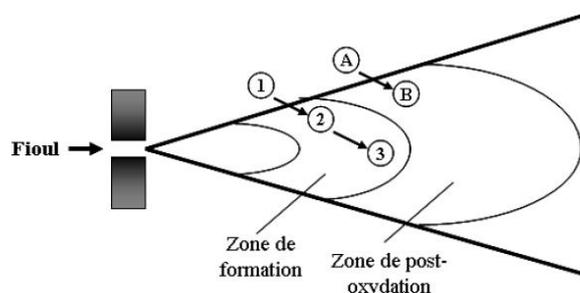


Une autre voie de formation du CO est la dissociation thermique des hydrocarbures. À des températures élevées, les liaisons chimiques dans les hydrocarbures peuvent se rompre, produisant des radicaux et des atomes instables. Certains de ces radicaux et atomes peuvent réagir pour former du CO plutôt que de se combiner avec de l'oxygène pour former du CO<sub>2</sub>. De plus, la formation de CO peut être favorisée par des réactions concurrentes telles que la réaction du radical CH avec de l'oxygène pour former du CO plutôt que du CO<sub>2</sub>. Cette réaction se produit principalement dans les régions riches en combustible, où la concentration de

radicaux CH est élevée. Enfin, des conditions de combustion non idéales, telles que des problèmes de mélange du combustible et de l'air, peuvent également conduire à une formation accrue de CO. Des défauts dans le système d'injection ou une distribution inégale du combustible peuvent entraîner des zones de combustion incomplète, favorisant ainsi la production de CO.

### I.2.3.3. Formation des suies et des particules solides

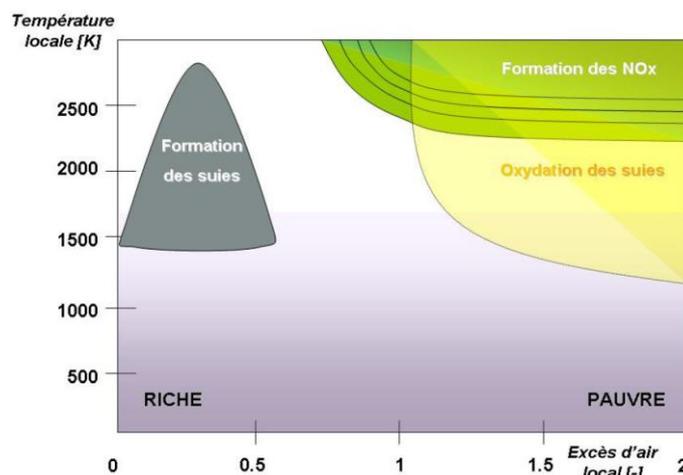
La combustion par diffusion utilisée dans des systèmes à combustible liquide comme les moteurs automobiles est intrinsèquement associée à la formation de suies. La Figure I.9 met en évidence les mécanismes impliqués dans ce processus. Près de l'injecteur, un volume d'air (1) entre en contact avec une grande quantité de combustible dans le jet. Une fois l'allumage effectué, le combustible consomme tout l'oxygène disponible dans ce volume (1), ce qui génère des gaz brûlés chauds, représentés par (2). En se déplaçant vers le cœur du jet, ce volume (2) chauffe le combustible en l'absence d'oxygène, ce qui conduit à la formation de suies par pyrolyse des hydrocarbures en (3).



**Figure I.9.** Formation et destruction de suies dans la flamme non-prémélangée.

Plus en aval de l'injecteur, un volume d'air (A) se mélange avec le jet sans entrer en contact avec le carburant à sa périphérie, car celui-ci a déjà été brûlé en amont. Si la température est suffisamment élevée, l'oxygène présent dans cette région permet de brûler les particules de suie en (B) par un processus appelé post-oxydation. Cependant, lorsque la température devient trop basse, la post-oxydation est ralentie, ce qui entraîne un blocage thermique. Les quantités de suie restent alors constantes, et seule une dilution par l'air mélangé à la flamme se produit. Il est donc évident que les quantités de suie émises dépendent de la compétition entre la pyrolyse (formation des suies) et la post-oxydation, et sont fortement influencées par le moment où se produit le blocage thermique. Les suies émises ne représentent qu'une petite fraction de celles qui ont été initialement formées au début de la combustion.

Comme mentionné précédemment, l'augmentation de la température dans les zones où il y a un excès d'air favorise la formation de NO<sub>x</sub>. Cependant, cela entraîne un compromis entre les émissions de NO<sub>x</sub> et de particules de suie, comme illustré dans le diagramme de Pischinger [37] (Figure I.10). Ce diagramme décrit les zones de formation des NO<sub>x</sub> et des suies en termes de température et de richesse locale. Il est important de noter que ce diagramme est issu de la modélisation et qu'il a été établi pour différents combustibles.



**Figure I.10.** Diagramme  $\Phi$ -T de Pischinger [37].

### I.2.4. Influence de la présence de dioxyde de carbone dans le combustible

Dans cette section, nous examinerons l'influence de l'ajout de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dans le combustible sur la combustion et les émissions polluantes. L'utilisation de mélanges de combustible contenant du méthane ( $\text{CH}_4$ ) et du  $\text{CO}_2$ , tels que les systèmes de biogaz, présente des caractéristiques spécifiques qui peuvent affecter les performances de combustion et la formation des polluants. Nous étudierons les effets de la dilution, de la thermique et de la chimie résultant de la présence de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de gaz brûlés. Comprendre ces aspects est essentiel pour évaluer comment l'ajout de  $\text{CO}_2$  peut potentiellement modifier la dynamique de la flamme et les émissions de polluants, ce qui a des implications importantes pour la combustion propre et la réduction des émissions nocives.

#### I.2.4.1. Effet de la dilution

L'ajout d'un diluant dans l'un des réactants, que ce soit le combustible ou le comburant, entraîne un phénomène bien connu appelé dilution pure. Ce processus se caractérise par une diminution de la concentration molaire des réactifs, ce qui a plusieurs conséquences significatives sur la combustion. Tout d'abord, la dilution entraîne une diminution du taux de réaction [38], [39]. De plus, la vitesse de propagation de la flamme est également réduite en présence de dilution pure. Les recherches ont montré que l'ajout d'un diluant entraîne une diminution de la vitesse à laquelle le front de flamme se propage à travers le mélange réactif [11], [40]. Cette diminution de la vitesse de propagation peut affaiblir la stabilité de la flamme. L'un des effets les plus importants de la dilution est l'apparition précoce du décrochage de la flamme stabilisée au brûleur. Lorsque le diluant est ajouté, la flamme a tendance à se détacher rapidement du brûleur [41], [42].

#### I.2.4.2. Effet de la chimie

Le  $\text{CO}_2$  est couramment considéré comme un gaz inerte dans les processus de combustion. Cependant, des études approfondies, telles que celles menées par Park et al. [43], Guo et Smallwood [44] et Matynia et al. [45], ont révélé que la présence de  $\text{CO}_2$  peut entraîner une modification passive du schéma cinétique des réactions chimiques. D'un point de vue

fondamental, l'ajout de  $\text{CO}_2$  peut influencer les réactions chimiques en jeu. Par exemple, lorsque du  $\text{CO}_2$  est introduit dans l'air, la réaction  $\text{CO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$  peut être favorisée, ce qui peut avoir des implications sur la cinétique de combustion. De même, lorsque le  $\text{CO}_2$  est introduit dans le combustible, la réaction  $\text{CO}_2 + \text{CH} \rightarrow \text{HCO} + \text{CO}$  peut se produire, entraînant des changements dans les espèces réactives et leurs réactions associées. Il est important de noter que l'impact de ces réactions chimiques induites par le  $\text{CO}_2$  est généralement moins significatif que celui de la dilution pure et de la thermique. Cependant, leur contribution peut varier en fonction des conditions spécifiques de combustion, de la composition du mélange réactif et des espèces présentes.

Il convient de souligner que cette question suscite encore des interrogations et nécessite des investigations plus approfondies.

#### **I.2.4.3. Effet thermique**

Lorsque le  $\text{CO}_2$  est ajouté dans le système de combustion, il affecte également les caractéristiques thermiques de la flamme. L'ajout d'un diluant ayant une capacité thermique différente de celle de l'oxydant ou du combustible entraîne un changement de la capacité thermique globale du mélange gazeux. La capacité thermique d'une substance mesure sa capacité à stocker de l'énergie thermique. Lorsque du  $\text{CO}_2$  est introduit dans le mélange réactif, il modifie la capacité thermique totale du système. En conséquence, cela entraîne des modifications de la température de la flamme.

#### **I.2.4.4. Revue de la littérature sur l'effet de la présence de $\text{CO}_2$ sur la combustion**

La teneur en  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz dépend de la source de production et de la technologie utilisée pour le produire, ce qui entraîne des variations dans les caractéristiques de combustion de ces combustibles. L'utilisation de biogaz dans les processus de combustion peut poser des problèmes et provoquer des instabilités de combustion en raison de sa faible valeur calorifique. Ainsi, des études approfondies sur l'effet de l'ajout de  $\text{CO}_2$  au combustible et une compréhension précise du mélange  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  constituent une avancée significative.

Cependant, il est intéressant de noter que la plupart des études sur la dilution du  $\text{CO}_2$  se sont principalement concentrées sur les effets de l'ajout de  $\text{CO}_2$  du côté de l'oxydant pour les flammes non-prémélangées. Paradoxalement, peu d'attention a été accordée à son effet du côté du combustible. Par exemple, les travaux de Samanta et al. [46] ainsi que ceux de Briones et al. [47] ont examiné numériquement l'effet de la dilution du  $\text{CO}_2$  sur la stabilisation de la flamme et la distance d'accrochage des flammes non-prémélangées. Leurs résultats ont démontré que l'augmentation de la fraction massique de  $\text{CO}_2$  dans le combustible entraînait des flammes plus longues, plus faibles et se déplaçant vers l'aval le long de la ligne de fraction stœchiométrique.

Marin et Baillet [28] ont mis en évidence une distinction cruciale concernant l'efficacité de la dilution du  $\text{CO}_2$  dans le flux annulaire (coflow) par rapport au flux de combustible, en abordant les effets aérodynamiques et de dilution. Dans le cas de la dilution du  $\text{CO}_2$  dans le coflow, l'augmentation de la vitesse des gaz résultant de l'ajout de  $\text{CO}_2$  et de son mélange n'a qu'un impact négligeable sur la stabilité et la structure de la flamme, contrairement à la dilution du flux de combustible par le  $\text{CO}_2$ . De plus, ils ont noté que l'augmentation de la concentration de

$\text{CO}_2$  dans le coflow entraînait une élévation de la hauteur d'accrochage, tandis que la position radiale demeurait inchangée. Une conclusion similaire a été faite par Min et al. [23], qui ont observé que le  $\text{CO}_2$  réduisait la vitesse de la flamme laminaire en raison de son effet de dilution. Cette réduction perturbe l'équilibre entre la vitesse locale de la flamme et la vitesse du flux local, nécessaire à la stabilité locale de la flamme, obligeant la flamme à se déplacer plus en aval pour maintenir sa stabilité.

D'autres études, telles que celles menées par Zaidaoui et al. [48] et Erete et al. [42], ont examiné les effets de la dilution du  $\text{CO}_2$  sur les flammes turbulentes non-prémélangées de  $\text{CH}_4$ -air. Leurs résultats ont révélé une augmentation de la hauteur de détachement de la flamme, une réduction de la longueur totale de la flamme, une baisse de la température de la flamme et une diminution de la concentration de  $\text{NO}_x$  avec différents niveaux de dilution du  $\text{CO}_2$  dans le combustible.

De plus, Chen et al. [49] ont étudié les effets de l'ajout de  $\text{CO}_2$  à la fois du côté du combustible et du côté de l'oxydant sur les caractéristiques d'une flamme non-prémélangée unidimensionnelle et laminaire. Leurs résultats ont montré que les effets chimiques de l'ajout de  $\text{CO}_2$  du côté du combustible étaient minimes, mais devenaient significatifs lorsqu'il était introduit du côté de l'oxydant.

Des études expérimentales menées par Li et al. [50] et Mortazavi et al. [51] ont examiné les caractéristiques de combustion du mélange non prémélangé  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ . Leurs résultats ont confirmé que l'augmentation de la quantité de  $\text{CO}_2$  réduisait la température de la flamme et le niveau de suie, tout en augmentant la hauteur de la flamme.

Enfin, les travaux de Vandell et al. [41] se sont penchés sur l'influence de la dilution du dioxyde de carbone sur la structure de la flamme des flammes tourbillonnaires de méthane et d'air enrichi en oxygène. Ils ont conclu que l'augmentation de la quantité de  $\text{CO}_2$  du côté de l'oxydant entraînait une diminution de la vitesse de flamme, ce qui induisait une augmentation de la hauteur d'accrochage de la flamme.

Ces différentes études mettent en évidence l'importance d'explorer les effets de l'ajout du  $\text{CO}_2$  à la fois du côté du combustible et du côté de l'oxydant, afin de mieux comprendre les interactions complexes entre le  $\text{CO}_2$  et le  $\text{CH}_4$  dans les processus de combustion.

### **I.3. Notions générales sur les plasmas**

Après avoir présenté les fondamentaux de la combustion des flammes swirlées et non-prémélangées, nous abordons maintenant le sujet des plasmas, qui sont utilisés assister la combustion. Avant d'approfondir les applications spécifiques des plasmas dans ce contexte, nous commencerons par fournir une vue d'ensemble des plasmas en tant qu'état de la matière hautement énergétique, et présenterons leur classification et leurs régimes caractéristiques. Cette introduction aux plasmas présentera les bases nécessaires pour comprendre leur rôle dans l'amélioration des performances de combustion.

#### **I.3.1. Fondamentaux**

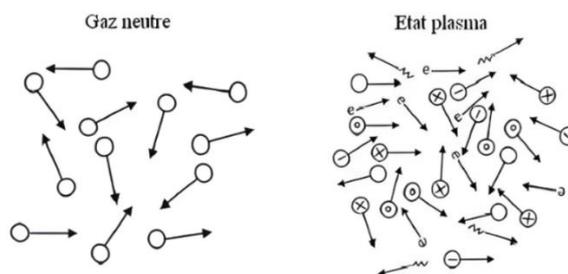
Le plasma est un état de la matière dans lequel une partie des atomes ou molécules d'un gaz sont convertis en ions en perdant ou gagnant des électrons [1]. Souvent qualifié de

"quatrième état de la matière", passant de l'état solide au liquide, puis au gaz, pour finalement atteindre l'état plasma, qui représente le plus haut niveau d'énergie thermique :



Le passage d'un état à l'autre étant réalisé par un certain apport d'énergie  $\Delta E$ .

Un plasma se compose d'électrons, de radicaux libres, d'ions positifs et négatifs, de photons avec différentes énergies allant de l'ultraviolet (UV) à l'infrarouge lointain, ainsi que d'atomes et de molécules dans des états neutres et excités (Figure I.11). Chaque particule chargée dans un plasma interagit simultanément avec les autres en raison de la longue portée de la force électrique (force coulombienne) entre les particules chargées. Ces interactions génèrent un comportement collectif qui n'existe pas dans les gaz neutres, conférant ainsi au plasma des propriétés uniques. Les plasmas artificiels créés en laboratoire sont généralement faiblement ionisés. En raison de leur faible densité, leurs propriétés physiques (compressibilité élevée, énergie interne et pression proportionnelles à la température absolue, écoulements, ondes acoustiques, etc.) sont similaires à celles des gaz neutres, tandis que leurs propriétés électromagnétiques (conductivité électrique, indice de réfraction, etc.) diffèrent en raison de la présence d'électrons libres.



**Figure I.11.** Schéma de la différence entre gaz neutre et plasma.

Les plasmas peuvent être créés naturellement ou artificiellement en laboratoire ou dans l'industrie, et ils trouvent de nombreuses applications comme par exemple la fusion thermonucléaire et l'électronique. Le plasma présente trois caractéristiques principales qui sont essentielles dans le domaine de la chimie. Tout d'abord, il permet d'atteindre des températures et des densités d'énergie extrêmement élevées qui ne peuvent pas être obtenues par des réactions chimiques conventionnelles. Deuxièmement, le plasma génère des espèces actives très énergétiques, telles que des électrons, des ions, des radicaux et des atomes et molécules excités. Enfin, le plasma peut se trouver dans un état de non-équilibre thermodynamique, ce qui permet d'obtenir des concentrations élevées d'espèces actives tout en maintenant une température globale basse, parfois même inférieure à la température ambiante. Par conséquent, le plasma ne se limite pas à être une source d'énergie, mais il joue également un rôle essentiel dans la cinétique chimique.

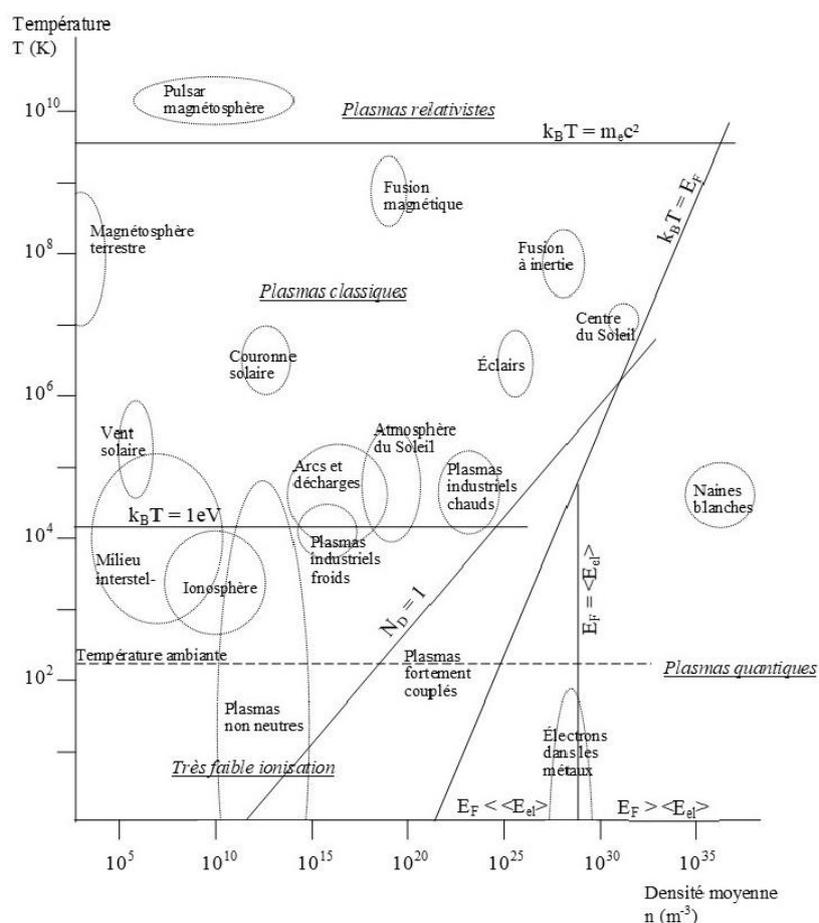
La caractérisation du plasma repose principalement sur sa densité et sa température. La température décrit l'énergie des électrons, des ions, des atomes et des molécules présents dans

le plasma. Dans un plasma non thermique, il existe plusieurs températures, notamment celles des électrons, des ions, des vibrations et des rotations, qui peuvent différer les unes des autres.

Afin de distinguer les différentes catégories du plasma, qu'elles soient naturelles ou artificielles, chaudes ou froides, quantiques ou relativistes, il est courant de les représenter sur un graphique qui met en relation leur densité et leur température (voir Figure I.12). Cette approche permet de délimiter plusieurs domaines distincts :

- Entre les droites  $k_B T = mc^2$ ,  $k_B T = E_F$ ,  $N_D = 1$  et  $k_B T = 1eV$  on retrouve les plasmas classiques, qui sont les plus étudiés et fréquemment rencontrés.
- Les plasmas quantiques se trouvent dans la zone de basse température et haute densité. Ces plasmas se distinguent par leur comportement quantique et sont d'un grand intérêt dans les recherches actuelles.
- Les plasmas relativistes se manifestent à des températures extrêmement élevées. Ce sont des plasmas où les effets de la relativité restreinte sont importants et doivent être pris en compte.
- Enfin, les plasmas très faiblement ionisés se trouvent lorsque  $k_B T < 1eV$ . Dans cette région, la densité d'ions est faible et les interactions entre particules chargées sont moins significatives.

Les plasmas qui nous intéressent dans cette étude sont des plasmas artificiels, qui sont généralement créés par l'application d'une puissance électrique. Une façon simple de créer un plasma consiste à appliquer une différence de tension entre une anode et une cathode. Lorsque l'anode et la cathode sont séparées par une distance appropriée, un plasma peut se former lorsque le champ électrique est suffisamment fort. Le milieu entre les électrodes, comme l'air, devient ionisé à ce moment-là et permet aux électrons de circuler de la cathode vers l'anode. Des photons sont généralement émis par le plasma dans le visible, ce qui permet à l'observateur de le voir directement.



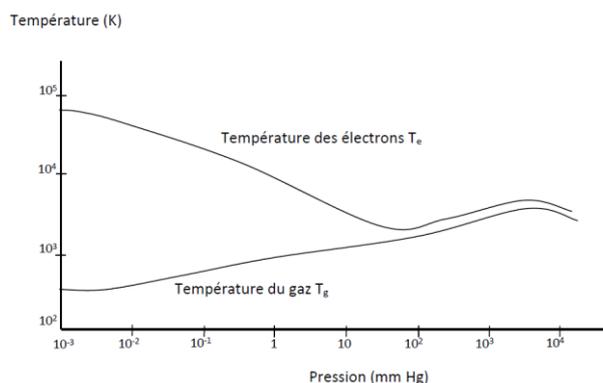
**Figure I.12.** Classification des plasmas par densité et température [52].

### I.3.2. Classification des plasmas

Le plasma peut présenter plusieurs températures puisque les températures des espèces ne sont pas nécessairement égales entre elles [1]. Ce phénomène permet de classer les plasmas en deux catégories en fonction de leur état d'équilibre thermodynamique : thermiques, tièdes et non thermiques.

#### I.3.2.1. Plasma thermique

Dans les plasmas thermiques à l'équilibre thermodynamique, tous les constituants présents tels que les électrons, les ions et les molécules ont sensiblement la même énergie et, par conséquent, la même température. Cela signifie que la température des électrons ( $T_e$ ) et la température des gaz ( $T_g$ ) sont approximativement égales ( $T_e \approx T_g$ ) comme le montre Figure I.13. Ces températures sont très élevées et peuvent atteindre  $10^6$  K lorsque le gaz est complètement ionisé. Ces plasmas sont généralement créés sous haute pression, par exemple dans des torches à plasma, et sont utilisés dans des domaines tels que l'incinération, la métallurgie, la sidérurgie, la cimenterie et même la pétrochimie pour convertir les résidus pétroliers en produits valorisables.



**Figure I.13.** Température des électrons et des espèces lourdes dans le plasma

En laboratoire, les plasmas thermiques peuvent être produits de différentes manières :

- Par des décharges d'arc électrique alimentées par un générateur de haute intensité ( $> 10$  A) et avec une faible chute de tension à la cathode (environ 10 V).
- La torche à plasma est une forme de décharge dans laquelle un plasma s'écoule. Il existe différents types de torches à plasma (à arc, à couplage inductif, à micro-ondes). Un arc électrique est généralement créé entre une électrode en tungstène placée au centre d'une deuxième électrode tubulaire en cuivre qui fournit le gaz plasmagène [53].
- Les décharges micro-ondes : dans ce type de décharge, le gaz plasmagène est contenu dans une enceinte située dans une cavité résonnante contenant une antenne qui émet des micro-ondes (fréquence  $> 200$  MHz), transférant ainsi de l'énergie au gaz qui se transforme en plasma. Les plasmas générés par micro-ondes sont créés sans électrodes [54] et peuvent être obtenus à des pressions assez élevées et avoir un haut niveau d'énergie.

### I.3.2.2. Plasma non thermique

Dans les plasmas hors équilibre thermodynamique, les diverses particules (électrons, ions, atomes, molécules) possèdent des énergies moyennes considérablement différentes. Les électrons ont une énergie moyenne plus élevée (typiquement plusieurs eV, où 1eV correspond à 11600 K) que les particules lourdes (atomes, molécules, radicaux), tandis que la température du gaz demeure proche de la température ambiante, d'où l'appellation du plasma "non thermique". Ces plasmas sont obtenus à pression atmosphérique et sont faiblement ionisés ( $0 < \alpha_i < 10^{-4}$ ). Les électrons, accélérés par le champ électrique, subissent des collisions inélastiques avec les espèces lourdes, transférant ainsi leur énergie cinétique pour former des espèces réactives. L'utilisation de ces plasmas dans le domaine de la dépollution est en plein essor en raison de leur facilité de mise en œuvre. Cette catégorie du plasma englobe les décharges électriques telles que la décharge couronne, la décharge luminescente à pression atmosphérique, les décharges immergées, les décharges à barrière diélectrique (DBD) et la décharge d'arc électrique glissant ou "Glidarc".

### I.3.3. Les régimes du plasma

Le plasma, en tant qu'état de la matière ionisée, peut se manifester dans différents régimes ou conditions selon ses propriétés et caractéristiques. Cette section explore les divers régimes du plasma, mettant en évidence les comportements distincts et les applications associées. Nous examinerons notamment la décharge couronne, la décharge luminescente et la décharge d'arc. Chacun de ces régimes présente des caractéristiques spécifiques qui jouent un rôle essentiel dans divers domaines scientifiques et technologiques.

#### I.3.3.1. La décharge couronne

Le régime de décharge couronne (corona discharge en anglais) est un type de plasma non thermique qui se manifeste à une pression atmosphérique ou à proximité de celle-ci. Il se forme lorsque des électrodes asymétriques, telles qu'une configuration pointe-plan, sont utilisées [55], [56]. Ce type de plasma requiert les plus faibles tension et courant entre les électrodes. L'ionisation se produit principalement dans la région près de l'électrode chargée, mais son intensité relativement faible empêche la formation d'un arc vers l'anode.

Visuellement, la décharge couronne peut-être observée sous la forme de nombreux filaments lumineux, qui peuvent varier en composition et ne pas être uniformes. On peut décrire cette décharge comme une zone d'ionisation visible avec des filaments ou des jets lumineux. Un exemple de décharge couronne est illustré dans la Figure I.14 [57].

Ce régime de décharge couronne est utilisé dans diverses applications. Par exemple, il est couramment employé dans les systèmes de purification de l'air pour éliminer les polluants ou les particules indésirables. Il est également utilisé dans les procédés de désinfection de l'eau et dans certaines applications de stérilisation. Dans le domaine de l'impression électrophotographique, la décharge couronne est utilisée pour charger électriquement la zone photosensible. De plus, elle est utilisée dans les systèmes d'épuration des gaz pour éliminer les composés indésirables présents dans les gaz d'échappement industriels [58].

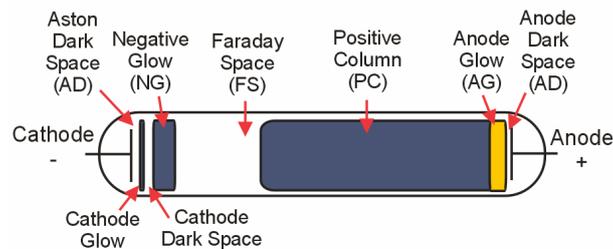


**Figure I.14.** Exemple de décharge de couronne [57].

#### I.3.3.2. La décharge luminescente

La décharge luminescente (ou glow discharge en anglais) est un autre exemple du plasma non thermique et représente le régime du plasma qui se forme après la décharge couronne avec une augmentation du courant. Lorsqu'une tension est appliquée entre une cathode et une anode, le plasma atteint une tension de claquage où l'on observe une baisse soudaine de la tension et une augmentation du courant. Cela signifie que la région entre les électrodes est davantage

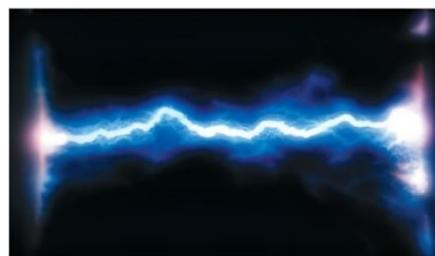
ionisée et que le courant circule à travers le milieu entre les électrodes [59]. La décharge lumineuse se distingue par sa formation à relativement haute tension et faible courant (par rapport à la décharge d'arc). La composition générale d'un plasma lumineux est illustrée dans la Figure I.15 [60]. Dans cette figure, on peut observer la configuration typique d'une décharge lumineuse. On retrouve une cathode et une anode, entre lesquelles se forme le plasma. La région du plasma lumineux est clairement visible, caractérisée par une couleur caractéristique.



**Figure I.15.** Composition d'une décharge lumineuse [60].

### I.3.3.3. La décharge d'arc

La décharge arc se distingue par sa formation à faible tension et courant élevé. L'arc est formé en augmentant le courant de la décharge lumineuse. Au fur et à mesure que la tension augmente dans le régime de la décharge lumineuse, un autre point de tension de claquage est atteint, qui montre à nouveau une chute soudaine de la tension avec une augmentation du courant. À ce stade, le milieu entre les deux électrodes est proche de l'ionisation totale. La décharge d'arc est souvent observée, comme dans un éclair ou un arc de soudage, et il est généralement considéré comme un plasma thermique.



**Figure I.16.** Illustration d'un arc électrique entre deux métaux [61]

La relation entre la tension et le courant pour les différents régimes du plasma est illustrée dans la Figure I.17 [60].

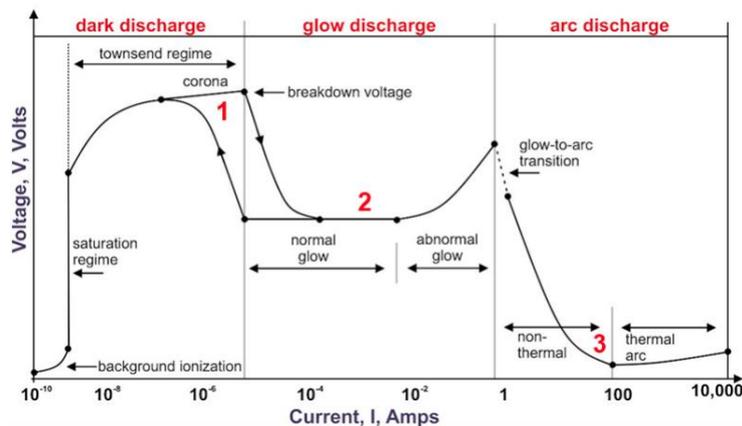


Figure I.17. Diagramme des régimes du plasma [60].

### I.3.4. Principe et caractéristiques du plasma impulsionnel microseconde

Le principe fondamental du plasma impulsionnel microseconde repose sur l'utilisation d'impulsions électriques de courte durée (de l'ordre de la microseconde) pour générer un plasma impulsionnel. L'aspect essentiel de cette technologie réside dans sa vaste gamme de fréquences de répétition d'impulsion. Les impulsions microsecondes offrent une flexibilité significative en termes de choix de la fréquence de répétition d'impulsion, ce qui les rend adaptables à diverses applications et conditions de contrôle.

En comparaison avec d'autres types de plasmas, tels que les plasmas millisecondes et nanosecondes, le plasma impulsionnel microseconde présente plusieurs avantages distinctifs. Tout d'abord, les décharges microsecondes ne nécessitent pas l'utilisation de générateurs électriques très coûteux comme les générateurs NRP. De plus, avec des impulsions de tension dans le domaine de la milliseconde ou de quelques dizaines de millisecondes, l'énergie électrique déposée peut augmenter, conduisant ainsi à un plasma plus chaud. En revanche, le plasma impulsionnel microseconde permet de maintenir un meilleur contrôle sur l'énergie électrique déposée, évitant ainsi une augmentation significative de la température du plasma. En ce qui concerne le plasma nanoseconde, le plasma impulsionnel microseconde présente l'avantage de produire moins d'interférences électromagnétiques. Les plasmas nanosecondes, bien que très énergétiques, peuvent perturber les instruments de mesure et de contrôle en raison de leurs niveaux élevés d'interférences électromagnétiques [62]. En revanche, le plasma impulsionnel microseconde offre une meilleure compatibilité avec les dispositifs de mesure et de contrôle, ce qui facilite son intégration dans des applications d'ingénierie.

De plus, un avantage important du plasma impulsionnel de microsecondes est sa consommation d'énergie optimisée. Le taux d'utilisation de l'énergie est plus élevé pour les impulsions nanosecondes, suivies des impulsions de microsecondes, tandis que les impulsions de millisecondes présentaient les rendements les plus faibles [10]. Cela signifie que le plasma impulsionnel microseconde est capable d'utiliser l'énergie de manière plus efficace pour générer un plasma actif tout en maintenant des performances de contrôle satisfaisantes.

En termes d'applications, le plasma impulsif de type microseconde présente un potentiel significatif dans le domaine du contrôle des écoulements. Il peut être utilisé pour modifier les caractéristiques de l'écoulement, réduire la traînée, améliorer la combustion et optimiser l'aérodynamique. En outre, cette technologie peut être appliquée dans divers domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie et l'environnement.

### I.3.5. Applications des plasmas

Une large variété d'expériences sur le plasma a été réalisée en laboratoire afin de contribuer à notre compréhension de cette forme de matière, ainsi que pour tester et développer la théorie du plasma. Ces avancées significatives dans la recherche sur le plasma ont ouvert la voie à de nombreuses applications. Outre l'assistance à la combustion par plasma, cette section présente brièvement d'autres applications.

Le générateur d'énergie magnétohydrodynamique (MHD) est un autre exemple d'application majeure. Il convertit l'énergie cinétique d'un plasma dense s'écoulant à travers un champ magnétique en énergie électrique. Les générateurs MHD se distinguent des générateurs électriques traditionnels car ils n'ont pas de pièces mobiles limitant la température maximale. Dans ce cas, le conducteur en mouvement est un gaz ionisé chaud.

Les systèmes de propulsion par plasma utilisés dans les satellites reposent sur un processus qui convertit l'énergie électrique en énergie cinétique du plasma, contrairement au fonctionnement du générateur MHD. Parmi ces systèmes, les propulseurs à effet Hall ont récemment suscité un intérêt croissant [62]. Ils génèrent une poussée en accélérant des espèces chargées grâce à l'effet Hall. Un exemple de propulseur à effet Hall de l'entreprise Safran est présenté dans la Figure I.18.



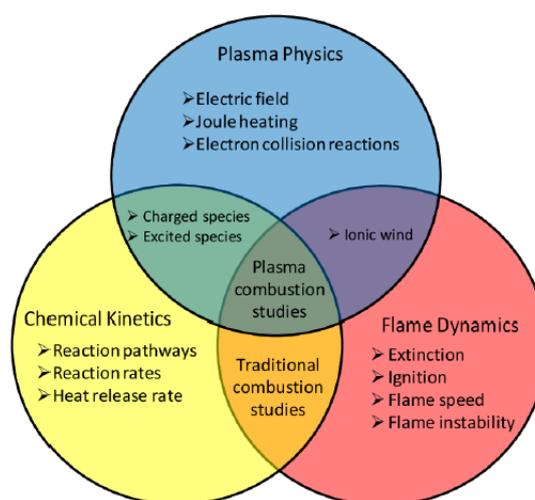
**Figure I.18.** Propulseur à effet hall PPS@5000 [63].

Après avoir illustré quelques applications des plasmas, nous nous concentrons maintenant sur l'application spécifique de la combustion assistée par plasma. Cette application joue un rôle clé dans notre étude, et nous examinerons en détail les principes, les types du plasma utilisés et les recherches existantes sur la combustion assistée par plasma impulsif. Cela nous permettra de comprendre les avantages et les limitations de cette approche.

## I.4. Combustion assistée par plasma

### I.4.1. Principe de la combustion assistée par plasma

La combustion turbulente est une interaction complexe de plusieurs phénomènes, alliant la dynamique de la flamme, la cinétique chimique, les effets d'écoulement et les émissions de rayonnement. L'analyse de la vaste gamme de phénomènes qui régissent la combustion turbulente est essentielle pour comprendre le comportement des flammes et est de première importance pour orienter à la fois les futures recherches scientifiques et les applications d'ingénierie. Cela est particulièrement vrai en ce qui concerne la combustion assistée par plasma, qui complexifie davantage le sujet, tout en offrant de nouvelles opportunités passionnantes dans une variété d'applications, notamment l'allumage plus fiable [64], une stabilité accrue de la flamme [54], [65], [66] et le contrôle des émissions polluantes [67]. L'effet du plasma sur l'amélioration de la combustion dépend de plusieurs facteurs comme le combustible utilisé, la géométrie de la configuration des électrodes, et les paramètres du plasma. Le dispositif plasma le mieux adapté dépend de l'application, et la physique régissant l'interaction entre le plasma et les processus de combustion peut être radicalement différente d'un dispositif à l'autre. Le diagramme de Venn présenté dans la figure I.19 permet d'illustrer les diverses interactions entre le plasma et la combustion. En outre, les trois principaux effets, thermique, cinétique et de transport, ne sont pas nécessairement complètement distincts les uns des autres mais souvent combinés [68].



**Figure I.19.** Interaction plasma-combustion.

#### I.4.1.1. Effet thermique

Dans une perspective de combustion, l'effet thermique du plasma se traduit par une augmentation directe ou indirecte de la température, accélérant ainsi l'oxydation du combustible et d'autres réactions chimiques. La chaleur générée par le plasma améliore la combustion de différentes manières, en fonction du moment et de l'endroit où la chaleur du plasma est libérée [69], [70].

Lorsque le plasma entre en interaction avec la flamme, la chaleur du plasma est directement transférée à la flamme, ce qui peut augmenter sa vitesse et sa stabilité. Toutefois, le plasma non thermique transporte généralement moins de chaleur que le plasma thermique. Lorsque le plasma non thermique est appliqué au réactif avant le processus de combustion, il peut préchauffer directement ou indirectement le réactif. Le préchauffage direct implique une augmentation de la température du réactif due à la chaleur du plasma. Le préchauffage indirect se produit lorsque le plasma déclenche une réaction exothermique intermédiaire, fournissant ainsi une chaleur supplémentaire au réactif. Le préchauffage du réactif entraîne une augmentation du nombre de particules dépassant l'énergie d'activation, ce qui accélère la vitesse des réactions chimiques [70]. La relation entre la température et la vitesse de réaction est décrite par la loi d'Arrhenius :

$$K = A e^{-E_a/RT} \quad (\text{I.15})$$

Dans cette équation,  $K$  représente la constante de vitesse,  $E_a$  est l'énergie d'activation,  $R$  est la constante des gaz et  $T$  est la température absolue. Le terme  $A$ , appelé facteur de fréquence, est une relation empirique entre la température et la constante de vitesse. Le facteur de fréquence englobe la fréquence des collisions favorables à la réaction. Toutefois, par rapport au terme exponentiel ( $-E_a/RT$ ), la variation de  $A$  est négligeable, ce qui permet de la considérer comme une constante. La vitesse de réaction chimique est généralement exprimée par la loi de vitesse :

$$\text{Vitesse de réaction} = K [A]^m [B]^n \quad (\text{I.16})$$

Dans cette expression, les exposants  $m$  et  $n$  représentent les ordres de réaction.

#### I.4.1.2. Effet cinétique

Afin d'illustrer le rôle d'un plasma dans l'interaction avec une flamme sur le plan de la cinétique réactionnelle, nous allons explorer les mécanismes cinétiques fondamentaux dans le contexte d'un mélange  $H_2/O_2/N_2$ , tel qu'étudié par Yiguang Ju et Wenting Sun [68]. Le processus d'allumage et de combustion comprend un ensemble complexe d'étapes élémentaires impliquant un mécanisme chimique et des réactions en chaîne. Ces réactions en chaîne sont initiées par des radicaux, tels que  $H$ ,  $O$ ,  $OH$ ,  $NO$  ou d'autres hydrocarbures excités, et jouent un rôle essentiel dans la propagation des réactions [70]. La présence des radicaux ne se limite pas qu'à l'initiation des réactions en chaîne, mais conduit également à l'excitation des molécules stables, entraînant ainsi des processus de ramification de la chaîne réactionnelle et la génération de nouveaux radicaux. Parallèlement, lorsque les espèces réactives deviennent stables, ces réactions sont appelées processus de terminaison de chaîne. De manière similaire au processus d'allumage conventionnel, certaines conditions telles qu'une température élevée, une pression ou d'autres facteurs peuvent déclencher des processus de ramification de la chaîne, initiés par des radicaux (initiation de la chaîne). Ces radicaux attaquent ensuite les molécules stables, entraînant de nouveaux processus de ramification de la chaîne. La réussite de l'inflammation dépend de la supériorité des processus de ramification de la chaîne par rapport aux processus de terminaison de la chaîne [70]. Un délai d'allumage se produit lorsque la température atteint le seuil d'un processus exothermique de ramification de la chaîne. Au cours du processus de combustion, les réactions de ramification de la chaîne se produisent

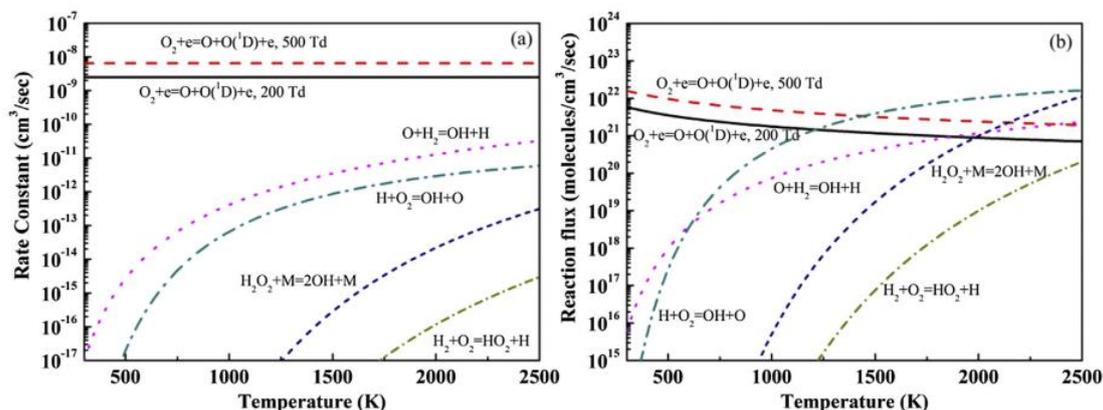
continuellement en raison de la température élevée résultant des réactions exothermiques élémentaires (ou simplement de la température de la flamme). Si la température de la flamme diminue pour certaines raisons, telles qu'une diminution de la richesse ou une perte de chaleur, le taux de réaction de ramification de la chaîne augmente. De manière similaire au processus d'allumage, la flamme s'éteint lorsque les réactions de terminaison de chaîne prédominent sur les réactions de ramification de chaîne. Le délai d'allumage est influencé par des facteurs tels que la pression, la température et les radicaux initiaux [68].

La réaction (R2) (voir Tableau I.2) se réalise principalement à hautes températures (>1000K). Les réactions à froid permettent ainsi de favoriser les processus d'allumage en augmentant les taux de réaction de ramification de chaîne plus rapidement que les taux de réaction de terminaison de chaîne. En plus de la production de radicaux par le plasma, les espèces intermédiaires et excités électriquement à longue durée de vie, telles que  $O_2$ ,  $O$ ,  $O_3$  et  $NO$ , produisent également des radicaux  $O$  et  $OH$ , comme indiqué dans Tableau I.2 par les réactions (R10) à (R14). Ces réactions se produisent à des températures beaucoup plus basses que la réaction (R2) [68]. Par conséquent, l'allumage peut se produire à des températures inférieures à celles de l'allumage conventionnel lorsque le plasma est impliqué dans les réactions.

**Tableau I.2.** Les réactions principales dans le système de réaction  $H_2/O_2/N_2$  assisté par plasma [68].

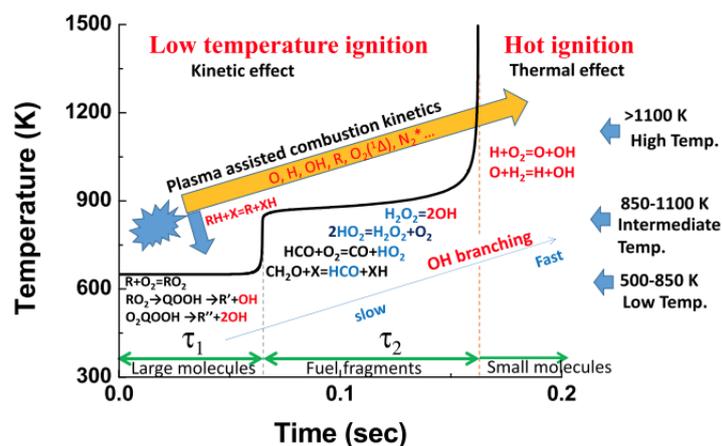
<i>Chain-initiation</i>	
$H_2 + O_2 = HO_2 + H$	(R1)
<i>Chain-branching/propagation</i>	
$H + O_2 = OH + O$	(R2)
$O + H_2 = OH + H$	(R3)
$OH + H_2 = H_2O + H$	(R4)
$HO_2 + H = OH + OH$	(R5)
$H_2O_2 = OH + OH$	(R6)
<i>Chain-termination</i>	
$H + O_2(+M) = HO_2(+M)$	(R7)
$HO_2 + H = H_2 + O_2$	(R1)
<i>Electron and <math>N_2(^*)</math> impact dissociation</i>	
$e + O_2 = O + O(^1D)$	(R8a)
$e + O_2 = O + O$	(R8b)
$N_2(A,B,C) + O_2 = O + O + N_2$	(R9a)
$N^+ + O_2 = O^+ + NO$	(R9b)
<i>Plasma activated reactions</i>	
$H + O_2(^1\Delta_g) = O + OH$	(R10)
$O_3 + O_2 = O + O_2 + O_2$	(R11)
$O(^1D) + H_2 = OH + H$	(R12)
<i>NO catalytic branching</i>	
$NO + HO_2 = NO_2 + HO$	(R13)
$H + NO_2 = NO + OH$	(R14)

Ce principe s'applique également à l'allumage et à la combustion des hydrocarbures. Le taux de réaction de génération de radicaux par impact électronique (R8a) est nettement plus élevé que les taux de réaction de génération de radicaux par les réactions (R2) à (R6), comme le montre la Figure I.20. Cependant, le taux de réaction seul ne permet pas de déterminer quelles réactions sont favorisées dans des conditions spécifiques. La Figure I.20 indique que (R8a) prédomine par rapport à R2-R6 en dessous de 1000K. À des températures inférieures à 500K, la génération de radicaux par impact électronique dicte l'ensemble de la réaction. En revanche, les réactions (R2) à (R6) deviennent plus préférentielles au-dessus de 1000K.



**Figure I.20.** Constantes de vitesse (a) et flux de réaction (b) pour les réactions de dissociation par impact électronique à des valeurs de champ électrique égales à 200 Td et 500 Td et les réactions de branchement en chaîne [68].

Ces résultats montrent que l'effet cinétique du plasma est beaucoup plus important à basse température [68]. Figure I.21 positionne bien l'effet thermique et cinétique du plasma sur la combustion pour un hydrocarbure lourd comme le combustible liquide.

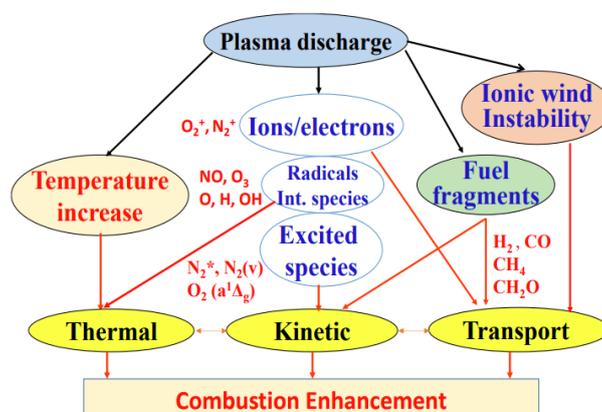


**Figure I.21.** Schéma des voies d'amélioration cinétique et thermique de la combustion assistée par plasma pour les combustibles liquides à haute, moyenne et basse température.

#### I.4.1.3. Effet de transport

L'effet de transport dans le plasma conduit à la décomposition des grosses et lourdes molécules de combustible en fragments plus petits. Certains de ces fragments moléculaires finissent par former différentes substances, telles que l'hydrogène et le monoxyde de carbone. Ce phénomène est connu sous le nom de "reformage assisté par plasma" [71]–[73]. Le reformage du combustible est couramment utilisé pour produire du gaz de synthèse (ou syngaz) [74], [75]. Quelle que soit la méthode utilisée pour le reformage du combustible, l'objectif est de produire un mélange gazeux riche en hydrogène. Le syngaz est principalement composé d' $H_2$ , de CO, et parfois de  $CO_2$  et de  $CH_4$ . En raison de sa teneur élevée en  $H_2$ , l'effet du

reformage du combustible devrait améliorer la vitesse de combustion de la flamme et faciliter l'allumage.



**Figure I.22.** Les voies d'amélioration de la combustion utilisant des décharges du plasma hors équilibre [5].

L'ensemble de ces effets combinés permet d'améliorer considérablement les performances de la combustion assistée par plasma. Les voies de cette combustion peuvent être représentées de manière schématique dans la Figure I.22 [68].

#### I.4.2. Revue de la littérature sur la combustion assistée par plasma

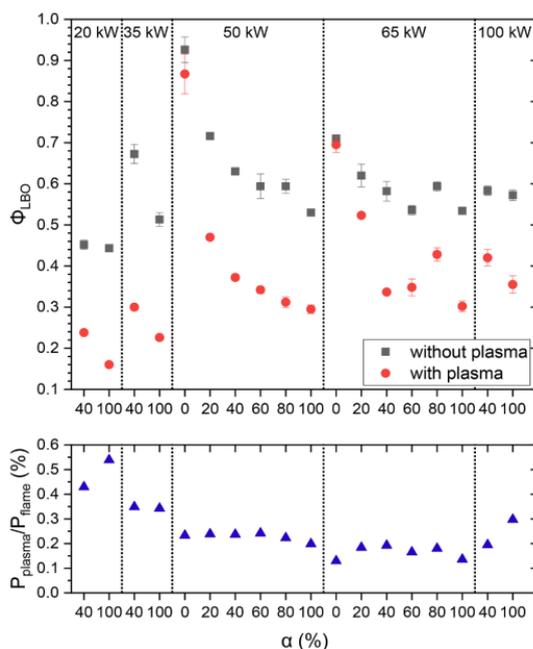
La combustion assistée par plasma est un domaine de recherche dynamique qui a suscité un intérêt croissant au cours des dernières années. Il existe plusieurs types de génération du plasma, mais dans cette section, nous nous concentrerons spécifiquement sur trois d'entre eux : les plasmas impulsionnels nanoseconde, les plasmas impulsionnels microseconde et les plasmas glidarc. Nous passerons en revue les études clés de la littérature portant sur la combustion assistée par ces types du plasma. Ces études ont exploré divers aspects de l'utilisation du plasma pour améliorer les processus de combustion et ont largement contribué à notre compréhension des mécanismes sous-jacents.

##### I.4.2.1. Combustion assistée par plasma impulsionnel nanoseconde

Une décharge dans un gaz a été observée il y a plus de 100 ans, en 1893, par Thomson et al. [76]. Lorsqu'une impulsion de haute tension de courte durée est appliquée à un gaz à pression atmosphérique et à température ambiante, deux types de décharges peuvent se former : une décharge de type streamer hors équilibre pour les impulsions courtes (de l'ordre des unités et dizaines de ns), et un arc impulsionnel à l'équilibre pour les impulsions plus longues (de l'ordre des dizaines et centaines de ns) selon le générateur électrique utilisé et la limitation en courant de ce dernier. L'initiation de la décharge avec une augmentation abrupte de la tension (d'environ  $1 \text{ kV}\cdot\text{ns}^{-1}$ ) à des densités de gaz modérées suscite un grand intérêt. Grâce aux générateurs de haute tension modernes, caractérisés par des amplitudes d'impulsion allant jusqu'à des dizaines et des centaines de kilovolts, un temps de montée de tension de l'ordre de la nanoseconde, une durée d'impulsion de l'ordre des dizaines de nanosecondes et une

fréquence de répétition atteignant parfois des dizaines de kHz, il devient possible de créer une décharge spatialement uniforme [77].

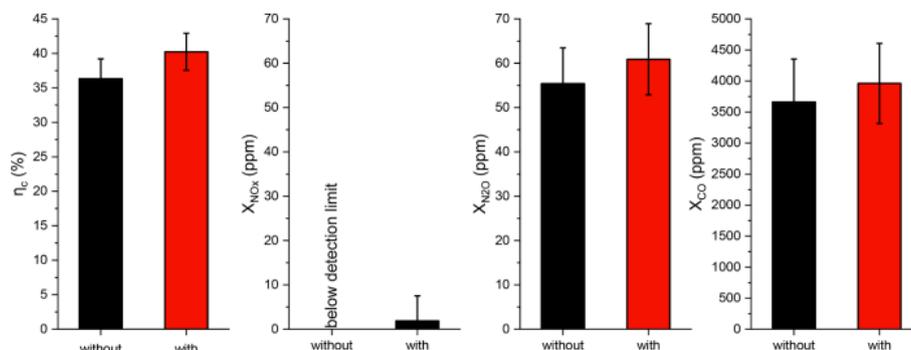
Plusieurs études ont été menées pour explorer les effets des décharges plasma nanoseconde sur la combustion de différents mélanges. Blanchard et al. [78] ont réalisé une étude approfondie sur l'effet des décharges plasma nanoseconde répétitives (NRP) sur la combustion assistée par plasma. Leur recherche a porté sur l'utilisation de décharges NRP pour la stabilisation de flammes pauvres de méthane en utilisant un brûleur modèle de turbine à gaz. La Figure I.23 présente la carte de stabilité du brûleur utilisé dans leur étude avec et sans décharges NRP pour différents facteurs  $\alpha$  (défini comme le rapport du débit massique de carburant injecté à travers l'étage pilote au débit massique total de combustible). Comme le montre cette figure, les décharges NRP étaient capables d'étendre considérablement la limite de combustion pauvre jusqu'à une richesse de 0.16, ce qui est extrêmement bas. De plus, la stabilisation des flammes pauvres a été obtenue avec une puissance électrique inférieure à 0.2 % de la puissance thermique de la flamme.



**Figure I.23.** Carte de stabilité du brûleur avec et sans décharges NRP pour différents facteurs de fractionnement de fuel et puissances thermiques de la flamme [78].

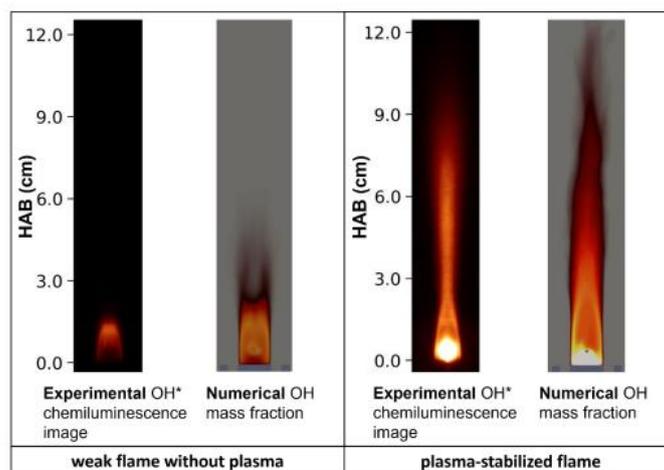
Les chercheurs ont également étudié les effets des décharges NRP sur l'efficacité de combustion et les émissions polluantes d'une flamme en forme de tulipe. Les résultats ont montré que la présence des décharges NRP n'a pas eu d'effet significatif sur les émissions de CO et de  $N_2O$  de la flamme (Figure I.24), qui étaient déjà élevées en l'absence du plasma. Cependant, les émissions de  $NO_x$  étaient très faibles avec la présence des décharges NRP, atteignant moins de 2 ppm. De plus, les décharges NRP ont été bénéfiques pour augmenter l'efficacité de combustion de la flamme. Ces résultats suggèrent que les niveaux élevés d'émissions de CO et de  $N_2O$  de la flamme en forme de tulipe sont principalement attribuables

à la structure de la flamme elle-même plutôt qu’aux décharges NRP. Cette étude souligne l’importance de prendre en compte les caractéristiques de la flamme lors de l’évaluation des effets des décharges plasma sur l’efficacité de combustion et les émissions polluantes.



**Figure I.24.** Comparaison de l’efficacité de combustion et des émissions, avec et sans les décharges NRP appliquées à 33 kHz avec une énergie moyenne déposée de  $3.4 \pm 0.8$  mJ, dans une flamme en forme de tulipe de 50 kW [78].

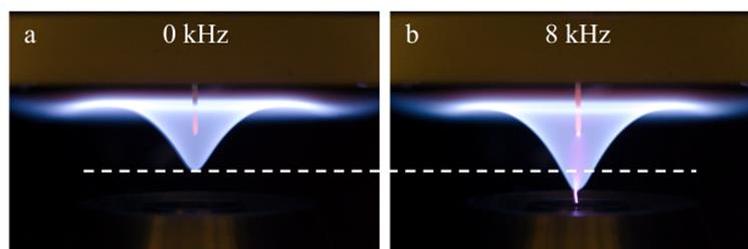
Dans un autre article [66], ces mêmes chercheurs ont étudié l’effet des décharges NRP sur une flamme de méthane-air turbulente en régimes riche et pauvre. L’analyse, basée sur une approche expérimentale et numérique, a permis de quantifier les effets transitoires des décharges sur la combustion. Les diagnostics optiques ont permis de caractériser leur impact sur la stabilisation de la flamme, notamment en étudiant la forme de la flamme à l’aide de l’imagerie de la chimiluminescence  $OH^*$  et en mesurant la température par spectroscopie d’émission optique. En parallèle, une simulation des grandes structures de la turbulence (LES) a été réalisée pour modéliser la flamme turbulente prémélangée de méthane-air. La chimie de combustion a été modélisée à l’aide d’un mécanisme analytique réduit, tandis que la décharge plasma a été décrite par un modèle semi-empirique. La comparaison entre les expériences et les simulations a validé la méthodologie numérique utilisée comme le montre la Figure I.25.



**Figure I.25.** Images de la chimiluminescence  $OH^*$  dans les deux cas expérimental et numérique sans plasma (gauche) et avec plasma à 20 kHz (droite) [66].

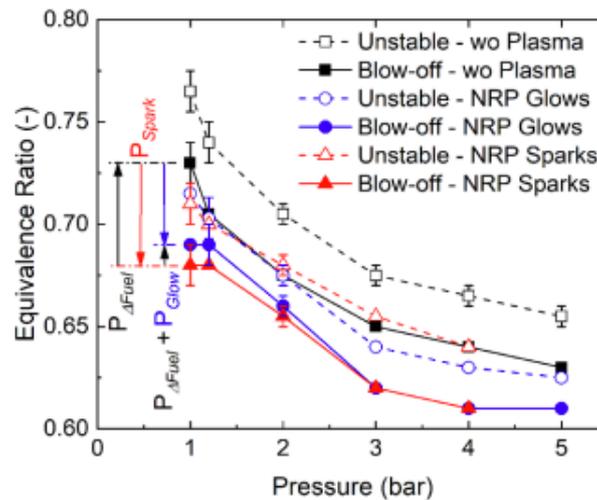
Cette étude a également révélé que le plasma améliore la combustion, grâce aux effets de température et aux radicaux générés par les décharges. Ces phénomènes contribuent directement à la propagation du front de flamme dès qu'ils atteignent la couche de cisaillement de la zone de recirculation. Les gaz frais qui n'avaient pas été brûlés sans plasma sont ainsi allumés, et le front de flamme se propage plus en aval du corps de déflecteur. Ces observations mettent en évidence l'influence bénéfique du plasma sur la combustion en favorisant l'allumage des gaz non brûlés et en permettant une propagation plus étendue du front de flamme.

Lambert et al. [79] ont également réalisé des recherches sur l'effet de l'activation du plasma NRP sur des flammes de méthane/air prémélangées à pression atmosphérique en régime pauvre en utilisant un brûleur axisymétrique. Leur étude met en évidence l'impact de l'augmentation de la fréquence de répétition d'impulsions (PRF) sur la stabilisation de la flamme. Plus précisément, ils ont observé que lorsque la PRF augmente, la flamme se stabilise plus en amont, c'est-à-dire plus près de la source d'activation du plasma. Les résultats obtenus grâce à l'imagerie démontrent également que la flamme reste immobile et ne se relaxe pas entre les décharges NRP consécutives. Ils ont également examiné l'effet des décharges sur la localisation du bord d'attaque de la flamme. Ils ont montré que lorsque le plasma n'est pas activé, la section externe de la flamme se stabilise sur la plaque de stagnation, tandis que la section centrale se stabilise plus bas en raison de la présence du sillage derrière l'aiguille mise à la masse. Cependant, l'inclusion d'un flux interne à l'aiguille réduit l'effet du sillage et permet à la flamme de se stabiliser plus en amont. Lorsque les décharges NRP sont produites entre les électrodes, le bord d'attaque de la flamme se déplace vers le bas, ce qui témoigne de la modification de la localisation de la flamme sous l'effet de l'activation du plasma comme le montre la Figure I.26.



**Figure I.26.** Localisation du bord d'attaque de la flamme (a) sans et (b) avec activation du plasma à une PRF de 8 kHz [79].

Di Sabatino et Lacoste. [80] ont examiné l'effet des décharges NRP sur la stabilisation et la limite d'extension de décrochage des flammes de prémélange de méthane-air à différentes pressions. Deux régimes de décharge, les NRP glows et les NRP sparks, ont été étudiés. Les résultats ont démontré que les décharges NRP permettaient d'étendre efficacement la limite de décrochage et la stabilité des flammes de prémélange de méthane-air, même à des pressions élevées, comme le montre la Figure I.27.



**Figure I.27.** La stabilité et les limites de décrochage en régime pauvre d'une flamme swirlée de méthane-air avec et sans décharges NRP en fonction de la pression [80].

Ces résultats ont été obtenus avec un rapport entre la puissance des décharges NRP et la puissance thermique de la flamme inférieur ou égal à 0.7 %. De plus, il a été observé que la tension crête nécessaire pour maintenir ce rapport de puissance constant n'augmentait pas de manière linéaire avec la pression, malgré la diminution linéaire attendue du champ électrique réduit avec la pression. Ils ont également constaté que l'efficacité relative des NRP glows et des NRP sparks variait en fonction de la pression. Lorsque la pression utilisée était supérieure à 2 bars, les décharges NRP glows (avec un faible effet thermique) étaient plus efficaces que les décharges NRP sparks (avec un fort effet thermique) pour étendre la stabilité des flammes pauvres et les limites de décrochage des flammes swirlées de méthane-air

La combustion assistée par plasma NRP a également fait l'objet d'études numériques. Dans ce contexte, Barléon et al. [81] ont réalisé une étude numérique de la combustion assistée par plasma NRP pour une flamme de méthane-air, en développant un nouveau modèle phénoménologique étendu appelé PACMIND. Ce modèle a été conçu pour tenir en compte tous les effets cinétiques dominants ainsi que le chauffage rapide et lent du gaz. Il permet ainsi de reproduire de manière précise le processus d'allumage dans tous les cas testés dans cette étude, avec une erreur inférieure à 7 % sur le temps de retard d'allumage. De plus, le modèle PACMIND est en mesure de fournir une estimation précise de la production de NO, un critère important pour l'optimisation des systèmes de combustion assistée par plasma, tout en maintenant les émissions de NO<sub>x</sub> aussi basses que possible.

Il convient de souligner qu'il existe de nombreux autres articles portant sur la combustion assistée par plasma NRP mais dans cette section, seuls les articles les plus récents ont été mentionnés. Ces articles sélectionnés fournissent un aperçu significatif des avancées récentes et des résultats clés dans ce domaine de recherche. En outre, Deanna A. Lacoste [82] a récemment réalisé une revue complète des études portant sur la combustion assistée par plasma, couvrant diverses techniques telles que la combustion assistée par plasma NRP, micro-ondes et gliding arc. Les articles les plus pertinents et récents dans chacune de ces types du plasma ont

été cités dans cette revue pour offrir une vue d'ensemble complète des avancées dans le domaine de la combustion assistée par plasma.

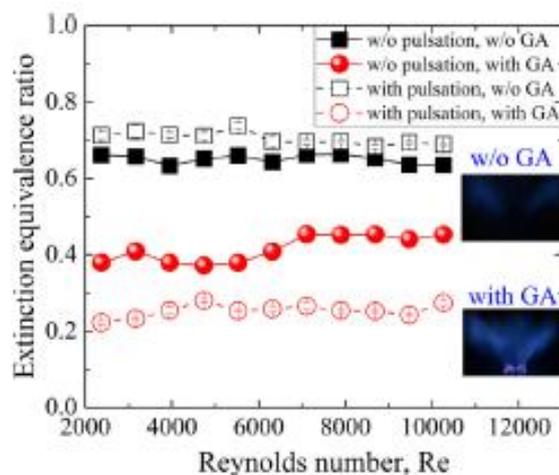
#### **I.4.2.2. Combustion assistée par plasma à arc glissant continu**

Le gliding arc (GA) est un système intermédiaire entre les décharges thermiques et non thermiques, capable de fournir simultanément une haute densité du plasma, une puissance et une pression de fonctionnement élevées, avec un fort degré de déséquilibre, une température électronique élevée, une faible température de gaz et la possibilité de stimuler des processus chimiques sélectifs sans extinction. Les principales particularités du GA sont l'effet mémoire et l'influence essentielle du transfert de chaleur et de masse convectif sur les propriétés du plasma et l'évolution de l'arc dans l'espace/temps. Le GA génère des régions du plasma à la fois thermiques et non thermiques dans des conditions de pression atmosphérique et de température ambiante [83]. Le plasma est faiblement ionisé et caractérisé par l'absence d'équilibre thermodynamique local, car l'énergie des électrons est nettement plus élevée que celle des espèces lourdes. Il a été signalé que les températures du gaz dans les régions de non-équilibre sont d'environ  $\sim 11600$  K (1 eV) pour les électrons, 2000-3000 K pour les vibrations et 800-2100 K pour les translations [84]. Pour cette raison, le plasma généré par la décharge à glissement est généralement classé comme non thermique [85]. L'intérêt général pour les décharges à glissement découle des propriétés chimiques inhabituelles et de la réactivité accrue des espèces activées lourdes (atomes, radicaux et molécules excitées) produites dans le plasma.

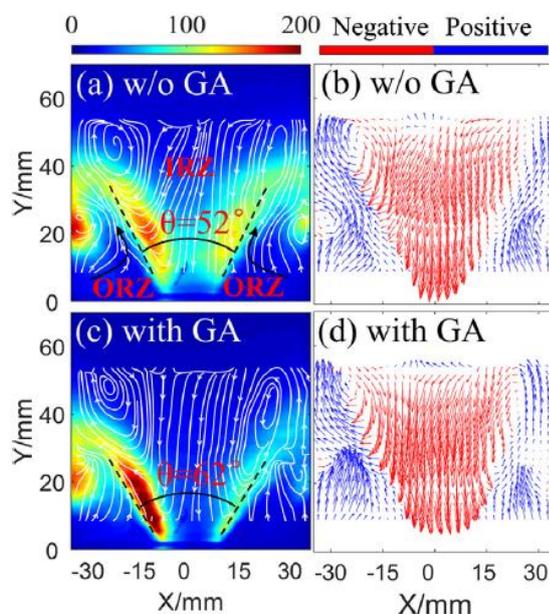
Le plasma à GA présente un intérêt particulier en raison de son potentiel pour améliorer l'efficacité et la stabilité de la combustion. Dans cette section, nous explorerons les études et recherches récentes sur l'application du glidarc dans différents contextes de combustion ainsi que ses effets sur les performances de combustion et les émissions polluantes. Plusieurs articles ont été publiés sur le sujet, démontrant l'efficacité et les avantages potentiels du glidarc dans diverses applications de combustion. Parmi ces articles, nous citerons notamment les travaux de Sun et al. [9] qui se sont intéressés aux effets clés des décharges à arc glissant sur les limites de stabilité des flammes swirlées de méthane/air perturbées de manière externe. Leur étude visait à comprendre l'influence des décharges à arc glissant sur la stabilité de ces flammes perturbées, en utilisant un système de pulsation du flux à basse fréquence pour simuler les conditions transitoires d'un brûleur réel. Pour visualiser les structures instantanées de la flamme et du flux, Sun et al. [9] ont utilisé une combinaison de fluorescence induite par laser planaire du OH (OH-PLIF) et de la vélocimétrie par imagerie de particules (PIV) synchronisées. Leurs résultats ont montré que l'ajout de décharges à arc glissant étend considérablement les limites de combustion instable (lean blowout) des flammes perturbées, avec une extension pouvant atteindre jusqu'à 60%, ce qui est plus prononcé que dans le cas des flammes non perturbées comme le montre la Figure I.28.

L'analyse des images OH-PLIF/PIV a révélé que cet effet de stabilisation peut être expliqué par l'expansion de la zone de recirculation interne (IRZ) de la flamme, avec un angle d'ouverture passant de  $52^\circ$  à  $62^\circ$  grâce à l'effet du plasma, comme le démontrent les vecteurs de vitesse dans la Figure I.29. L'augmentation de l'angle d'ouverture indique un élargissement de l'IRZ, qui est favorisé par l'amélioration de la combustion résultant des décharges à arc

glissant (GA). En raison de la vitesse réduite et du temps de résidence plus long des réactions chimiques dans l'IRZ, le mélange permet à la flamme de survivre à un rapport de mélange plus pauvre grâce à cette expansion de l'IRZ.



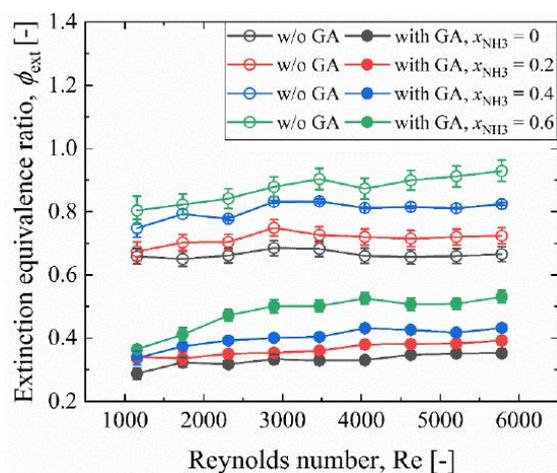
**Figure I.28.** Les limites de soufflage (LBO) des flammes prémélangées swirlées sans et avec pulsations de flux et avec ou sans allumage d'une décharge de type arc glissant [9].



**Figure I.29.** Images OH-PLIF/PIV moyennées dans le temps des flammes non perturbées sans (a, b) et avec (c, d) décharges à arc glissant [9].

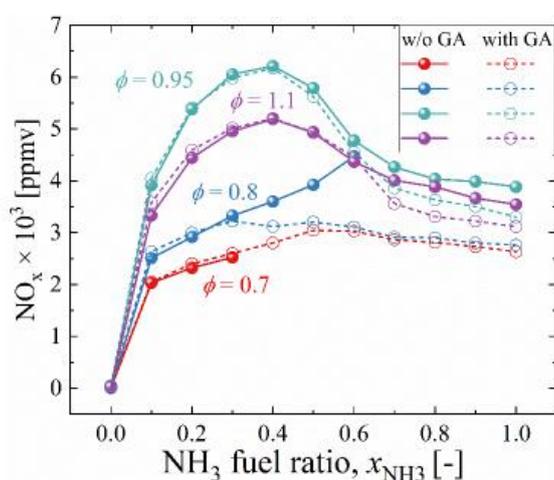
Sun et al. [86] ont également examiné de manière intensive la stabilisation et les caractéristiques d'émission de flammes prémélangées  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{air}$  assistées par des décharges à arc glissant. Leurs résultats mettent en évidence plusieurs aspects importants de cette configuration. Tout d'abord, ils ont constaté que la décharge à arc glissant permet d'étendre considérablement les limites de soufflage (LBO) jusqu'à 56% dans une large gamme de conditions opérationnelles, notamment les ratios de combustible  $\text{NH}_3$ , les richesses et les débits d'écoulement (Figure I.30).

Cette amélioration de la stabilité de la flamme peut être attribuée à plusieurs facteurs. D'une part, la décharge à arc glissant offre un allumage répétitif à haute fréquence, contribuant ainsi à maintenir la flamme active. D'autre part, les décharges à arc glissant favorisent la formation d'une zone de réaction riche en OH et élargissent la zone de recirculation interne de la flamme. Ces caractéristiques renforcent la stabilité globale de la flamme, même avec des mélanges plus pauvres en combustible.



**Figure I.30.** Limites de soufflage (LBO) des flammes  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{air}$  sans et avec les décharges à arc glissant [86].

En ce qui concerne les émissions de  $\text{NO}_x$ , Sun et al. [86] ont observé des effets complexes de la décharge à arc glissant sur ces émissions dans les flammes  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{air}$ . Pour des faibles teneurs en  $\text{NH}_3$  ( $x_{\text{NH}_3} < 0.6$ ), la présence de la décharge à arc glissant entraîne une légère augmentation des émissions de  $\text{NO}_x$  (Figure I.31), principalement en raison de l'activation de la voie thermique de formation de  $\text{NO}_x$ . En revanche, pour des teneurs en  $\text{NH}_3$  plus élevées ( $x_{\text{NH}_3} > 0.6$ ), l'application de la décharge à arc glissant permet de réduire les émissions de  $\text{NO}_x$  jusqu'à 30%.



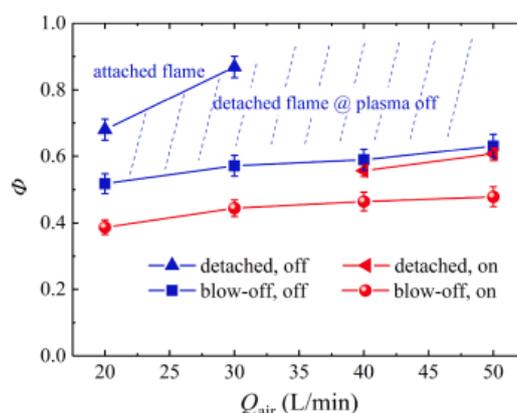
**Figure I.31.** Émissions de  $\text{NO}_x$  des flammes prémélangées swirlées sans et avec les décharges à arc glissant [86].

### I.4.2.3. Combustion assistée par plasma impulsif microseconde

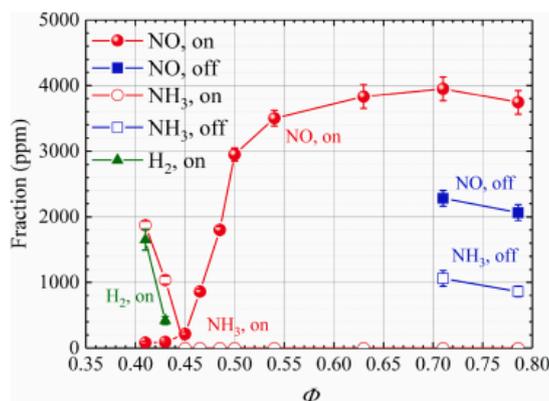
Le plasma à impulsion de microseconde est un type du plasma généré par des impulsions électriques de durée courte, typiquement de l'ordre de la microseconde. Les avantages et les comparaisons par rapport à d'autres types du plasma impulsif, ont été présentés dans la section 3.4 de ce chapitre.

À ce jour, il existe peu d'articles dans la littérature qui ont étudié spécifiquement l'effet du plasma impulsif microseconde sur la stabilité et les émissions polluantes de la combustion. Les seules références disponibles concernent le récent article de Tang et al. [87], qui a examiné les effets de ce type de plasma sur la combustion de l'ammoniac et de l'air. L'étude a mis en œuvre un actionneur intégrant un brûleur à swirl avec électrodes qui présente une structure en cavité qui génère une torche à plasma centrée sur l'axe, agissant comme un stabilisateur. La structure de la cavité contient une torche à plasma entraînée par des décharges impulsives microsecondes à faible puissance ( $\mu$ RPDs) dans la buse. Il a été trouvé qu'en absence du plasma, la flamme a tendance à se détacher aisément de la surface et à se stabiliser sous une forme conique inversée. Toutefois, l'introduction du plasma permet de stabiliser la flamme et d'étendre les limites du soufflage, passant d'environ 0.6 à 0.4~0.5 pour une plage de nombre de Reynolds se situant approximativement entre 3000 et 7500 comme le montre la Figure I.32.

Il a été également montré qu'avec l'activation des  $\mu$ RPD, la combustion de l'ammoniac est complète sur une large plage dans le régime pauvre (par exemple,  $\phi > 0.45$ ), comme illustré dans la Figure I.33. Cependant, sous des conditions ultra-pauvres (par exemple,  $\phi = 0.41-0.43$ ), les émissions de  $\text{NH}_3$  non brûlé dépassent 1000 ppm. Parallèlement, l'analyseur de gaz détecte des fractions d'hydrogène dans les gaz brûlés secs d'environ 1700 et 450 ppm à des richesses de 0.41 et 0.43, respectivement. Les émissions de  $\text{H}_2$  non brûlé suivent des tendances similaires à celles de  $\text{NH}_3$  non brûlé, et les deux approchent presque zéro à  $\phi = 0.45$ . Toutefois, lorsque le rapport d'équivalence augmente au-delà de 0.45 en présence du plasma, les émissions de NO augmentent de manière significative pour dépasser 3000 ppm à  $\phi > 0.5$ .



**Figure I.32.** La richesse de décrochage et soufflage dans les deux cas sans et avec plasma  $\mu$ RPD [87].



**Figure I.33.** Les émissions des flammes ammoniac/air sans et avec plasma ( $Q_{air} = 20$  L/min) [87].

Cui et al. [88] ont également travaillé sur ce sujet. Ils ont utilisé un plasma à décharge répétitive pour stabiliser une flamme swirlée prémélangée en régime pauvre soumise à des pulsations d'écoulement avec des amplitudes allant de 10 à 30% du débit total. Les pulsations d'écoulement d'une fréquence de 5 Hz ont été générées par un système de perturbation d'écoulement à haute amplitude pour simuler les conditions de surpression dans de vrais brûleurs. Les impulsions de décharge ont été réglées avec un délai ajustable par rapport aux pulsations d'écoulement. Lorsque les impulsions de décharge se produisent avant ou pendant la pulsation d'écoulement, le plasma étend la limite d'inflammabilité pauvre de la flamme. Le taux de dégagement de chaleur transitoire indique que la stabilisation de la flamme est due à un processus de rallumage par le plasma. Cependant, lorsque les décharges du plasma se produisent avec des retards spécifiques après la pulsation d'écoulement, le plasma déstabilise davantage la flamme, ce qui est attribué aux surfaces de flamme froissées et aux ondes de choc générées par l'actionnement aérodynamique du plasma. En augmentant la fréquence des décharges à 40 Hz, les limites d'allumage sont encore étendues de 0.63 à 0.45 en raison de l'augmentation de l'énergie moyenne d'allumage.

À ce jour, dans la littérature, seuls ces deux articles ont abordé la combustion assistée par plasma impulsif microseconde. Cependant, ces études n'ont pas examiné en détail l'effet des paramètres du plasma sur certaines caractéristiques de la flamme, telles que la longueur et la hauteur d'accrochage. De plus, l'application de la spectroscopie pour identifier les espèces émises par le plasma et leur évolution dans la flamme n'a pas été réalisée. De même, l'étude de l'évolution des émissions polluantes, en particulier les NO<sub>x</sub> et le CO, n'a pas été clairement approfondie pour différentes conditions expérimentales. Par conséquent, cette thèse vise à combler ces lacunes en examinant les effets des paramètres du plasma sur les caractéristiques de la flamme, en utilisant la spectroscopie pour identifier les espèces présentes dans le plasma et dans la flamme, ainsi qu'en étudiant en détail l'évolution des émissions polluantes dans des conditions variées. Cette étude vise ainsi à apporter une contribution significative à la compréhension globale de la combustion assistée par plasma impulsif microseconde et de son impact sur les performances de combustion et les émissions polluantes.

### I.5. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé des notions générales sur la combustion des flammes swirlées et non-prémélangées, ainsi que les mécanismes de formation de composés polluants tels que les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), le monoxyde de carbone (CO) et les suies. Nous avons également étudié l'influence de l'ajout de dioxyde de carbone dans le combustible, en examinant les effets de la dilution, de la thermique et de la chimie.

Ensuite, nous avons exploré les principes fondamentaux des plasmas, en mettant l'accent sur leur classification en plasmas thermiques et non thermiques, ainsi que les différents régimes du plasma tels que la décharge de couronne, la décharge luminescente et la décharge d'arc. Nous avons également présenté les caractéristiques des plasmas impulsionsnelles microsecondes et examiné diverses applications de ces plasmas.

Enfin, nous avons étudié la combustion assistée par plasma en détaillant les principaux effets de l'assistance à la combustion par plasma, tels que l'effet thermique, cinétique et de transport. Nous avons ensuite procédé à une revue de la littérature sur la combustion assistée par plasma en nous concentrant sur les types de plasma utilisés, notamment la combustion assistée par plasma impulsionsnel nanoseconde, à arc glissant continue et à impulsionsnel microseconde.

Cet état de l'art est réalisé dans le but de mettre en évidence le besoin toujours avéré de travaux de recherches combinant l'étude du comportement des flammes du biogaz avec les effets du plasma sur la combustion. Après avoir abordé ces différents aspects, nous allons maintenant nous concentrer sur l'approche expérimentale. Le chapitre suivant présente les différents outils expérimentaux utilisés et mis en œuvre pour mener à bien cette étude.

---

## Chapitre II. Dispositif expérimental et techniques de mesure

---

II.1.	Introduction:.....	72
II.2.	Dispositif expérimental .....	72
II.2.1.	Chambre de combustion.....	72
II.2.2.	Brûleur coaxial à swirl .....	73
II.2.2.1.	Brûleur à injection radiale.....	74
II.2.2.2.	Brûleur à injection axiale.....	76
II.2.3.	Configuration des électrodes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.2.3.1.	Les générateurs de haute tension.....	77
II.2.3.2.	Les configurations des électrodes .....	78
II.2.3.2.a.	Arc glissant.....	79
II.2.3.2.b.	Pointe-Tige-Pointe.....	79
II.2.3.2.c.	Tige-Anneau .....	80
II.3.	Techniques de mesure .....	81
II.3.1.	Technique de chimiluminescence sur OH*.....	81
II.3.1.1.	Principe.....	81
II.3.1.2.	Montage expérimental .....	82
II.3.2.	Analyse des gaz brûlés et mesure de températures.....	84
II.3.3.	Tension de décharge .....	86
II.3.4.	Spectroscopie d'émission optique .....	87
II.3.4.1.	Ocean FX-XR1-ES.....	88
II.3.4.2.	Acton Research Corporation SP2750i.....	89
II.3.5.	Vélocimétrie par images de particules (PIV) .....	89
II.3.5.1.	Principe de la PIV 2D.....	89
II.3.5.2.	Dispositif expérimental.....	90
II.3.5.2.a.	Système d'ensemencement .....	90
II.3.5.2.b.	Plan lumineux.....	92
II.3.5.2.c.	Calibration, acquisition des images et calculs des vitesses.....	92
II.4.	Paramètres opératoires .....	93
II.5.	Conclusion .....	96

**II.1. Introduction:**

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés à la combustion non-prémélangée de biogaz assistée par plasma, en utilisant deux types de brûleurs coaxiaux swirlés, un à injection radiale et un à injection axiale autour d'une tige centrale, confinés dans une chambre de combustion. Le but de cette étude est de caractériser les effets de l'ajout d'une décharge plasma sur la combustion du biogaz et d'analyser les résultats en utilisant différentes techniques de mesure, telles que la chimiluminescence du radical OH\*, les analyses des produits de combustion, les spectroscopies d'émissions optiques et la Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) rapide.

Ce chapitre présente le dispositif expérimental utilisé dans cette étude, ainsi que les techniques de mesure appliquées pour caractériser la combustion assistée par plasma. Nous décrirons en détail les brûleurs coaxiaux swirlés, la chambre de combustion, les générateurs du plasma et les électrodes utilisées pour produire le plasma, ainsi que les différentes techniques de mesure employées pour l'étude expérimentale. Nous présenterons également la planification et la méthodologie des expériences menées pour cette étude, y compris la sélection des paramètres de mesure et la préparation de l'installation expérimentale.

**II.2. Dispositif expérimental****II.2.1. Chambre de combustion**

La Figure II.1 présente une photo de la chambre de combustion utilisée durant les travaux de thèse. La chambre est dimensionnée pour fonctionner jusqu'à une puissance maximale de 25 kW. L'intérieur de la chambre est revêtu d'une laine céramique réfractaire souple, caractérisée par une faible conductivité thermique d'environ 0.08 W/(m.K) à 300 °C. Ce matériau réfractaire permet une bonne isolation entre la chaleur générée par la flamme à l'intérieur de la chambre et l'environnement extérieur, tout en protégeant les parois internes de la chambre contre tout contact direct avec les produits de combustion, sans aucun risque de toxicité. Les parois extérieures de la chambre de combustion sont refroidies par circulation d'eau maintenue à la température ambiante et fonctionnant en circuit ouvert. Cette eau circule à travers des tubes en acier inoxydable qui sont en contact direct avec les parois externes de la chambre. Pour garantir une répartition uniforme du refroidissement, le débit principal d'eau est séparé en 8 sous-débites à l'aide d'un collecteur qui est équipé de vannes d'équilibrage.

La Figure II.2 illustre une représentation schématique de la chambre de combustion. Cette chambre comporte 23 fenêtres d'accès optiques pour visualiser l'écoulement des fluides (combustible et air) et la flamme sur toute la hauteur. La répartition des fenêtres sur toutes les faces de la chambre permet d'observer la flamme à différentes hauteurs, offrant ainsi une vue globale de la combustion sous différentes conditions. La chambre est complètement démontable, permettant ainsi d'accéder à l'intérieur pour un besoin de nettoyage ou pour le montage des diagnostics optiques pour les expériences. Elle est équipée de capteurs de températures à la fois à l'intérieur et au niveau des parois sur toute la hauteur du confinement.



Figure II.1. Photographie de la chambre de combustion.

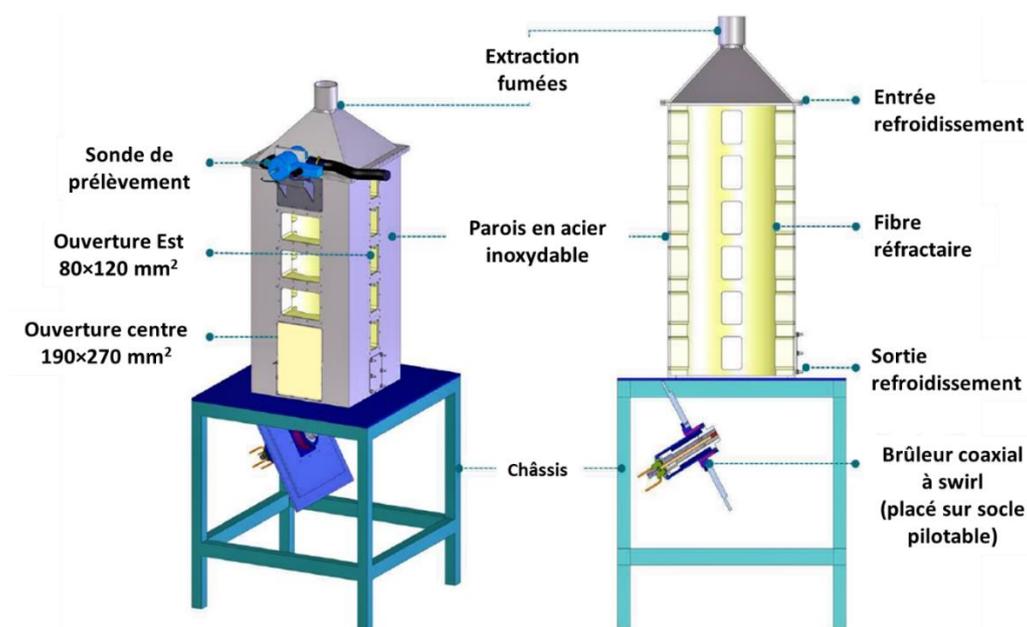


Figure II.2. Représentation schématique de la chambre de combustion.

### II.2.2. Brûleur coaxial à swirl

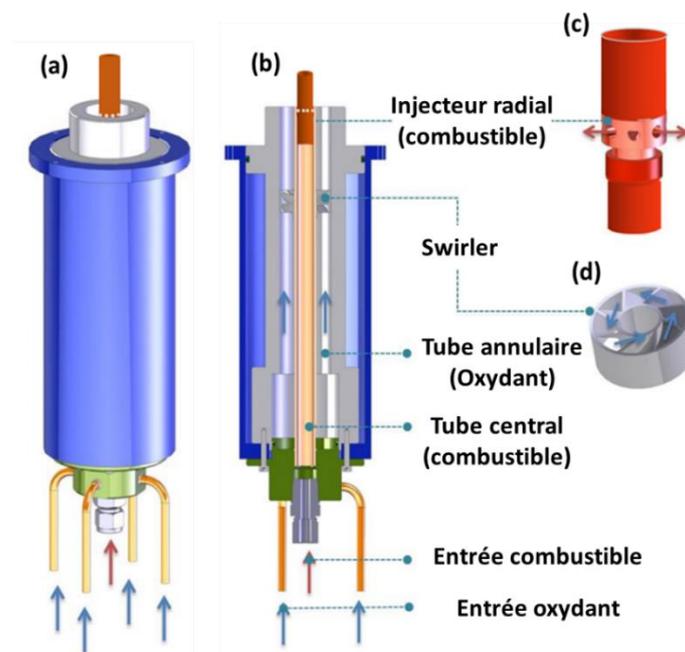
Dans cette section, nous détaillons les deux types de brûleurs coaxiaux à swirl que nous avons utilisé dans notre dispositif expérimental pour étudier la combustion. Bien que les deux brûleurs partagent le même concept de base en générant un mouvement tourbillonnaire dans le

mélange air-combustible, ils diffèrent dans leur mode d'injection, ce qui a des implications importantes sur la dynamique de l'écoulement et le comportement de la flamme.

### II.2.2.1. Brûleur à injection radiale

Les expériences du chapitre III ont été réalisées avec un brûleur coaxial à swirl avec injecteur radial (Figure II.3). Le brûleur est positionné au bas de la chambre de combustion, comme illustré dans la Figure II.2, permettant ainsi à la flamme de s'étendre verticalement dans le volume de confinement défini par la chambre. La Figure II.3 présente une vue schématique et des détails du brûleur à injection radiale utilisé.

Le brûleur est composé de deux tubes coaxiaux : le tube annulaire (de diamètre 38 mm), qui contient un swirler permettant d'induire un mouvement hélicoïdal dans le flux de comburant, et le tube central (de diamètre extérieur 15 mm et de diamètre intérieur 12 mm), qui achemine le combustible ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ ) vers l'injecteur. L'injecteur utilisé à une hauteur totale de 60 mm et est placé à l'extrémité du tube central qui est utilisé comme cathode pour le plasma (Figure II.3.b). Cet injecteur (Figure II.3.c) est équipé de 8 orifices d'injection de diamètre de 3 mm, placés à 20 mm de l'extrémité de l'injecteur, et uniformément répartis pour permettre une injection radiale à proximité de la sortie du brûleur.



**Figure II.3.** Représentation schématique du brûleur à injection radiale, de ses composantes et circulation des réactifs : (a) vue en perspective ; (b) vue en coupe ; (c) vue en perspective de l'injecteur radial ; (d) vue en perspective du swirler.

Les différents swirlers utilisés dans cette étude sont fabriqués en chrome-cobalt et ont été conçus à l'aide de la technique d'impression 3D par fusion laser sur métal directe (Direct Metal Laser Sintering - DMLS). Ils ont été placés dans le tube coaxial d'air et fixés à une distance de -55 mm de la sortie du brûleur. Chacun de ces swirlers comporte 8 pales dont l'orientation

dépend du nombre de swirl  $S_n$  requis (Figure II.4). Le nombre de swirl est défini comme le rapport de deux quantités intégrales : l'intégrale du flux de moment axial et l'intégrale du flux de moment angulaire [89]. Il est souvent utilisé pour caractériser l'intensité du mouvement de rotation. L'intensité de rotation augmente avec l'augmentation du nombre de swirl, qui peut être exprimé comme suit :

$$S_n = \frac{G_\theta}{G_z R} \quad (\text{II.1})$$

Où  $R$  est le rayon,  $G_\theta$  et  $G_z$  représentent respectivement le flux de moment angulaire et le flux de moment axial, qui peuvent être écrits comme suit :

$$G_z = \int_0^R [\rho V_z^2 + (P - P_\infty)] r dr \quad (\text{II.2})$$

$$G_\theta = \int_0^R \rho V_z V_\theta r^2 dr \quad (\text{II.3})$$

(Où  $V_r$ ,  $V_z$ ,  $V_\theta$  et  $P$ ) sont les composantes du vecteur de vitesse dans les coordonnées cylindriques ( $r$ ,  $z$ ,  $\theta$ ) et la pression statique,  $P_\infty$ , est la pression statique constante de l'environnement ambiant au repos, loin du jet. La densité  $\rho$  de l'air peut être considérée comme constante tant que les variations de pression du brûleur sont minimales.

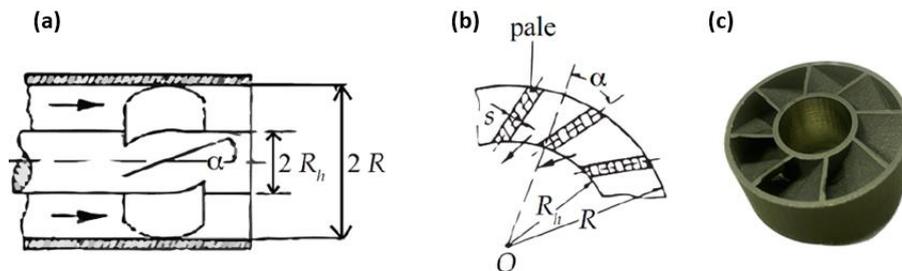
Le nombre de swirl géométrique ( $S_n$ ) pour la configuration utilisée ( Figure II.4) dans nos travaux peut être exprimé comme suit [90]:

$$S_n = \frac{1}{1-\psi} \left(\frac{1}{2}\right) \frac{1-(R_h/R)^4}{1-(R_h/R)^2} \tan \alpha_0 \quad (\text{II.4})$$

Où  $\alpha_0$  l'angle de la pale sur le bord externe du swirler,  $\psi$  est le facteur de blocage et  $R$  et  $R_h$  sont respectivement les rayons externes du tube annulaire et du tube central. Le facteur de blocage est lié à l'épaisseur de la pale comme suit :

$$\psi = \frac{zs}{2\pi R_h \cos(\alpha_0)} \quad (\text{II.5})$$

Où  $s$  est l'épaisseur de la pale et  $z$  est le nombre de pales, comme illustré dans la Figure II.4. Le Tableau II.1 présente les dimensions des swirlers utilisés au cours de cette thèse.



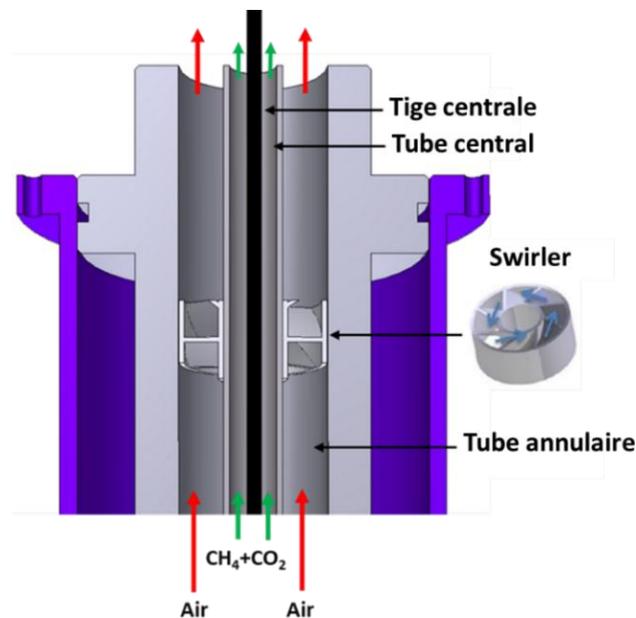
**Figure II.4.** Paramètres géométriques du swirler [89] : (a) coupe longitudinale et (b) coupe transversale, (c) représentation tridimensionnelle du swirler.

**Tableau II.1.** Dimensions des swirlers utilisés dans cette étude.

	R (mm)	Rh (mm)	$\alpha_0$ (°)
Sn=0.5	17.6	8.8	34
Sn=0.8			47
Sn=1.1			55
Sn=1.4			60

### II.2.2.2. Brûleur à injection axiale

Le deuxième type de brûleur coaxial à swirl que nous avons utilisé est le brûleur à injection axiale, présenté dans la Figure II.5.



**Figure II.5.** Représentation schématique du brûleur à injection axiale.

Ce brûleur partage le même concept de base que le brûleur à injection radiale. Cependant, la principale différence réside dans le mode d'injection du combustible. Tout comme le brûleur à injection radiale, le brûleur à injection axiale est composé de deux tubes coaxiaux : le tube annulaire, qui contient le swirler permettant la rotation du comburant, et le tube central qui achemine le combustible ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ ). Cependant, à la place de l'injecteur utilisé dans le brûleur à injection radiale, le brûleur à injection axiale utilise une tige métallique centrale. Ce brûleur offre deux options pour la configuration de la tige centrale :

- Tige centrale fixe longue (Chapitre IV, section V.3) : Fixe dans le brûleur, de 8 mm de diamètre, s'étendant sur une longueur de 50 mm à partir de la sortie du brûleur.

- Tige centrale amovible courte (chapitre IV, section V.4) : de différents diamètres et dépassant de 20 mm au-dessus de la sortie du brûleur. Cette tige métallique centrale peut être facilement remplacée par une autre de diamètre différent pour ajuster la vitesse d'injection.

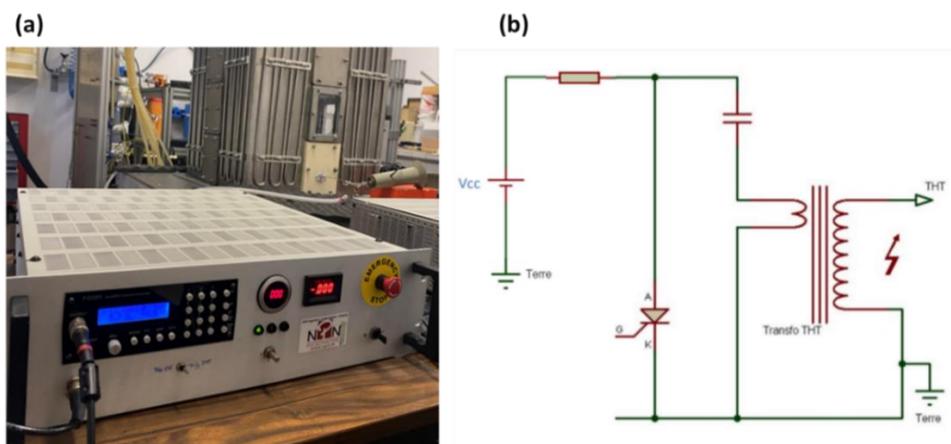
La tige métallique centrale, quelle que soit sa configuration, sert également de cathode aussi pour la décharge et ainsi créer le plasma, tandis que les électrodes externes portées à la haute tension positive sont disposées autour de cette tige. C'est le champ électrique imposé entre ces deux électrodes (externes et tige centrale) qui ionise le gaz et donc le plasma. Plus de détails sur la façon dont le plasma est couplé avec le brûleur, seront donnés dans la section suivante II.2.3. Le brûleur à injection axiale nous offre une flexibilité supplémentaire pour explorer différentes conditions de combustion et ajuster le rapport air-combustible selon nos objectifs de recherche.

### II.2.3. Configuration des électrodes

Dans cette section, nous abordons la configuration des électrodes utilisée dans nos expériences de combustion. Nous explorerons les différentes configurations d'électrodes utilisées pour générer le plasma et comment elles sont associées à notre système de combustion. En outre, nous présenterons les générateurs de haute tension qui permettent de créer les décharges électriques nécessaires pour allumer et entretenir le plasma.

#### II.2.3.1. Les générateurs de haute tension

La génération d'un plasma de laboratoire est le plus souvent réalisée par décharges électriques et nécessite donc un générateur à haute tension dans le cas d'un plasma à la pression. Dans notre cas, il s'agira d'un générateur délivrant des impulsions microsecondes. Les amplitudes de tension sont de quelques kilovolts, ce qui est nécessaire pour générer le plasma à la pression atmosphérique. Pour nos expériences, nous avons mis en place deux générateurs de haute tension synchronisés, un pour chaque électrode disposée de façon symétrique autour de la tige centrale. La Figure II.6 présente une photographie du générateur électrique utilisé dans nos travaux, ainsi que son schéma électrique.



**Figure II.6.** (a) Photographie d'un générateur électrique et (b) schéma électrique du générateur électrique.

Ces générateurs impulsionnels microseconde, fabriqués dans le laboratoire GREMI (Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés) à Orléans, sont des générateurs uniques qui sont caractérisés par leur capacité à produire des impulsions de courte durée (2  $\mu$ s) et leur flexibilité en termes de fréquence, pouvant varier de 1 à 30 kHz. De plus, leur tension primaire peut être réglée sur une plage allant de 0 à 350 VDC, conduisant à une tension délivrée en sortie variant de 0 à 30 kV. Les générateurs délivrent une énergie par impulsion qui est fonction de la tension de fonctionnement et le contrôle de la fréquence de répétition des impulsions permet de contrôler la puissance électrique fournie au plasma.

Le circuit électrique utilisé pour générer les hautes tensions est illustré par la Figure II.6. Ce schéma de connexion présente les composants essentiels du générateur électrique, dont le condensateur, le transformateur, les bobines primaire et secondaire, ainsi que l'interrupteur. Notre générateur électrique fonctionne en suivant un processus en plusieurs étapes pour atteindre des tensions élevées de plusieurs kilovolts (kV) comme suit :

- Charge du condensateur : Au départ, l'interrupteur est ouvert, ce qui permet à l'alimentation de charger le condensateur à travers le primaire du transformateur.
- Décharge du condensateur : L'interrupteur se ferme, créant un court-circuit dans l'alimentation. Cela provoque la décharge du condensateur dans la bobine primaire, entraînant une oscillation dans un circuit LC série.
- Transfert d'énergie dans la bobine secondaire : Le champ magnétique généré par la bobine primaire induit un champ dans la bobine secondaire. En raison du nombre beaucoup plus grand de spires dans la bobine secondaire, la tension est amplifiée (rapport de transformation).
- Formation de l'arc électrique : À chaque commutation du condensateur primaire, la tension au niveau du secondaire augmente et dépasse la tension de claquage de l'air, ce qui conduit à la formation d'un arc électrique et ferme le circuit secondaire.
- Ouverture de l'interrupteur : L'interrupteur s'ouvre à nouveau, permettant de recharger le condensateur primaire.

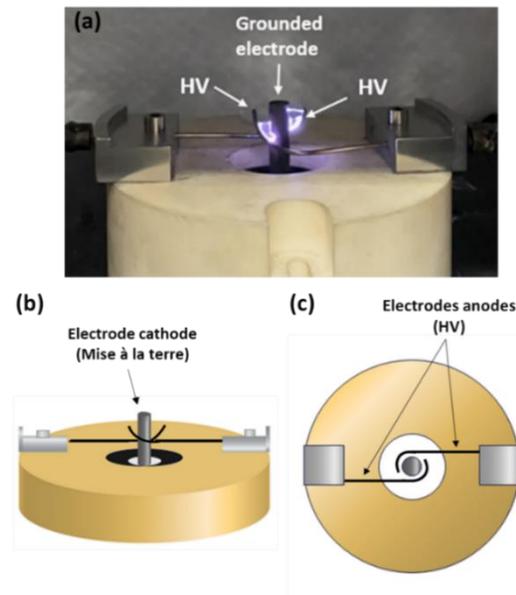
Le processus se répète de manière cyclique, générant ainsi des tensions élevées à chaque itération. Grâce à ces étapes, notre générateur électrique est capable de produire les tensions nécessaires pour nos expériences.

### II.2.3.2. Les configurations des électrodes

Dans notre étude, nous avons exploré trois configurations du plasma distinctes pour analyser leur comportement au sein de notre système expérimental. Ces configurations, nommées "Arc glissant", "Pointe-Tige-Pointe" et "Tige-Anneau", impliquaient différentes dispositions des électrodes utilisées pour générer le plasma. Plus précisément, l'Arc glissant a été étudié avec les deux versions de brûleur (à injection axiale et radiale), la configuration Pointe-Tige-Pointe avec le brûleur à injection axiale, et enfin, la Tige-Anneau avec le brûleur à injection radiale.

### II.2.3.2.a. Arc glissant

La configuration arc glissant (Glidarc), illustrée dans la Figure II.7, est créée entre une tige centrale reliée à la masse (cathode) qui correspond à l'injecteur dans le cas d'un brûleur à injection radiale, et une tige centrale amovible courte ou fixe longue dans le cas d'un brûleur à injection axiale. Deux électrodes supplémentaires en tungstène (anodes) sont disposées de manière symétrique autour de la tige centrale, afin de créer deux zones du plasma.



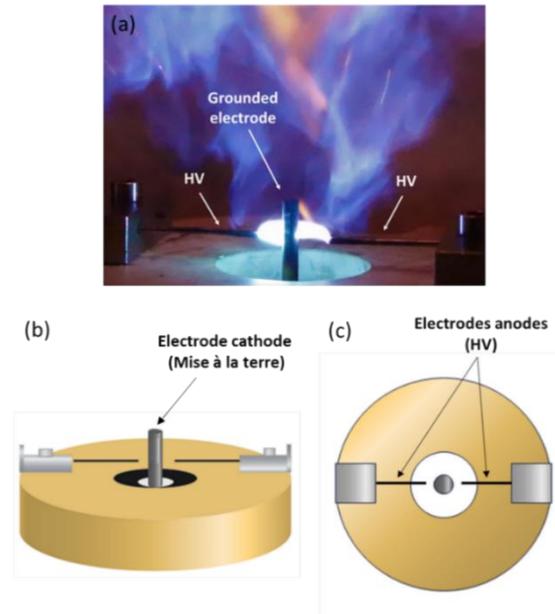
**Figure II.7.** (a) Photographie de l'arc glissant en fonctionnement à la sortie de brûleur ( $Q_{air}=100$  NL/min, amplitude de la tension de 10.5 kV et une fréquence de répétition d'impulsion de 10 kHz) avec l'illustration des vues de (b) face et (c) de dessus de la configuration arc glissant.

Dans chaque zone, le plasma s'initie dans la distance la plus étroite entre les deux électrodes divergentes (électrode haute tension et tige centrale), avec un écartement initial de 2 à 3 mm, puis il s'étend plus haut avec l'écoulement du gaz et finit par s'éteindre. La configuration arc glissant (dont le nom provient du mouvement de l'arc depuis sa zone de création vers une région où l'écartement des électrodes est plus grand) présente plusieurs avantages pour notre étude de la combustion assistée par plasma. L'un de ces avantages est que le plasma peut influencer un volume important de la base de la flamme au cours de son déplacement par rapport à une configuration où la décharge serait établie à une position fixe entre deux électrodes. En effet, le plasma s'initie depuis la distance la plus courte entre la tige centrale du brûleur et l'électrode haute tension, puis il se déplace (« glisse ») le long de l'électrode portée à la haute tension. Cette capacité à couvrir un volume plus étendu permet une interaction plus étendue entre le plasma et le gaz injecté.

### II.2.3.2.b. Pointe-Tige-Pointe

La configuration pointe-tige-pointe est la seconde configuration des électrodes utilisée dans notre dispositif expérimental. Dans cette configuration, le plasma s'initie dans deux zones

distinctes, de chaque côté de la tige centrale reliée à la masse (cathode) comme illustré par la Figure II.8. Contrairement à la configuration précédente avec les électrodes circulaires, cette fois-ci, nous utilisons deux électrodes en tungstène avec des pointes à leurs extrémités pour initier le plasma.



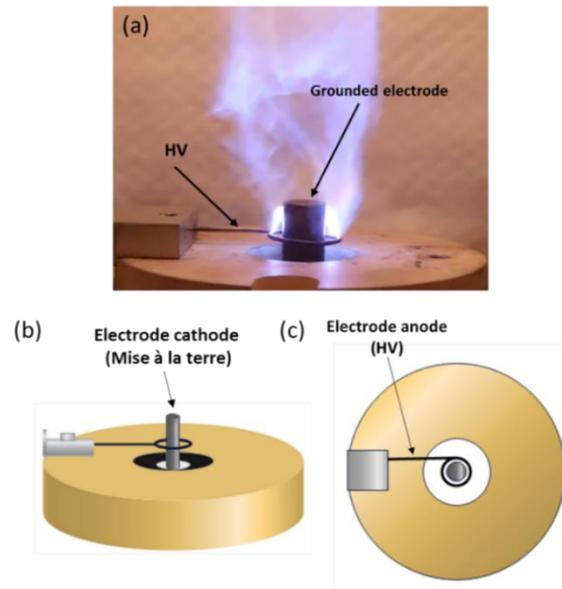
**Figure II.8.** (a) Photographie du plasma en fonctionnement (IEV=10.5 kV et PRF= 6 kHz) avec flamme de 80% CH<sub>4</sub>-20% CO<sub>2</sub>/air (Q<sub>air</sub>= 100 NL/min, Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>= 8,5 NL/min, Q<sub>CO<sub>2</sub></sub>=2 NL/min, Φ=0.8 et Sn=0.8) à la sortie de brûleur avec les illustrations des vues de (b) face et (c) de dessus de la configuration Pointe-Tige-Pointe.

Cette configuration offre l'avantage d'être relativement simple à mettre en place et à coupler avec le brûleur. Bien que cette configuration ne couvre pas un volume aussi étendu que l'arc glissant, elle offre néanmoins des possibilités intéressantes pour étudier l'interaction entre le plasma et la combustion liées à sa simplicité d'intégration avec le brûleur, ainsi que pour avoir un certain contrôle sur le processus de combustion. Il est important de noter que la configuration Pointe-Tige peut être sensible aux variations de la distance entre la pointe et l'électrode cylindrique, ainsi qu'à la tension appliquée. Ces paramètres ont une influence significative sur la densité, la température et la stabilité du plasma formé. Dans le cadre de nos expériences et des conditions du plasma étudiées, la distance entre la pointe (anode) et la tige (cathode) a été fixée à 7 mm. Cette distance a été déterminée suite à des tests approfondis visant à obtenir des conditions optimales pour notre étude. En maintenant une distance constante de 7 mm, nous sommes en mesure d'obtenir des résultats reproductibles et de bien contrôler le comportement du plasma.

### II.2.3.2.c. Tige-Anneau

La configuration Tige-Anneau est le troisième système plasma utilisé dans notre dispositif expérimental. Dans cette configuration, une électrode sous la forme d'une bague d'un diamètre de 12 mm, alimentée en haute tension (HV), est reliée à l'alimentation électrique, entourant ainsi la tige de l'injecteur du brûleur. Contrairement aux configurations arc glissant et Pointe-Tige-Pointe, où chacune des deux électrodes est reliée à un générateur électrique

utilisé pour générer le plasma, la configuration Tige-Anneau n'utilise qu'un seul générateur électrique. Lorsque la tension est appliquée à l'électrode annulaire, l'arc électrique se forme autour de la tige centrale du brûleur et glisse le long de celle-ci.



**Figure II.9.** (a) Photographie du plasma en fonctionnement (IEV=14 kV et PRF= 10 kHz) avec flamme méthane/air ( $Q_{\text{air}}= 80 \text{ NL/min}$ ,  $Q_{\text{CH}_4}= 8.5 \text{ NL/min}$ ,  $\Phi=1$  et  $Sn=0.5$ ) à la sortie de brûleur avec les illustrations des vues de (b) face et (c) de dessus de la configuration Tige-Anneau.

### II.3. Techniques de mesure

#### II.3.1. Technique de chimiluminescence sur OH\*

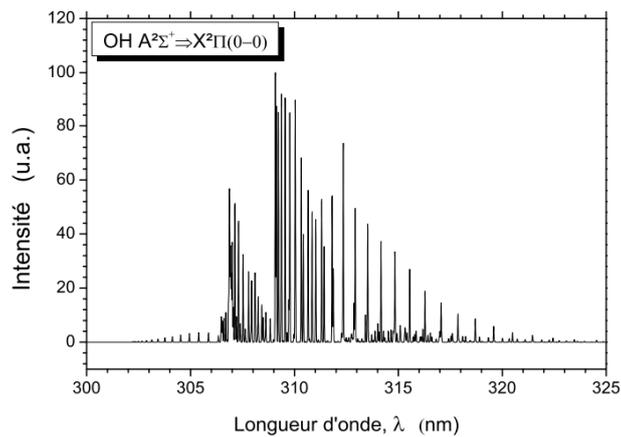
##### II.3.1.1. Principe

Les mécanismes réactionnels impliqués dans les processus de combustion sont particulièrement complexes, mettant en jeu un grand nombre de réactions élémentaires qui génèrent des radicaux libres, des atomes ou des molécules dans des états fondamentaux ou excités. Dans les zones de combustion vive, certaines réactions produisent des radicaux dans des niveaux d'énergie excités, qui se relaxent spontanément en émettant un photon à une longueur d'onde caractéristique lorsqu'ils reviennent à un niveau énergétique inférieur. Ce phénomène est connu sous le nom de chimiluminescence.

Pour une espèce donnée, l'intensité de l'émission lumineuse est proportionnelle à la concentration de cette espèce dans son état excité. Les spectres moléculaires émis par ces radicaux, lors de la chimiluminescence, sont appelés spectres de bande et sont constitués de nombreuses transitions optiques associées à différents niveaux de vibration et de rotation (voir Figure II.10). Chaque espèce possède son propre spectre d'émission, ce qui permet de les identifier et de les distinguer.

Dans les flammes d'hydrocarbures, les espèces  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$ ,  $\text{OH}^*$  ont montré les meilleurs rendements de chimiluminescence [91]. Cependant, dans certaines conditions de combustion,

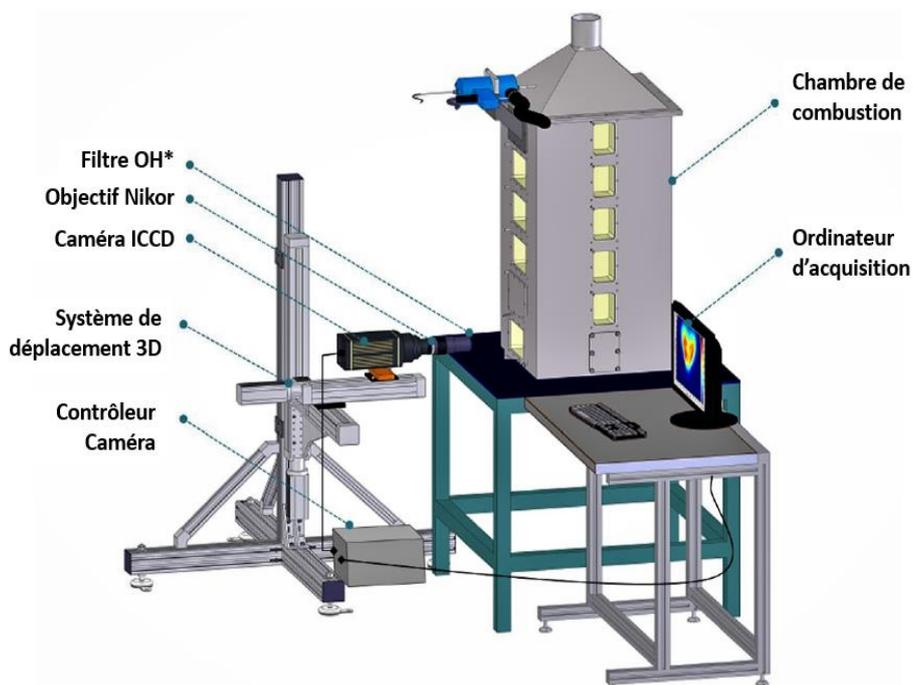
le signal de chimiluminescence provenant du  $\text{CO}_2^*$  peut également être significatif [92]. La formation de ces espèces excitées implique souvent de nombreuses réactions majeures [93], [94], néanmoins, les processus prépondérants les plus fréquemment mentionnés pour ces quatre espèces sont :



**Figure II.10.** Analyse spectrale de l'émission du radical  $\text{OH}^*$  pour la transition  $\text{A}^2\Sigma \rightarrow \text{X}^2\Pi$  ( $v'=0 ; v''=0$ ) à l'aide du logiciel LIFBASE [95].

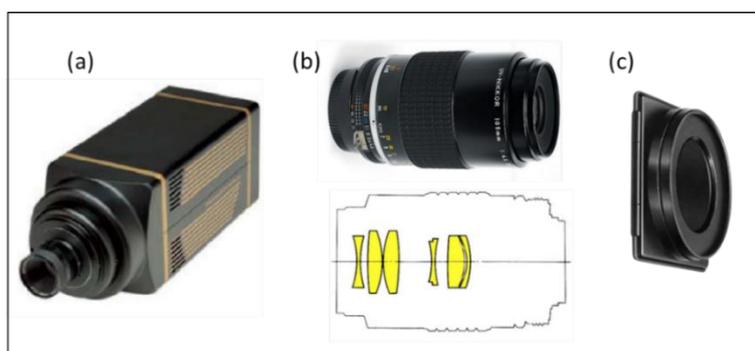
### II.3.1.2. Montage expérimental

Dans le cadre de notre étude, nous avons employé la visualisation de la chimiluminescence du radical  $\text{OH}^*$  pour étudier la position spatiale de la flamme en déterminant les hauteurs d'accrochage et les longueurs de flamme. Cette approche nous permet de délimiter le contour de la flamme en repérant un seuil de niveau d'intensité qui permet de distinguer clairement le signal de chimiluminescence du bruit de fond. Pour obtenir les hauteurs d'accrochage et de fin de flamme, nous avons choisi un seuil de niveau d'intensité en se basant sur le point d'inflexion du signal de chimiluminescence déterminé à chaque position axiale sur l'image. Cela a abouti à une image binaire où les zones représentant la flamme sont indiquées en blanc, tandis que le bruit de fond est en noir. À partir de cette image binaire, les hauteurs d'accrochage ont été définies en analysant la position verticale d'apparition des zones blanches. La longueur de ces zones blanches a été obtenue en définissant l'extrémité de la position verticale blanche et en la comparant à la hauteur d'accrochage, cela a permis de définir la longueur totale de la flamme. La Figure II.11 illustre la configuration du montage de chimiluminescence intégré dans notre dispositif expérimental.



**Figure II.11.** Technique de visualisation de la chimiluminescence installée autour du système de combustion.

Pour observer la zone de réaction par chimiluminescence, nous avons mis en place un système d'imagerie qui repose sur une caméra ICCD (Intensified Charge-Coupled Device) de Princeton Instruments, modèle PI-MAX 2, possédant une résolution de  $1024 \times 1024$  pixels<sup>2</sup> sur 16 bits. Cette caméra a été spécialement choisie pour sa capacité à collecter les rayonnements visibles et ultraviolets, ce qui est essentiel pour capturer les émissions lumineuses des espèces chimiques excitées pendant la combustion. Le processus de la capture d'images commence par une photocathode qui convertit les photons incidents en électrons. Ces électrons sont ensuite amplifiés par un intensificateur GenII, connu pour offrir de bonnes performances en termes de rapidité et de sensibilité. Une fois amplifié, le signal est transformé en photons à nouveau par un écran phosphore. Enfin, ces photons transformés en électrons par le capteur CCD refroidi par effet Peltier à une température de  $-16$  °C. Pour capturer les émissions lumineuses lors de la chimiluminescence, nous avons utilisé un objectif spécifique, le Nikon 105 mm F/4.5 UV Nikkor (voir Figure II.12).



**Figure II.12.** (a) Caméra PI-MAX2, (b) Objectif Nikon 105 mm F/4.5 UV Nikkor, (c) filtre interférentiel UG11.

Cet objectif est constitué de six éléments optiques de qualité UV, dont les trois premiers sont en silice fondue (quartz), tandis que les autres sont en fluorure de calcium synthétique (CaF<sub>2</sub>). Pour isoler spécifiquement les émissions du radical OH\*, nous avons ajouté un filtre interférentiel UG11. Ce filtre, avec une longueur d'onde centrale de 325 nm et une largeur à mi-hauteur de 110 nm, a été sélectionné pour correspondre à l'émission caractéristique du radical OH\*.

La capture des images a été réalisée à l'aide du logiciel WinView32, qui permet l'enregistrement et la visualisation des données. Ce logiciel offre un contrôle précis du gain, de la durée de la porte d'intensification de la caméra, assurant ainsi un rapport signal sur bruit optimal et évitant toute saturation de la caméra. Le temps d'intégration typique était de 15 ms, garantissant l'obtention d'images claires et détaillées dans les deux cas avec et sans plasma de notre étude. Le champ de mesure est de 112x112 mm<sup>2</sup> avec une résolution spatiale de 8.66 pixels/mm. Le traitement des images a été effectué à l'aide d'un programme MATLAB spécialement adapté aux types et aux tailles d'images obtenues. Ce code, initialement développé par l'Université de Princeton, a été ensuite adapté par l'équipe pour fonctionner sur nos images OH\*. Il a été spécialement conçu pour détecter les contours de la flamme, ce qui nous a permis d'extraire les hauteurs d'accrochage, les longueurs de flamme et les écarts-types correspondants. Le tableau ci-dessous présente les différentes sources d'incertitudes liées aux mesures des hauteurs d'accrochage et des longueurs de flamme. Pour obtenir une évaluation de l'incertitude totale, qui reflète la précision globale de nos mesures, nous avons utilisé la méthode de la somme quadratique des incertitudes relatives.

**Tableau II.2.** Évaluation des incertitudes des mesures de hauteur d'accrochage et de longueur de flamme.

Sources des incertitudes	Estimation
Facteur de conversion mm/pixel	± 0.8 %
Valeur de seuil	± 3.5 %
Position du brûleur	± 1 %
Incertitude totale	± 3.6 %

### II.3.2. Analyse des gaz brûlés et mesure de températures

L'analyse des gaz brûlés revêt une importance capitale dans notre contexte d'étude expérimentale des flammes. Cette analyse nous permet de caractériser en détail la composition des fumées émises lors du processus de combustion, et notamment d'évaluer les taux d'émissions polluantes telles que le CO et les NO<sub>x</sub>.

Ce système comprend une sonde de prélèvement de type PSP4000-HCT, qui est chauffée à une température de 483K. La sonde est positionnée en haut de la chambre de combustion à une distance de 1.2 m de la sortie du brûleur comme montrée dans la Figure II.3. Elle est dotée d'une cartouche filtrante permettant de filtrer les gaz prélevés, assurant ainsi des mesures exemptées de contaminants. Un tube de prélèvement, également chauffé à 483K, est connecté à la sonde et équipé d'un thermocouple Fe-CuNi qui permet de mesurer les températures au point de

prélèvement. Le système comprend également une gaine chauffée à 453K qui assure le transport des gaz prélevés vers les analyseurs. Avant d'atteindre les analyseurs, les gaz passent par un groupe froid (pré-échantillonneur PSS5) qui élimine la vapeur d'eau contenue dans les gaz, permettant ainsi d'obtenir des mesures sur des fumées sèches. Enfin, deux analyseurs performants étalonnés régulièrement (Horiba PG250 et ABB AO2020) sont utilisés pour mesurer les concentrations des différentes espèces présentes dans les fumées. Les gaz prélevés sont acheminés vers les analyseurs avec des débits spécifiques. L'analyseur Horiba PG250, avec un débit de gaz de 0.4 NL/min, permet de mesurer les concentrations de NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>), CO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>. L'analyseur ABB AO2020 utilise un débit de gaz analysé d'environ 1 NL/min pour mesurer le CH<sub>4</sub> et le CO<sub>2</sub> à des pourcentages élevés. Le Tableau II.3 présente les principes de fonctionnement de chaque cellule de mesure et les plages de mesure de concentration des deux analyseurs.

Les incertitudes de mesure ont été estimées à environ 3 %, comprenant 1 % d'erreurs liées à l'appareillage, comme indiqué par le fabricant et confirmées lors de l'étalonnage de l'appareil, 1 % de fluctuations de mesure sur 3 répétitions, ainsi que 1 % d'erreurs de lecture. Une fois que le régime permanent atteint (environ 5 minutes après le début de la mesure), l'acquisition des données a été effectuée toutes les 30 secondes pendant une période de 5 minutes pour chaque série de mesure.

**Tableau II.3.** Caractéristiques des analyseurs de gaz Horiba PG250 et ABB 02020.

Type de l'analyseur	Espèce	Principe	Plage
Horiba PG250	NO <sub>x</sub>	Chimiluminescence	0 à 5000 ppm
	CO	Infrarouge non dispersif avec détecteur de type pneumatique	0 à 5000 ppm
	CO <sub>2</sub>	Infrarouge non dispersif avec détecteur de type pyroélectrique	0 à 25 vol%
	O <sub>2</sub>	Paramagnétisme	0 à 25 vol%
ABB AO2020	CH <sub>4</sub>	Infrarouge non dispersif avec détecteur de type pneumatique	0 à 5000 ppm
	CO <sub>2</sub>	Infrarouge non dispersif avec détecteur de type pyroélectrique	0 à 100%

En complément des mesures de concentration des compositions de gaz brûlés, des mesures de température des gaz brûlés ont également été réalisées (résultats dans la section V.3.2.1.c). Pour ce faire, des thermocouples de types K et Fe-Cu Ni ont été utilisés pour effectuer des mesures de température à diverses positions par rapport à la flamme, comme illustré dans la Figure II.13.

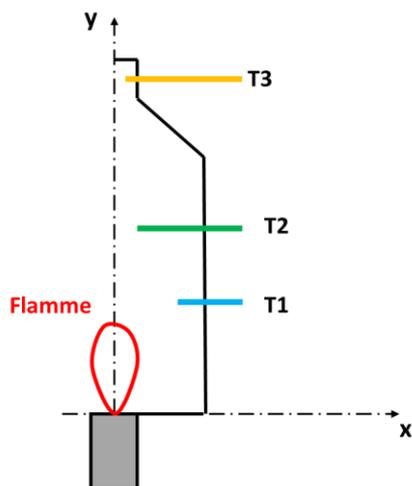


Figure II.13. Schéma des emplacements des thermocouples.

Le tableau II.4 présente les positions x et y de chaque thermocouple utilisé par rapport au centre du brûleur.

Tableau II.4. Positions et types des thermocouples

	Type de thermocouple	X(mm)	Y(mm)
T1	Type K	10	300
T2	Type K	170	700
T3	Fe-Cu Ni	0	1200

### II.3.3. Tension de décharge

Pour la mesure de tension, nous avons utilisé une sonde haute tension (Tektronix P6015A) placée directement sur l'électrode HV utilisée comme anode pour le plasma comme le montre la Figure II.14.

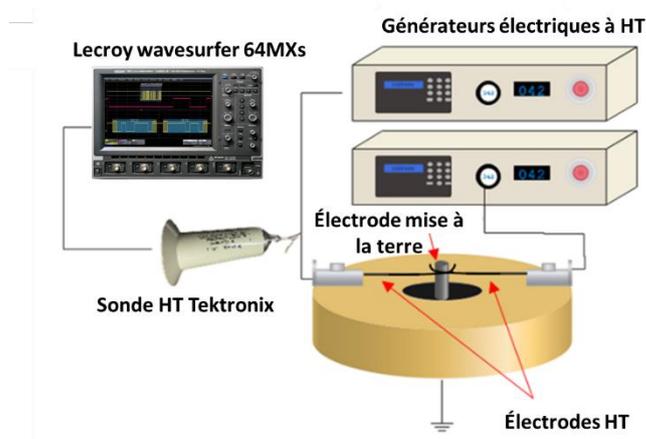
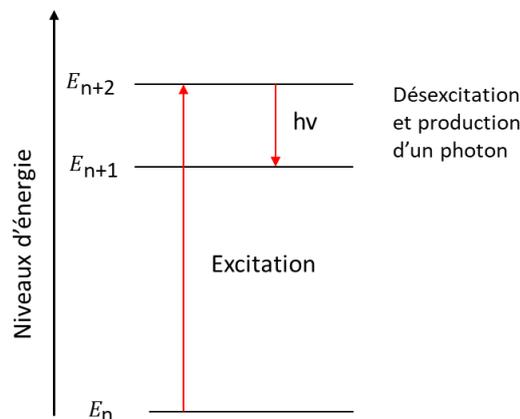


Figure II.14. Schéma du dispositif de mesure de tension du plasma.

Cette sonde est spécialement conçue pour les mesures haute tension et peut résister à des niveaux élevés de tension, ce qui la rend adaptée à notre configuration expérimentale. L'électrode HV est connectée à un générateur de haute tension qui fournit la tension d'alimentation au plasma, comme expliqué dans II.2.3. La sonde haute tension est connectée à un oscilloscope Lecroy Wavesurfer 64MXs, capable d'enregistrer et d'afficher les formes d'ondes de tension avec une haute résolution temporelle avec une bande passante de 75 MHz. Pour assurer une mesure synchronisée, l'oscilloscope a été configuré en mode de déclenchement (trigger) avec l'alimentation électrique. Cela signifie que l'oscilloscope déclenchera automatiquement l'enregistrement des formes d'ondes de tension dès que la tension appliquée à l'anode atteint le niveau de déclenchement prédéfini. Pendant les expériences, nous avons surveillé en temps réel les variations de tension appliquées à l'anode à l'aide de la sonde et de l'oscilloscope.

### II.3.4. Spectroscopie d'émission optique

La spectroscopie d'émission optique (SEO) est une technique utilisée pour identifier certaines espèces présentes dans le plasma et dans la flamme, telles que le radical hydroxyle ou l'oxygène atomique, dont la durée de vie des radicaux est très courte, inférieure à 1  $\mu$ s. Le principe de la SEO, illustré sur la Figure II.15, repose sur le fait qu'une espèce ayant un niveau d'énergie donné, noté  $E_n$ , peut entrer en collision avec un électron et passer à un état d'énergie excité,  $E_{n+2}$ , généralement instable.



**Figure II.15.** Schéma du principe de la spectroscopie d'émission optique.

Lorsque cette espèce se désexcite, par exemple vers un niveau d'énergie  $E_{n+1}$ , elle émet un photon  $h\nu$  d'une longueur d'onde  $\lambda$ . La relation entre l'énergie des niveaux et la longueur d'onde du photon émis est donnée ci-dessous.

$$\lambda = \frac{hc}{E_{n+2} - E_{n+1}} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

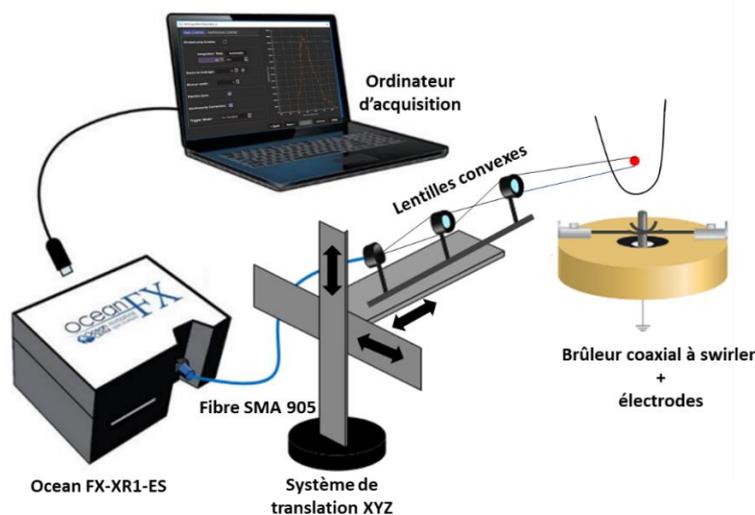
$h$  : constante de Planck ( $6.62 \cdot 10^{-34}$  J ou  $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$C$  : célérité de la lumière ( $3 \cdot 10^8$   $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Dans cette étude, nous avons utilisé deux spectromètres pour l'analyse spectrale des émissions lumineuses de la flamme et du plasma. Le premier spectromètre, l'Ocean FX-XR1, a été employé dans le chapitre IV, plus précisément dans la section V.3.3 intitulée "Configuration des électrodes : arc glissant autour d'une tige intégrée dans le brûleur" et dans le chapitre III, section V.3.1 "Configuration des électrodes : Tige-Anneau". Quant au deuxième spectromètre, l'Acton Research Corporation SP2750i, il a été utilisé dans le chapitre III, section III.2.2 "Configuration des électrodes : arc glissant" et dans le chapitre IV, section V.2.2 "Configuration des électrodes : Pointe-Tige-Pointe". Ces deux spectromètres ont joué un rôle essentiel dans notre étude en nous permettant de quantifier les espèces impliquées dans la combustion assistée par plasma.

#### II.3.4.1. Ocean FX-XR1-ES

Dans cette étude, nous avons utilisé la SEO en utilisant un spectromètre à plage étendue (Ocean FX-XR1-ES) avec une gamme de longueurs d'onde de 200 à 1025 nm. Ce spectromètre fonctionne en décomposant la lumière en ses longueurs d'onde constitutives et en mesurant l'intensité de chaque longueur d'onde. Le schéma du dispositif de la spectroscopie d'émission optique par ce modèle de spectromètre est présenté dans la Figure II.16, où les optiques, les lentilles convexes, ainsi que la fibre de spectromètre et l'ordinateur d'acquisition sont illustrés.

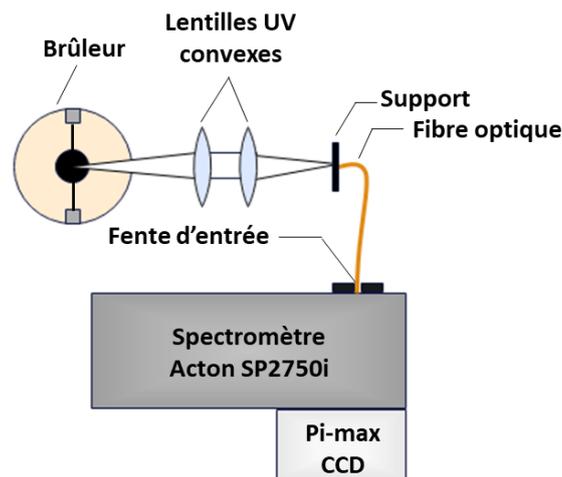


**Figure II.16.** Schéma d'implantation du spectromètre d'émission optique Ocean FX-XR1-ES avec le système de combustion assistée par plasma.

L'Ocean FX-XR1 est un spectromètre polyvalent avec une acquisition rapide pouvant atteindre 4500 scans par seconde et une résolution optique de 1.7 nm FWHM (pleine largeur à mi-hauteur). La largeur de fente d'entrée est de 25  $\mu\text{m}$ , garantissant une bonne résolution spatiale. Pour collecter la lumière émise par le plasma ou la flamme, nous avons utilisé une fibre optique (SMA 905) et de deux lentilles en quartz. Ces lentilles, des lentilles UV convexes de diamètres de 25 mm et de focales de 35 mm et 500 mm placées devant la fibre optique, ont été utilisées pour focaliser la lumière dans la fibre et assurer une collecte de lumière maximale.

### II.3.4.2. Acton Research Corporation SP2750i

Dans cette étude, nous avons également utilisé le spectromètre Acton Research Corporation SP2750i pour réaliser la SEO, comme illustré dans Figure II.17. Ce système est équipé d'un spectromètre SP2750i offrant une plage de longueurs d'onde allant de 210 à 810 nm, et il est associé à une caméra intensifiée Princeton Instruments® PI-MAX 4. Le spectromètre possède une tourelle montée avec trois réseaux : 600 traits/mm, 1800 traits/mm et 2400 traits/mm, permettant de choisir la résolution appropriée en fonction des besoins de mesure. La lumière émise par le plasma et/ou la flamme est collectée à l'aide d'une caméra ICCD pour obtenir une émission lumineuse résolue temporellement. Cette caméra est reliée au spectromètre par une fibre optique (Thorlabs M92L02- Ø200 µm) via un adaptateur d'imagerie de fibre, où la largeur de fente d'entrée est réglée à 20 µm pour une meilleure résolution spatiale. Pour focaliser la lumière sur la fibre optique, deux lentilles UV convexes sont utilisées : une lentille de 25 mm de diamètre avec une focale de 35 mm et une lentille de 25 mm de diamètre avec une focale de 500 mm. Ces lentilles permettent d'assurer la collecte et la concentration de lumière sur la fibre optique pour une transmission optimale vers le spectromètre.



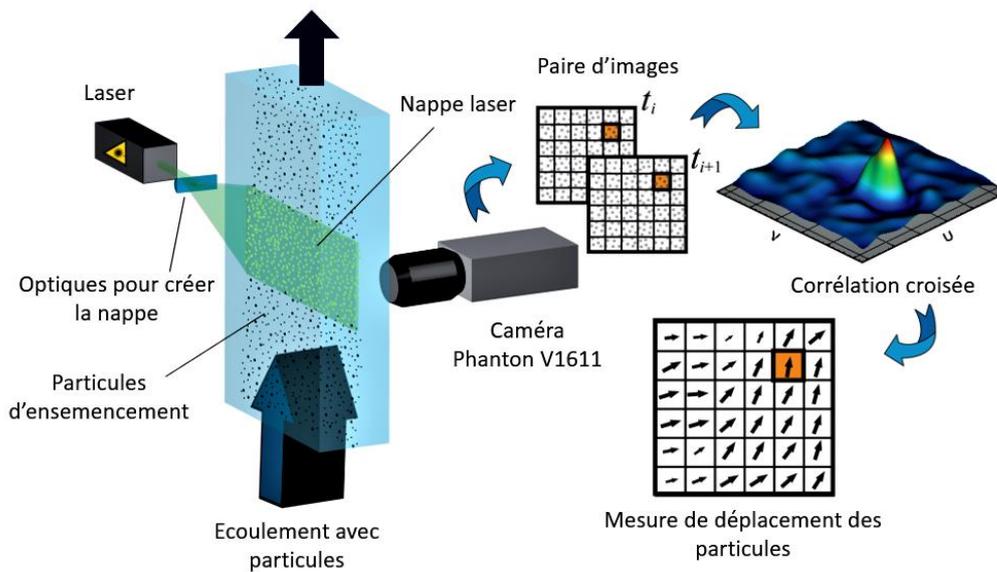
**Figure II. 17.** Illustration du dispositif de diagnostic spectroscopique avec Acton Research Corporation SP2750i.

## II.3.5. Vélométrie par images de particules (PIV)

### II.3.5.1. Principe de la PIV 2D

La Vélométrie par Image de Particules (PIV) représente une technique d'imagerie permettant une mesure de champ de vitesses. Cette méthode permet d'évaluer la vitesse d'un fluide dans un plan en étudiant le déplacement de particules de traçage. Le concept fondamental de cette méthode repose sur l'hypothèse que les particules introduites dans le fluide possèdent les mêmes propriétés et caractéristiques que le fluide lui-même, de sorte qu'elles suivent exactement la trajectoire de l'écoulement. En effet, la PIV ne mesure pas directement la vitesse de l'écoulement, mais plutôt la vitesse des particules injectées dans l'écoulement. La

Figure II.18 illustre le concept de l'acquisition d'images en PIV rapide, qui implique trois composants clés : un laser rapide, une caméra rapide et des particules de traçage. En utilisant une nappe laser pour matérialiser le plan de mesure, cette approche permet d'accéder à deux des trois composantes de la vitesse ( $V_x$  et  $V_y$  dans cette étude) du fluide en mouvement. Le calcul de la vitesse s'effectue en observant le déplacement des traceurs entre deux images successives, où ces particules sont illuminées par la nappe laser, tout en tenant compte de l'intervalle de temps ( $\Delta t$ ) entre ces deux images. L'intervalle de temps entre deux images d'une même paire est déterminé de manière que le déplacement des particules soit d'environ 25% de la taille des fenêtres d'interrogation (des zones de l'image où la vitesse du fluide est évaluée).



**Figure II.18.** Schéma descriptif du système PIV 2D.

### II.3.5.2. Dispositif expérimental

Le protocole expérimental adopté pour cette étude de mesure de vitesse implique la mise en œuvre d'un système composé de plusieurs éléments cruciaux. Pour obtenir les mesures de vitesse d'écoulement, nous devons donc :

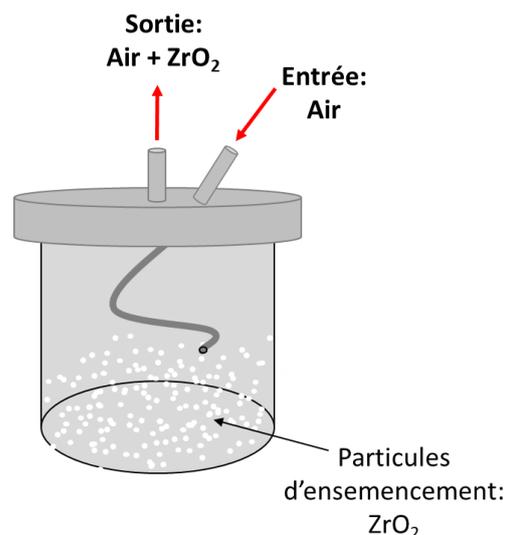
- Créer un ensemencement (Traceurs).
- Créer un plan lumineux (Laser + Système optique).
- Calibrer à l'aide d'une mire d'étalonnage
- Enregistrer les images de ces particules (Caméra CCD).
- Analyser ces images dans le but d'obtenir le déplacement des traceurs (Inter-corrélation).
- Calculer pour chaque zone d'interrogation la vitesse des particules.

#### II.3.5.2.a. Système d'ensemencement

La PIV exige la présence de particules qui suivent le mouvement de l'écoulement tout en diffusant la lumière du laser. Ces particules, appelées "traceurs", peuvent être "naturelles" si

elles sont déjà présentes dans l'écoulement, ou "artificielles" si elles sont introduites par un ensemencement externe. En outre, ces particules doivent être d'une taille suffisante pour diffuser une quantité de lumière adéquate, permettant ainsi leur visibilité par la caméra. Il est d'autre part essentiel que ces particules suivent fidèlement l'écoulement pour obtenir des mesures de vitesse fidèles à celle de l'écoulement. Par conséquent, il est important que ces particules aient une inertie faible et un temps de réponse rapide aux fluctuations de vitesse. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser de l'oxyde de Zirconium ( $ZrO_2$ ) comme particules d'ensemencement. Ces particules de faibles diamètres ( $\sim 2\mu m$ ) ont une température de fusion très élevée (3000 K), indispensable à la traversée du front de flamme. De plus, il est important de noter que ces particules ont un nombre de Stokes inférieur à 1. Cela signifie qu'elles sont très sensibles aux mouvements du fluide, ce qui nous permet d'obtenir des mesures très précises du comportement du fluide. Le nombre de Stokes est un indicateur de la capacité des particules à suivre rapidement le flux, par rapport à un certain temps caractéristique de l'écoulement, et dans notre étude, il est très inférieur à 1, ce qui améliore la précision de nos mesures de vitesse.

La Figure II.19 présente le schéma descriptif de l'ensemenceur qui a été spécialement développé pour une étude précédente au laboratoire et qui a été utilisé au cours de cette étude. Le réglage de la densité des particules, c'est-à-dire le taux d'ensemencement, est soigneusement contrôlé grâce aux pertes de charge générées par des vannes à pointe positionnées à la sortie de l'ensemenceur. Pour minimiser les distances de canalisation et éviter la stagnation des particules dans les tubes, l'ensemenceur est placé au plus près du brûleur. Avant chaque série de mesures, les particules sont soigneusement étuvées à une température d'environ 200 K pour minimiser la présence d'eau pouvant générer des agglomérats et ainsi garantir un ensemencement homogène et régulier tout au long des expériences.



**Figure II.19.** Schéma descriptif de l'ensemenceur.

### II.3.5.2.b. Plan lumineux

Afin d'éclairer les particules présentes dans l'écoulement et les rendre visibles à la caméra, nous avons utilisé un laser rapide Nd : YAG double impulsion (Nd : YAG 4X104 F/P ARAR). Ce laser est un type d'oscillateur double pompe à diodes, intégré dans une tête unique (MESA PIV, Continuum), et opérant à une longueur d'onde de 532 nm. Chaque oscillateur peut émettre individuellement des impulsions d'une durée de 120 à 180 ns, avec une fréquence maximale de 40 kHz et une puissance de sortie moyenne de 60 W. En combinant les deux oscillateurs, une paire d'impulsions est générée dont l'intervalle de temps, entre les deux impulsions, peut être réduit jusqu'à 2  $\mu$ s.

Pour créer une nappe laser et focaliser un maximum d'énergie laser dans la zone d'observation, un système optique spécifique a été utilisé. La Figure II.20 montre ce dispositif qui comprend trois miroirs pour diriger le faisceau laser, composé d'un périscope (miroir 1 et miroir 2), un troisième miroir permettant ainsi un alignement précis, d'une lentille cylindrique (de distance focale de -50 mm), et d'une lentille cylindrique convergente de distance focale de 200 mm qui permet de faire converger le faisceau pour former une nappe laser. Dans le cas de notre étude, cette nappe est verticale. Grâce à ce dispositif optique, nous pouvons obtenir une nappe laser bien définie et adaptée à notre configuration expérimentale. La taille du champ de mesure est d'environ 171\*107 mm<sup>2</sup> avec 1500 paires d'images. L'acquisition et le traitement des images ont été réalisés avec le logiciel Insight 4G de TSI.

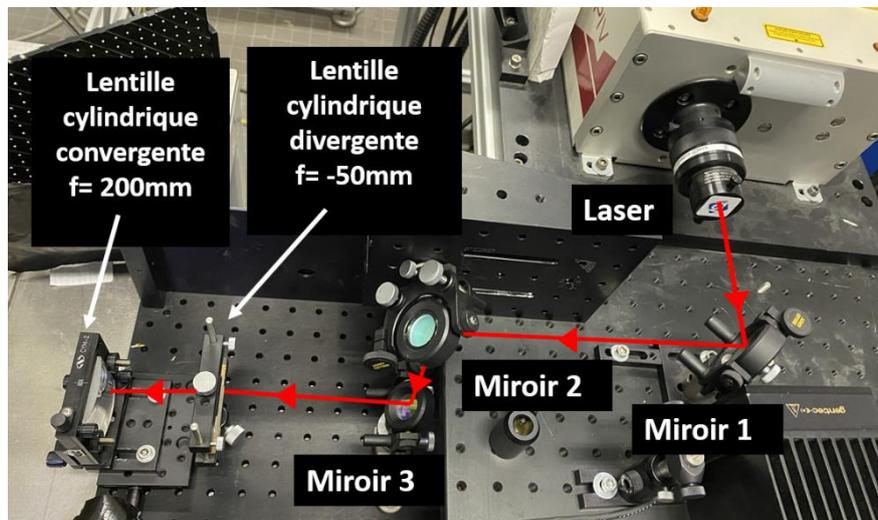


Figure II.20. Système optique pour créer la nappe laser.

### II.3.5.2.c. Calibration, acquisition des images et calculs des vitesses

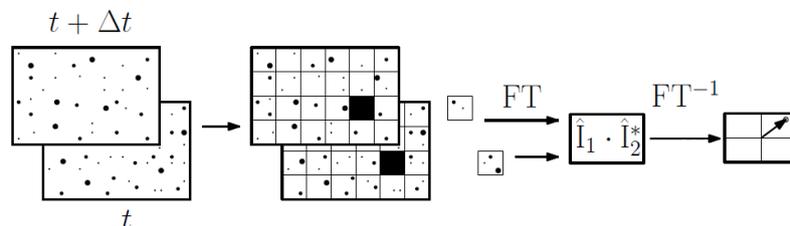
Afin d'obtenir les vecteurs vitesses, il est impératif de procéder à une étape préliminaire cruciale : la calibration. Durant cette étape, il est nécessaire d'établir une correspondance entre une distance exprimée en pixels à partir de deux points et la distance réelle en mm de ce segment. La précision de cette calibration est essentielle, car la moindre erreur à ce stade peut engendrer des imprécisions significatives sur les vitesses calculées par la suite. Dans notre

étude, La calibration a été effectuée grâce à une mire contenant une grille rectangulaire de points de repère ayant des emplacements connus (X, Y, Z).

L'acquisition des images est réalisée à l'aide d'une caméra rapide CCD (Charged-Coupled Device) Phantom V1611 orientée à 90° par rapport à la nappe de laser, comme le montre la Figure II.18. Afin d'assurer une synchronisation précise entre la caméra et le laser, nous avons utilisé un boîtier de synchronisation TSI modèle 610036. Pour obtenir des images de qualité et mesurer les vitesses, il est essentiel de régler l'intervalle de temps entre les impulsions des deux cavités laser ( $\Delta t$ ). Ce temps de réglage dépend de la dynamique de l'écoulement, telle que la gamme de vitesse à mesurer et la présence éventuelle de composantes hors plan. Généralement,  $\Delta t$  doit correspondre à un déplacement moyen des particules d'environ 1/4 de la taille de la fenêtre d'interrogation.

Le procédé de calcul de la vitesse est illustré dans la Figure II.21. Initialement, les deux images prises aux instants  $t$  et  $t + \Delta t$  sont subdivisées en fenêtres d'interrogation, dont les dimensions sont adaptées à l'écoulement étudié pour assurer une résolution spatiale appropriée. Le calcul de la corrélation directe peut être chronophage, c'est pourquoi les algorithmes optent généralement pour une approche basée sur la transformation de Fourier rapide. En utilisant cette méthode, le déplacement spatial ( $\Delta d$ ) est obtenu à partir de la position du pic principal de la fonction d'inter-corrélation, tandis que le second pic représente le bruit le plus intense. Grâce à cet intervalle de temps ( $\Delta t$ ) entre les deux images, on peut déduire la valeur de la vitesse ( $v$ ) :

$$V = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (\text{II.7})$$



**Figure II.21.** Principe du calcul par inter-corrélation [96].

Dans cette étude, un nombre important de champs de mesures instantanés est nécessaire pour assurer une bonne convergence du calcul des valeurs moyennes ainsi que celle des fluctuations des vitesses. Pour ce faire, les calculs sont effectués avec 1500 couples d'images (3000 images) pour toutes les séries de mesures.

## II.4. Paramètres opératoires

Dans le cadre de cette étude, les conditions opératoires sont spécifiquement adaptées en fonction de la configuration brûleur-plasma utilisée. Ces paramètres englobent la teneur en CO<sub>2</sub> dans le mélange de combustible, variant de 0% à 50%, les débits (Q) d'air, de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>, ainsi que les vitesses d'écoulement qui varient en fonction de la géométrie de brûleur et des puissances des flammes étudiées. Les vitesses sont calculées à partir des débits massiques et de la section débitante. Dans le cas d'un brûleur à injection axiale, la vitesse du combustible

désigne la vitesse calculée dans la partie annulaire autour de la tige centrale. Cependant, pour un brûleur à injection radiale, la vitesse du combustible fait référence à la vitesse présente dans chaque trou de l'injecteur. L'étude prend également en compte différents nombres de swirl (0.5, 0.8, 1.1 et 1.4) ainsi que différentes richesses globales à l'injection (0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1 ; 1.2).

La richesse globale ( $\Phi$ ) peut être défini comme suit :

$$\Phi = \frac{\left(\frac{Q_{fuel}}{Q_{Air}}\right)}{\left(\frac{Q_{fuel}}{Q_{Air}}\right)_{stoichio}} \quad (II.8)$$

Dans notre étude,  $Q_{fuel}$  et  $Q_{Air}$  représentent respectivement le débit volumique du combustible qui est  $CH_4+CO_2$  et d'oxydant (air).

La teneur en  $CO_2$  dans le combustible ( $\%CO_2$ ) est définie par le rapport suivant :

$$\%CO_2 = \frac{Q_{CO_2}}{Q_{CH_4}+Q_{CO_2}} \quad (II.9)$$

Le Tableau II.5 récapitule les conditions opératoires présentées dans le chapitre III, en utilisant un brûleur à injection radiale. L'étude concernant la configuration des électrodes arc glissant (section III.2) a concerné toutes les conditions énumérées dans ce tableau. En revanche, pour la configuration Tige-Anneau (section III.3), seules les conditions avec une richesse de 1 ont été étudiées, avec des cas spécifiques à 0% et 30% de  $CO_2$ .

**Tableau II.5.** Tableau récapitulatif des conditions opératoires avec le brûleur à injection radiale et les deux configurations du plasma Arc Glissant et Tige-Anneau.

$\Phi$	$\%CO_2$	$Q_{CO_2}$ [NL/min]	$Q_{air}$ [NL/min]	$Q_{CH_4}$ [NL/min]	$V_{fuel}$ [m/s]	$V_{air}$ [m/s]	Sn	P [kW]
<b>0.8</b>	0	0	100		2.65	1.87		
	10	0.9			2.95			
	20	2			3.32			
	30	3.6			3.79			
	40	5.6			4.42			
<b>1</b>	0	0	80	8.4	2.65	1.49	0.5	4.75
	10	0.9			2.95			
	20	2			3.32			
	30	3.6			3.79			
	40	5.6			4.42			
<b>1.2</b>	0	0	66.6		2.65	1.24		
	10	0.9			2.95			
	20	2			3.32			
	30	3.6			3.79			
	40	5.6			4.42			

Le Tableau II.6 présente une synthèse des conditions opératoires exposées dans le chapitre IV, où un brûleur à injection axiale a été utilisé. Pour l'étude de la configuration des électrodes arc glissant autour d'une tige fixe longue (section V.3), toutes les conditions répertoriées dans ce tableau ont été prises en compte. En revanche, pour la configuration Pointe-

Tige-Pointe (section V.2), seules les conditions avec une richesse de 0.8 ont été examinées, avec des cas spécifiques impliquant 0%, 17%, et 29% de CO<sub>2</sub>.

$\Phi$	% CO <sub>2</sub>	Q <sub>CO2</sub> [NL/min]	Q <sub>Air</sub> [NL/min]	Q <sub>CH4</sub> [NL/min]	V <sub>fuel</sub> [m/s]	V <sub>air</sub> [m/s]	Sn	P [kW]
<b>0.4</b>	0	0	100	4.2	0.55	1.75	0.8	2.4
	9	0.42			0.61			
	17	0.84			0.66			
	23	1.26			0.72			
	29	1.68			0.77			
	33	2.1			0.83			
<b>0.6</b>	0	0		6.3	0.83	1.75		3.6
	9	0.63			0.91			
	17	1.26			0.99			
	23	1.89			1.1			
	29	2.51			1.16			
	33	3.14			1.24			
<b>0.8</b>	0	0		8.4	1.1	1.75		4.8
	9	0.84			1.2			
	17	1.68			1.3			
	23	2.52			1.44			
	29	3.35			1.55			
	33	4.2			1.66			

**Tableau II.6.** Tableau récapitulatif des conditions opératoires avec le brûleur à injection axiale et les deux configurations du plasma Pointe-Tige-Pointe et Arc Glissant autour d'une tige fixe longue.

Le Tableau II.7 récapitule les conditions opératoires relatives au brûleur à injection axiale avec la configuration des électrodes arc glissant autour d'une tige amovible courte, ainsi que les résultats obtenus dans le chapitre IV section V.4 de l'étude. Cette étude de chapitre IV se distingue par l'exploration de deux différentes vitesses d'injection, en variant le diamètre de la tige centrale amovible (4 et 8mm).

**Tableau II.7.** Tableau récapitulatif des conditions opératoires avec le brûleur à injection axiale et la configuration des électrodes Arc Glissant autour d'une tige amovible courte de différents diamètres.

$\Phi$	% CO <sub>2</sub>	Q <sub>CO2</sub> [NL/min]	Q <sub>air</sub> [NL/min]	Q <sub>CH4</sub> [NL/min]	V <sub>fuel</sub> [m/s]		V <sub>air</sub> [m/s]	Sn	P [kW]
					4 mm	8 mm			
0.7	0	0	150	11	2.9	9.3	2.8	0.5	6.5
	15	1.95			3.4	11			
	30	4.7			4.1	13.3			

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail le dispositif expérimental ainsi que les différentes techniques de mesure utilisées dans le cadre de notre étude. Le dispositif expérimental comprend une chambre de combustion associée à un brûleur coaxial à swirl. Ce dernier se décline en deux configurations : un brûleur à injection radiale et un brûleur à injection axiale. Nous avons également abordé les différentes configurations du plasma utilisées, notamment l'arc glissant, la Pointe-Tige-Pointe et la Tige-Anneau.

En ce qui concerne les techniques de mesure, nous avons décrit la technique souvent utilisée en combustion, la chimiluminescence OH\*, qui nous permet de caractériser le comportement des flammes de biogaz avec et sans plasma et localiser le front de flamme. De plus, nous avons discuté de l'analyse des gaz brûlés (mesures des concentrations des espèces dans les gaz brûlés : NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, et CH<sub>4</sub>), de la mesure de tension du plasma pour comprendre les caractéristiques du plasma utilisé et de la spectroscopie d'émission optique utilisée pour obtenir des informations sur les espèces présentes lors de notre étude.

Une autre technique essentielle pour comprendre l'aspect dynamique de l'écoulement est la vélocimétrie par images de particules (PIV) rapide, qui permettra de mesurer les champs de vitesses de l'écoulement réactif. Nous avons décrit en détail le principe de la PIV 2D, ainsi que le montage optique et le protocole expérimental associés, tels que le système d'ensemencement, le plan lumineux, la calibration et l'acquisition des images. Il faut souligner que la partie dynamique par PIV a été effectuée à la fin de la dernière année de thèse. Il s'agit ainsi d'une étude préliminaire des champs dynamiques de l'écoulement réactif. Étendre les plages de mesures et d'analyses seront nécessaires dans le futur, afin de quantifier au mieux l'effet du plasma sur les champs dynamiques.

Après avoir présenté les différents moyens expérimentaux et les paramètres opératoires de l'étude, nous allons commencer par présenter, dans le prochain chapitre, les résultats des calculs des propriétés des flammes de biogaz pour mieux comprendre les enjeux liés à l'utilisation du

biogaz comme combustible et analyser les propriétés intrinsèques des flammes de biogaz dans différentes conditions opératoires

---

## Chapitre III. Brûleur à injection radiale

---

III.1.	Introduction.....	99
III.2.	Configuration des électrodes: Arc Glissant .....	99
III.2.1.	Caractérisation du plasma.....	99
III.2.2.	Caractérisation de la flamme sans plasma.....	101
III.2.2.1.	Stabilité des flammes de biogaz .....	101
III.2.2.1.a.	Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> dans le combustible.....	101
III.2.2.1.b.	Effet de la richesse globale .....	109
III.2.2.1.c.	Effet de l'intensité de swirl.....	110
III.2.2.2.	Émissions polluantes.....	111
III.2.3.	Combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant.....	115
III.2.3.1.	Effet du plasma sur la stabilité et les émissions polluantes .....	115
III.2.3.2.	Spectroscopie d'émission optique .....	117
III.2.3.2.a.	Effet de la fréquence de répétition des impulsions .....	118
III.2.3.2.b.	Effet de la position d'acquisition du spectroscope d'émission optique .....	120
III.2.3.2.c.	Etude des espèces détectées .....	121
III.2.3.3.	Effet du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement.....	124
III.3.	Configuration des électrodes : Tige-Anneau .....	132
III.3.1.	Caractérisation du plasma.....	132
III.3.2.	Effet de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension électrique appliquée .....	133
III.3.2.1.	Stabilité des flammes de biogaz .....	133
III.3.2.2.	Emissions polluantes.....	135
III.3.3.	Effet du plasma sur les spectres d'émission optique.....	136
III.4.	Conclusion .....	140

### **III.1. Introduction**

Le présent chapitre porte sur l'étude des flammes non-prémélangées de biogaz assistées par plasma dans un brûleur à injection radiale (Figure II.3). Dans cette étude, deux configurations du plasma ont été utilisées, à savoir l'Arc Glissant (Figure II.7) et la Tige-Anneau (Figure II.9). L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'impact de l'utilisation de ces configurations du plasma sur la combustion de biogaz et les émissions polluantes produites par le brûleur à injection radiale.

Dans un premier temps, la configuration des électrodes d'arc glissant est examinée. La caractérisation de la flamme sans plasma et les effets de l'ajout de CO<sub>2</sub>, de la richesse globale et de l'intensité de swirl sur la stabilité des flammes de biogaz et la formation des émissions polluantes sont discutés. Ensuite, la combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant est caractérisée en examinant l'effet de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension appliquée sur la stabilité des flammes de biogaz et les émissions polluantes produites. Enfin, la spectroscopie d'émission optique est utilisée pour étudier les espèces détectées sous différentes conditions du plasma et de combustion. En complément, l'impact du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif a été étudié.

Dans la deuxième partie du chapitre, la configuration des électrodes Tige-Anneau est étudiée. La caractérisation du plasma et l'effet de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension appliquée sur la stabilité des flammes de biogaz et les émissions polluantes produites sont analysés. En outre, l'effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible et l'effet de la tension électrique appliquée sur les espèces détectées sont également étudiés en utilisant la spectroscopie d'émission optique.

Enfin, la conclusion du chapitre souligne les résultats les plus significatifs de l'étude.

### **III.2. Configuration des électrodes: Arc Glissant**

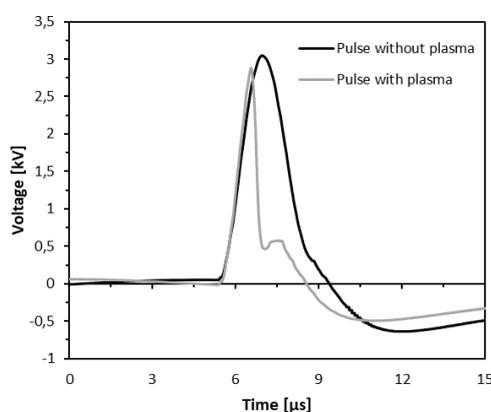
#### **III.2.1. Caractérisation du plasma**

Dans cette section de caractérisation du plasma, deux aspects ont été examinés : la tension mesurée à l'aide de la sonde de tension au niveau des électrodes haute tension (HT) et la consommation d'énergie à la prise secteur du plasma impulsif microseconde (MPP, pour *Microsecond Pulsed Plasma* en anglais). La tension a été mesurée avant et après l'initiation du plasma entre les électrodes. En ce qui concerne la consommation d'énergie, les mesures ont été effectuées à différentes fréquences de répétition des impulsions (PRF) et tensions électriques appliquées (U ou IEV), cela est représentatif d'un générateur impulsif de tension polyvalent et non optimisé pour une configuration donnée. Ces deux aspects sont importants pour comprendre le fonctionnement et l'optimisation de MPP.

Dans cette étude, il a été observé que l'activation du plasma a un impact significatif sur la forme de l'impulsion de tension. Avant l'initiation du plasma entre les électrodes, la forme de l'impulsion est relativement stable, avec une amplitude maximale mesurée à  $(3000 \pm 128)$  V pour une fréquence d'impulsion de 10 kHz, comme le montre la Figure III.1. Cependant, une

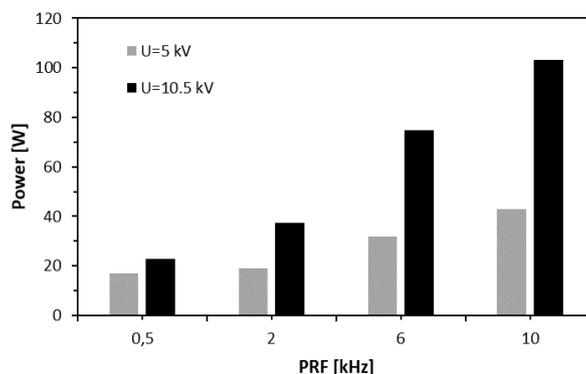
fois que le plasma est produit, la tension chute brutalement et la forme de l'impulsion devient plus irrégulière. Ce phénomène est dû à la formation d'un plasma entre les deux électrodes HT, qui modifie les propriétés électriques du milieu. Sous l'action du champ électrique, les électrons acquièrent de l'énergie cinétique qu'ils transfèrent au mélange gazeux, générant des ions et espèces excitées. Ceci se traduit par une augmentation du courant entre les électrodes et simultanément à une chute de la tension appliquée.

Il est important de noter que la présence de la flamme peut également influencer le comportement de la décharge plasma. Une étude préliminaire sur l'effet de la flamme sur l'évolution temporelle de l'impulsion HT et les espèces réactives émises est présentée dans l'Annexe B. Cette analyse complémentaire permettra de mieux comprendre les interactions complexes entre la flamme et le plasma.



**Figure III.1.** Évolution temporelle de l'impulsion HT sans (ligne noire) et avec (ligne grise) activation du plasma. Les formes d'ondes sont moyennées sur 10 impulsions de tension.

La Figure III.2 présente la consommation d'énergie de MPP pendant la décharge du plasma avec différentes fréquences de répétition des impulsions (PRF) et tensions électriques appliquées (IEV ou U).



**Figure III.2 :** Puissance appliquée à différentes fréquences de répétition des impulsions et tensions électriques appliquées.

La PRF fait référence au taux auquel les impulsions du plasma sont produites, tandis que l'IEV désigne la tension électrique délivrée par le générateur électrique pour initier et maintenir la décharge. Ces paramètres sont importants pour contrôler et optimiser la consommation d'énergie de MPP. Les résultats de ces mesures indiquent que le MPP ne consomme pas une quantité d'énergie très importante en comparaison de la puissance de la flamme. En effet, même lorsque les valeurs d'IEV et de PRF étaient à leurs niveaux les plus élevés, la consommation d'énergie du plasma est restée inférieure à 110 W. C'est une quantité relativement faible de consommation d'énergie par rapport à d'autres types du plasma, ce qui est d'autant plus vrai que le générateur impulsif de tension n'est pas optimisé pour une configuration donnée, ce qui en fait une solution prometteuse pour diverses applications industrielles et énergétiques.

### III.2.2. Caractérisation de la flamme sans plasma

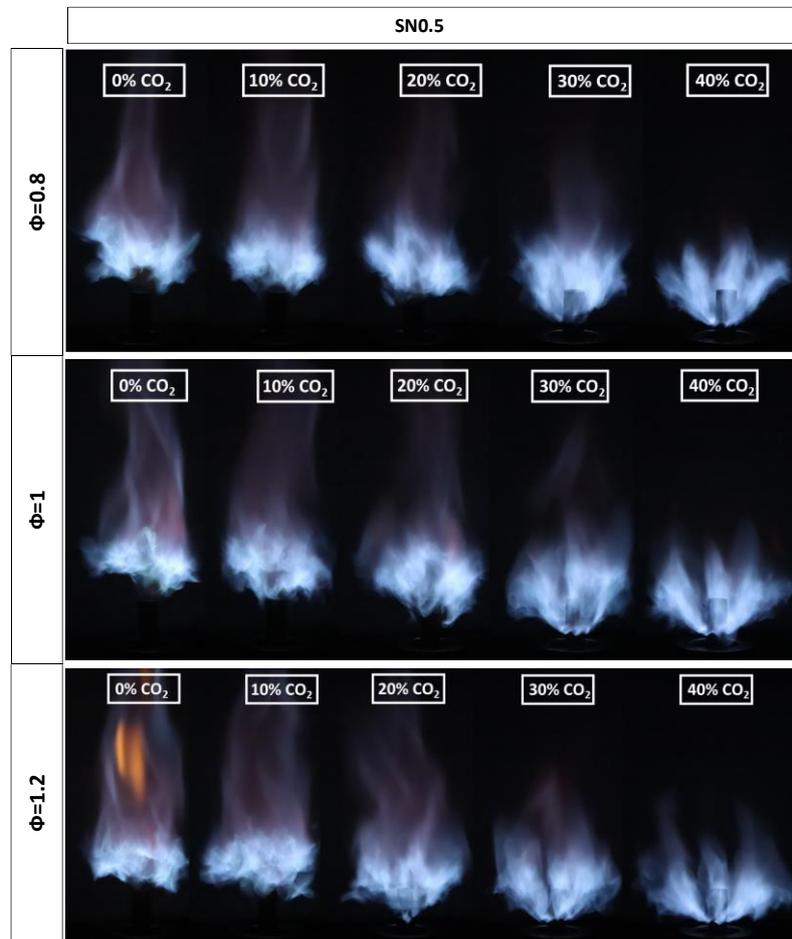
Avant d'étudier l'effet du plasma sur les flammes de biogaz, il est important de caractériser la flamme sans plasma. Pour cela, différents paramètres peuvent être étudiés, tels que l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible, la richesse globale, l'intensité de swirl et la formation des émissions polluantes. Cette étape est cruciale pour comprendre le comportement des flammes de biogaz dans différentes conditions avant l'ajout du plasma.

#### III.2.2.1. Stabilité des flammes de biogaz

##### III.2.2.1.a. Effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible

Des visualisations ont été effectuées pour déterminer les formes et les comportements des flammes. La Figure III.3 montre des photographies des flammes de biogaz pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) en utilisant un swirl de  $S_n=0.5$  avec un temps d'exposition de 1/125 s. Les images ont été capturées pour des taux de CO<sub>2</sub> dans le combustible variant de 0 % à 40 % avec un pas de 10 %, permettant ainsi de visualiser l'effet de la variation du taux de CO<sub>2</sub> dans le combustible sur la flamme. Les images montrent que l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> dans le combustible modifie la forme, l'intensité et la position de la flamme. L'ajout de CO<sub>2</sub> a tendance à rapprocher la base de la flamme aux orifices d'injection de combustible avant qu'elle se soit souflée. L'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible peut modifier la composition de la flamme en augmentant la proportion de CO<sub>2</sub> dans la zone de réaction. Cela peut avoir des effets sur les caractéristiques de combustion de la flamme, tels que la cinétique de combustion [97], la température de flamme [98], la vitesse de propagation de la flamme [11], la stabilité de la combustion [42] et la production de polluants [46]. Plus précisément, l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible peut influencer la cinétique de combustion en modifiant le temps nécessaire pour que les réactions chimiques se produisent. Lorsque la concentration de CO<sub>2</sub> est suffisamment élevée, il peut ralentir la réaction de combustion en réduisant la réactivité des espèces de combustion telles que l'oxygène [39]. En même temps, la position de la flamme peut également changer en raison de la dynamique de combustion altérée. De plus, la teneur en CO<sub>2</sub> dans le combustible affecte les caractéristiques d'écoulement et de mélange, ce qui peut également avoir un impact sur la forme et le comportement de la flamme [99]. Enfin, il est important de noter que les effets de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible dépendent de plusieurs facteurs tels que la concentration de CO<sub>2</sub>, la composition du combustible et de l'oxydant, le taux d'injection, la géométrie de l'injecteur et de brûleur, etc. Par conséquent, une étude approfondie des effets

de l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible sur la combustion est nécessaire pour différentes configurations et mélanges.



**Figure III.3.** Photographies des flammes à différents taux de  $\text{CO}_2$  dans le combustible pour des richesses globales distinctes (0.8, 1 et 1.2), avec un temps d'exposition de 1/125 s.

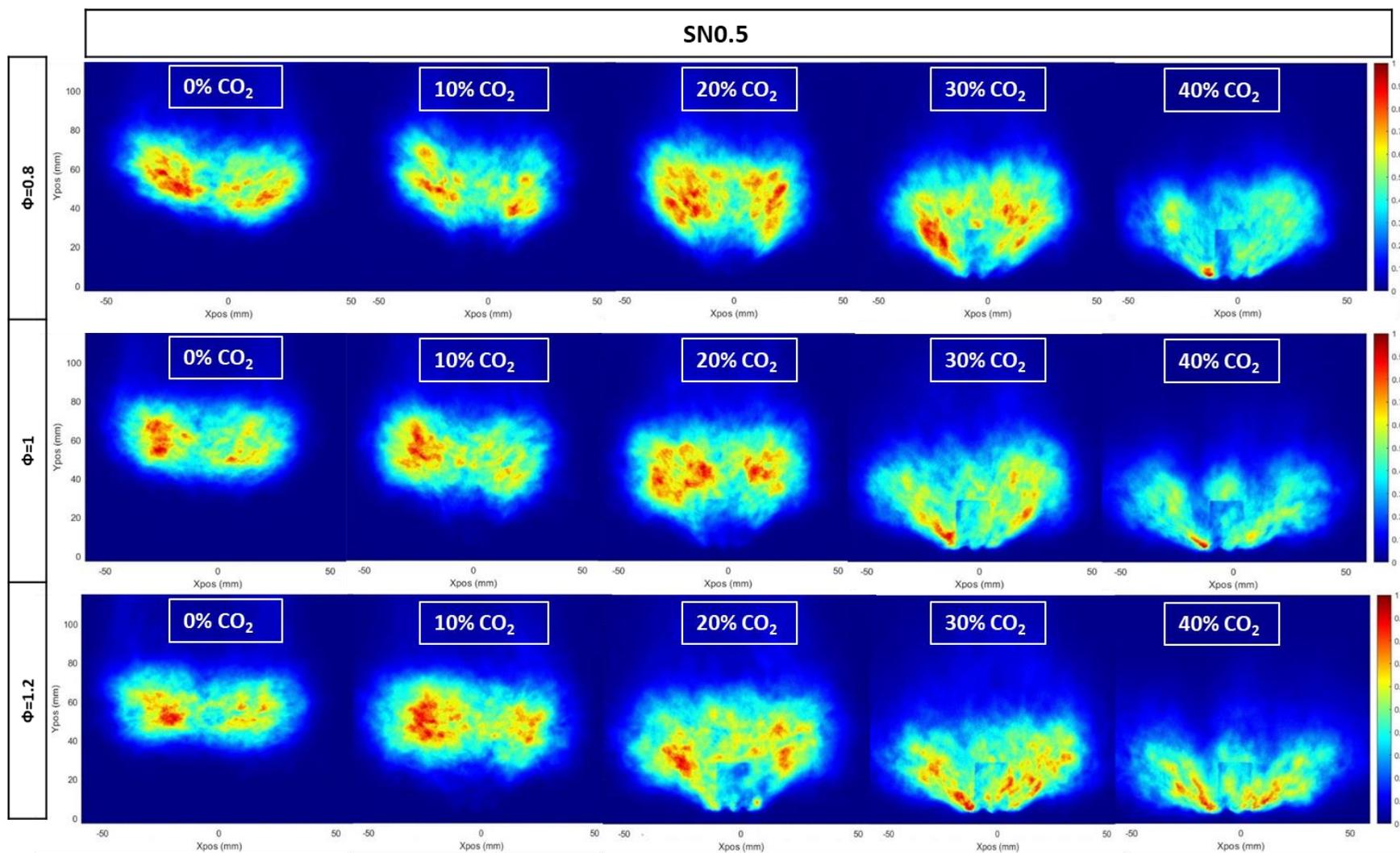
Afin de mieux comprendre et confirmer l'effet de l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible sur la stabilité de la flamme en termes de hauteur d'accrochage et de longueur de flamme, une analyse de la chimiluminescence  $\text{OH}^*$  a été effectuée. La Figure III.4 présente les résultats de cette analyse, montrant les images moyennes de la chimiluminescence  $\text{OH}^*$  pour différentes proportions d'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, avec un nombre de swirl de 0.5 et des richesses globales de 0.8, 1 et 1.2. L'ajout de  $\text{CO}_2$  au combustible influence considérablement les caractéristiques de la flamme. Les images montrent que l'ajout de  $\text{CO}_2$  tend à déplacer la flamme vers l'injecteur de combustible et la flamme devient moins intense et moins longue. Cela est dû à la valeur calorifique réduite du  $\text{CO}_2$  et à sa conductivité thermique, ainsi qu'à son effet sur le mélange des gaz et la stabilité de la flamme. Ces changements sont le résultat de l'impact combiné de la cinétique de combustion, du taux de libération de chaleur, de la stabilité de la flamme et des caractéristiques d'écoulement et de mélange. L'intensité de la chimiluminescence du radical  $\text{OH}^*$  diminue remarquablement avec l'augmentation du

pourcentage de CO<sub>2</sub> comme le montre la Figure III.4. Lorsque la concentration de CO<sub>2</sub> dans le combustible augmente, la région de distribution d'OH\* est allongée en raison d'une augmentation du débit global de combustible. Cependant, lorsque le débit de CO<sub>2</sub> augmente, la zone principale de production d'OH\* dans la flamme ne s'étend pas continuellement vers l'aval de la flamme, mais se déplace progressivement vers la sortie du brûleur jusqu'à atteindre une concentration de CO<sub>2</sub> seuil qui permet à la flamme de se fixer dans une zone proche des trous de l'injecteur du brûleur. Cela indique que la zone de réaction du cœur de la flamme se déplace progressivement vers une zone proche des trous de l'injecteur du brûleur à mesure que du CO<sub>2</sub> est ajouté.

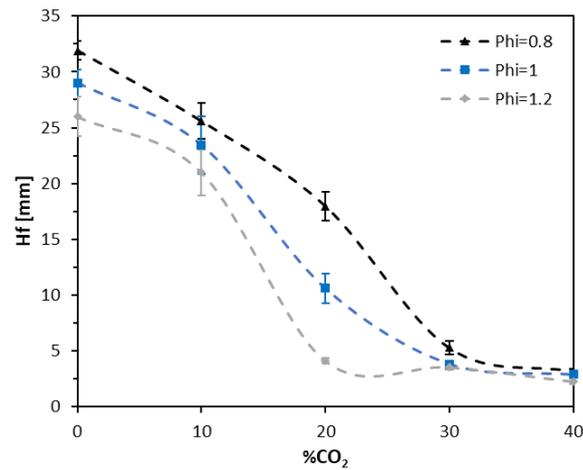
Dans le but de quantifier l'impact de l'ajout de CO<sub>2</sub> et de déterminer l'évolution de la longueur de flamme ( $L_f$ ) et de la hauteur d'accrochage ( $H_f$ ) à divers niveaux d'ajout de CO<sub>2</sub>,  $H_f$  et  $L_f$  ont été extraits à partir des images de chimiluminescence OH\*. La Figure III.5 montre l'évolution de  $H_f$  en fonction de la fraction de CO<sub>2</sub>. Les résultats montrent que  $H_f$  diminue considérablement avec l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible. La flamme est complètement attachée aux trous de l'injecteur pour des teneurs en CO<sub>2</sub> de 30 à 40 %, et après 40 % d'ajout de CO<sub>2</sub>, la flamme est progressivement soufflée au niveau des trous d'injecteur.

Ce résultat est inattendu car souvent l'ajout de CO<sub>2</sub> avec l'oxydant dans une flamme turbulente non-prémélangée entraîne une augmentation de la hauteur d'accrochage lorsqu'il est utilisé comme diluant dans un brûleur coaxial conventionnel [42], [99]. Cela suggère que les caractéristiques d'entraînement, la dynamique de l'écoulement et les taux de réaction chimique de la flamme de biogaz générées dans cette géométrie sont différents des flammes « classiques » turbulentes non-prémélangées CH<sub>4</sub>-air. Plusieurs facteurs influencent cette tendance. Tout d'abord, en raison de la configuration géométrique de l'injecteur de combustible qui est un injecteur radial, il existe un gradient radial significatif de la vitesse du jet de combustible près des orifices d'injection. Cette injection radiale agit comme un cross-flow [100] et pourrait ralentir l'écoulement permettant ainsi à la flamme de se stabiliser davantage proche du brûleur. Aravind et al. [101] ont rapporté le même résultat concernant cet effet stabilisateur du CO<sub>2</sub> sur une flamme partiellement prémélangée CH<sub>4</sub>-air au niveau d'un brûleur de turbine à gaz avec swirl. Ils expliquent que le combustible injecté peut agir comme un obstacle qui limite la capacité de l'air à se mélanger efficacement avec les gaz de recirculation. Par conséquent, la zone de recirculation peut devenir excessivement riche en combustible pour permettre la stabilisation de la flamme le long de la limite de la zone de recirculation. Dans de telles conditions, la flamme ne peut se stabiliser qu'en aval du point le plus étroit de la zone de recirculation.

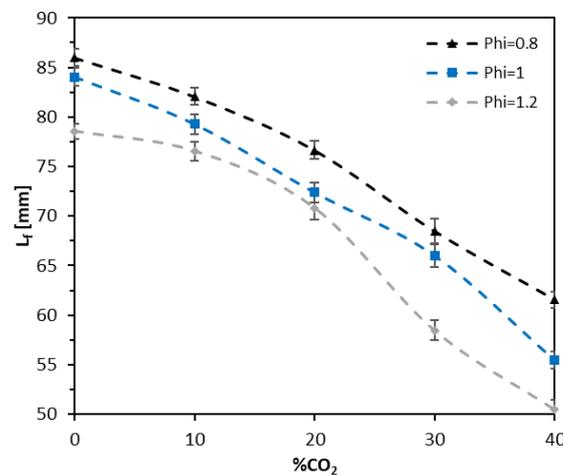
En outre, l'ajout de CO<sub>2</sub> a également un impact sur la longueur de la flamme ( $L_f$ ). La Figure III.6 montre l'effet de l'addition de CO<sub>2</sub> sur  $L_f$  dans des conditions de combustion à un nombre de swirl de 0.5 et différentes richesses globales ( $\Phi$ ) de 0.8, 1 et 1.2. Les résultats de la Figure III.6 montrent que  $L_f$  diminue généralement avec l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans le combustible. Par exemple, sans ajout de CO<sub>2</sub>,  $L_f$  est de 84 mm, tandis qu'avec 40 % de CO<sub>2</sub>,  $L_f$  diminue jusqu'au 55 mm à une richesse globale de 1, soit une diminution de 34.5 % de la longueur de flamme initiale.



**Figure III.4.** Images moyennes de la chimiluminescence  $\text{OH}^*$  en fonction du taux de  $\text{CO}_2$  dans le combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) avec un swirl de 0.5

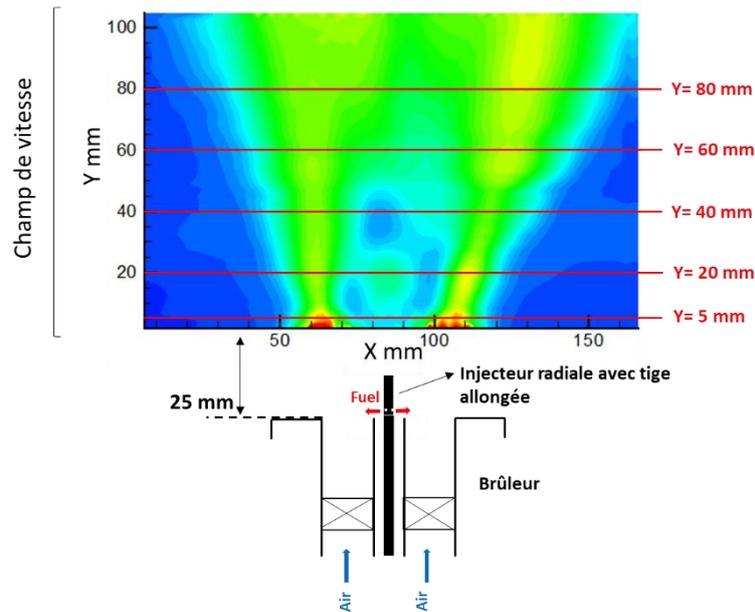


**Figure III.5.** Les hauteurs d'accrochage des flammes avec l'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) et un nombre de swirl fixe Sn=0.5.



**Figure III.6.** Les longueurs des flammes avec l'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) et un nombre de swirl fixe Sn=0.5.

Une étude exploratoire sur l'effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible sur la dynamique de l'écoulement réactif a été effectuée. La Figure III.7 illustre la localisation du champ de vitesses étudié par rapport à la sortie du brûleur. Le début de champ de vitesses est décalé de 25 mm de la sortie du brûleur à cause de la présence de la tige centrale et les électrodes qui ne permettait pas de générer la nappe laser dans cette zone. Les lignes colorées en rouge indiquent les positions d'extraction des profils de vitesse. Les positions indiquées pour l'extraction des profils de vitesse représentent les emplacements mesurés à partir du début des champs. Pour déterminer la position réelle à partir de la sortie du brûleur, il convient d'ajouter 25 mm.



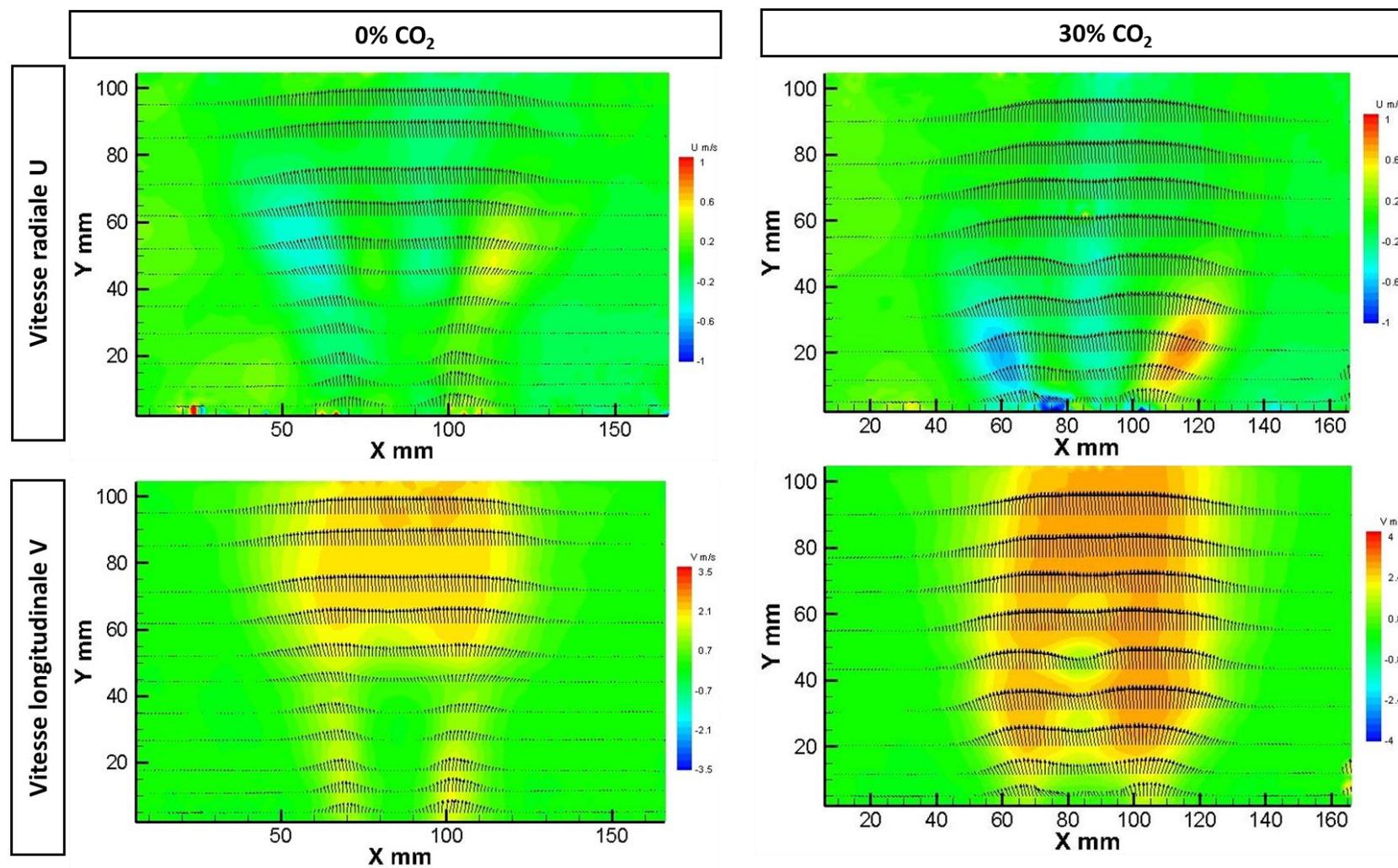
**Figure III.7.** Position du champ de vitesses par rapport à la sortie du brûleur à injection radiale avec tige allongée.

La Figure III.8 présente les champs moyens de la vitesse radiale  $U$  et la vitesse longitudinale  $V$ , accompagnés des vecteurs de vitesse pour les deux cas de mélange : 0 % de  $\text{CO}_2$  et 30 % de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, avec  $\Phi=0.8$  et  $\text{Sn}=0.5$ . Une observation majeure est que les vecteurs de vitesse augmentent significativement en longueur avec l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, particulièrement au sein de la zone de recirculation. Cette extension des vecteurs traduit une augmentation de vitesses associée à l'augmentation du débit combustible et au rapprochement de la flamme du nez du brûleur avec l'ajout de  $\text{CO}_2$ .

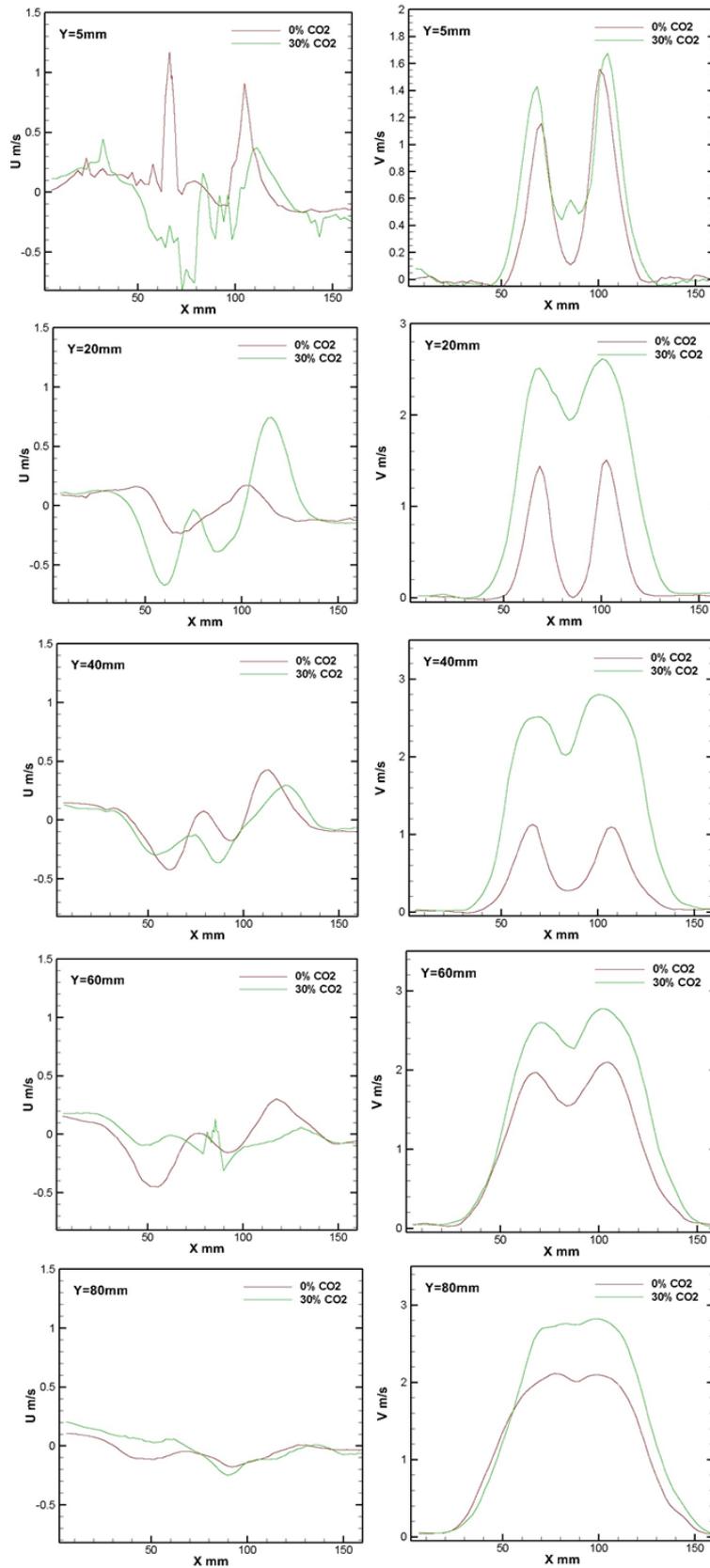
En ce qui concerne les vitesses moyennes, une tendance à la hausse est généralement observée pour les deux vitesses  $U$  et  $V$ . Les vitesses  $V$  connaissent une augmentation significative, suggérant une accélération du flux axial. D'après la Figure III.8, cette augmentation est très prononcée au sein de la zone de recirculation, indiquant un effet significatif de l'ajout de  $\text{CO}_2$  sur la structure du flux à cet endroit.

La Figure III.9 présente les profils de vitesse radiale  $U$  et longitudinale  $V$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour les deux cas de mélange : 0 % de  $\text{CO}_2$  (représenté en rouge) et 30 % de  $\text{CO}_2$  (en vert) dans le mélange de combustible avec  $\Phi=0.8$  et  $\text{Sn}=0.5$ .

L'ajout de  $\text{CO}_2$  n'a pas eu un impact significatif sur la vitesse radiale  $U$ , malgré l'injection de combustible contenant du  $\text{CO}_2$  de manière radiale à l'aide de l'injecteur. En revanche, en ce qui concerne la vitesse longitudinale, à toutes les hauteurs examinées, nous avons constaté une augmentation significative de la vitesse longitudinale avec l'ajout de 30 % de  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Cette augmentation peut être attribuée en partie à la modification de la hauteur d'accrochage de la flamme avec l'ajout de  $\text{CO}_2$ . Lorsque la flamme se rapproche davantage du brûleur et de la zone de recirculation, une augmentation locale de la température conduit à une accélération de l'écoulement en raison de l'expansion thermique des gaz.



**Figure III.8.** Champs de vitesse radiale U (en haut) et longitudinale V (en bas) pour les deux cas 0% CO<sub>2</sub> (à gauche) et 30% CO<sub>2</sub> (à droite) dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $Sn=0.5$

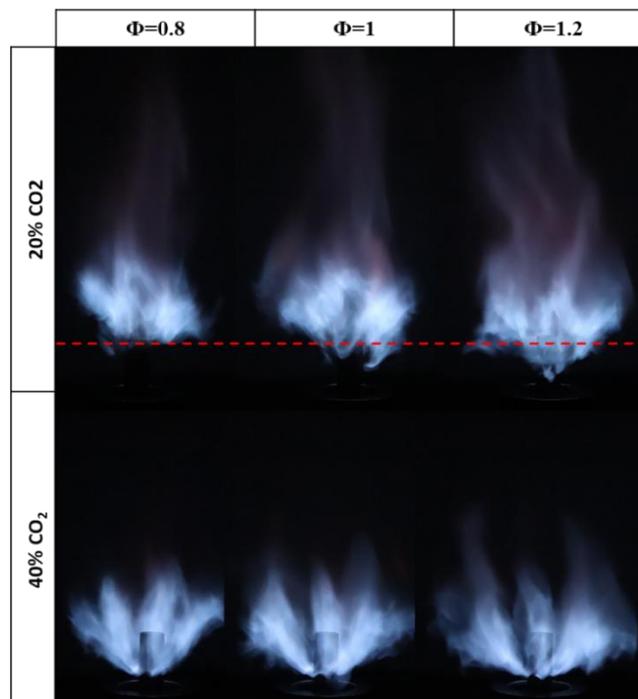


**Figure III.9.** Profils de vitesse radiale  $U$  (à gauche) et longitudinale  $V$  (à droite) à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour les deux cas  $0\% \text{CO}_2$  (en rouge) et  $30\% \text{CO}_2$  (en vert) dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $\text{Sn}=0.5$ .

### III.2.2.1.b. Effet de la richesse globale

L'effet de la richesse globale est un facteur important à prendre en compte dans la caractérisation de la flamme sans plasma. Dans cette section, nous allons examiner comment la richesse globale affecte la stabilité des flammes de biogaz et la formation des émissions polluantes. Notons que la richesse ici est considérée globalement à l'injection, car localement la richesse est très variée en fonction de l'endroit des réactifs et leur mélange.

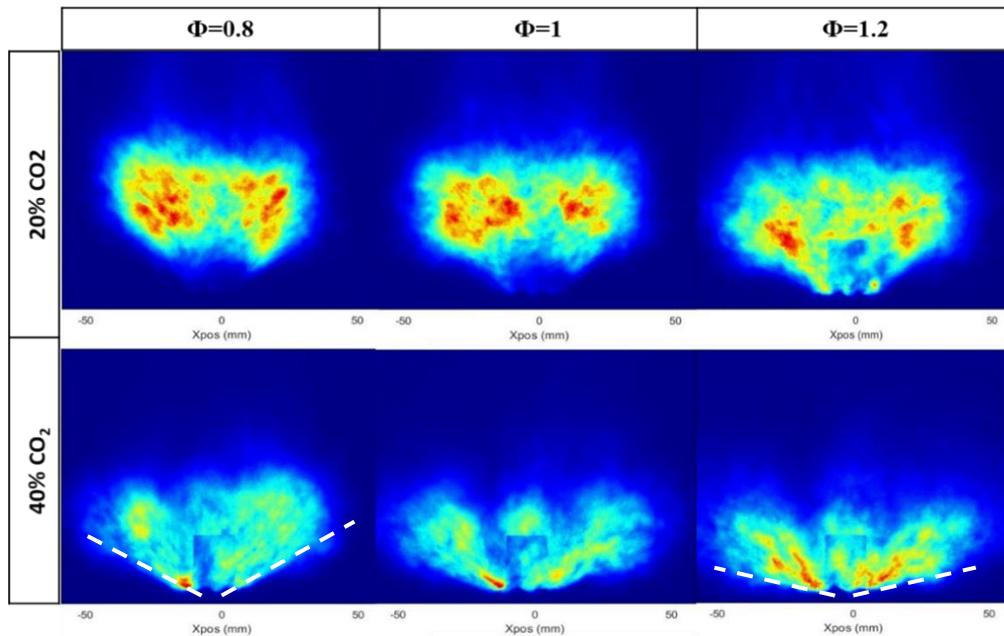
La Figure III.10 présente deux exemples de flammes de biogaz, une flamme liftée avec 20% CO<sub>2</sub> dans le combustible et une flamme accrochée au brûleur avec 40% CO<sub>2</sub>, pour trois différentes richesses globales (0.8, 1 et 1.2). Les résultats montrent que la hauteur d'accrochage diminue avec l'augmentation de la richesse pour le cas de la flamme liftée, tandis que pour le cas de la flamme accrochée, la flamme s'ouvre radialement sur les côtés au niveau des trous de l'injecteur (Figure III.11) et semble plus volumineuse.



**Figure III.10.** Photographies de deux cas de flammes de biogaz (20% CO<sub>2</sub> et 40% CO<sub>2</sub>) en fonction de la richesse globale avec un swirl  $S_n=0.5$ .

Les résultats de cette étude ont été confirmés par l'analyse de la chimiluminescence OH\* de la flamme, présentée dans la Figure III.11. Ces résultats montrent que la flamme devient plus stable et s'accroche à l'injecteur avec l'augmentation de la richesse globale. La diminution de la hauteur d'accrochage de la flamme liftée avec l'augmentation de la richesse est due à l'augmentation de la quantité du combustible disponible en sortie du brûleur.

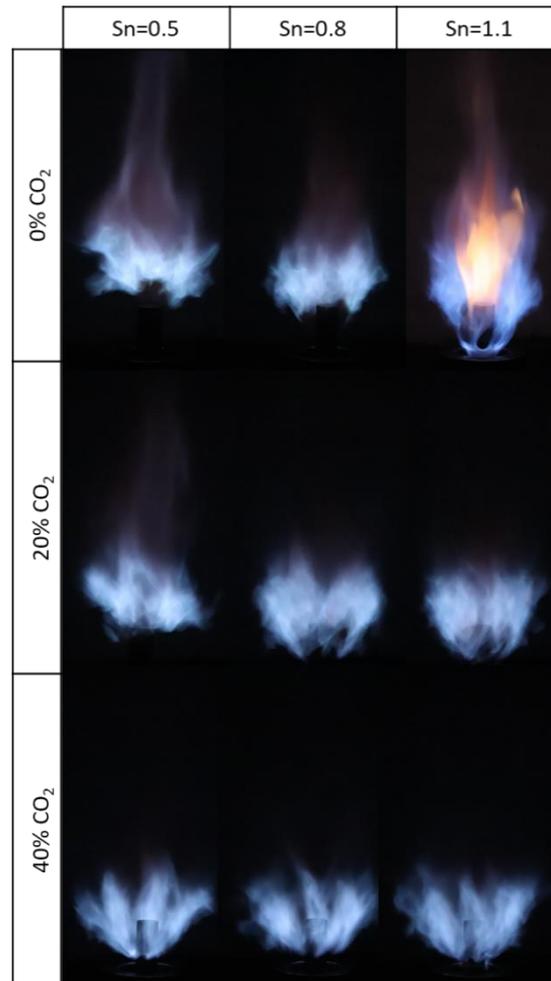
Cependant, il est important de noter que l'augmentation de la richesse ne garantit pas toujours une stabilité accrue de la flamme de diffusion. D'autres facteurs tels que la configuration du brûleur, la composition du mélange air-combustible, la turbulence et les interactions entre la flamme et le flux d'air peuvent également affecter la stabilité de la flamme.



**Figure III.11.** Images moyennes de la chimiluminescence  $\text{OH}^*$  en fonction de la richesse globale pour deux cas de flammes de biogaz (20%  $\text{CO}_2$  et 40%  $\text{CO}_2$ ) avec un swirl  $S_n=0.5$ .

### III.2.2.1.c. Effet de l'intensité de swirl

La Figure III.12 présente trois exemples de flammes qui illustrent l'effet du swirl sur celles-ci. Les flammes ont été générées à partir de combustibles contenant 0%, 20%, et 40% de  $\text{CO}_2$ , pour trois nombres de swirl différents : 0.5, 0.8 et 1.1 et une richesse globale fixe de 0.8. Les résultats montrent que l'ajout de swirl dans l'oxydant a un effet significatif sur la hauteur d'accrochage des flammes liftées. Pour le combustible ne contenant pas de  $\text{CO}_2$ , la hauteur d'accrochage diminue avec l'augmentation du nombre de swirl. L'ajout de swirl dans l'oxydant crée une turbulence qui favorise la stabilisation de la flamme près du brûleur, réduisant ainsi la hauteur d'accrochage. En revanche, pour le combustible contenant 20% de  $\text{CO}_2$ , la hauteur d'accrochage diminue également avec l'augmentation du nombre de swirl, mais la flamme s'accroche aux trous d'injection plutôt qu'au brûleur. Ainsi, lorsque l'oxydant est fortement swirlé, la flamme se stabilise à proximité des orifices d'injection, où l'air frais est plus abondant et où les conditions sont plus favorables pour maintenir la combustion. Enfin, pour le combustible contenant 40% de  $\text{CO}_2$ , la flamme reste accrochée à l'injecteur, quel que soit le nombre de swirl. Le  $\text{CO}_2$  réduit la vitesse de propagation des flammes, tandis que la turbulence favorise la stabilisation de la flamme à proximité de l'injecteur.



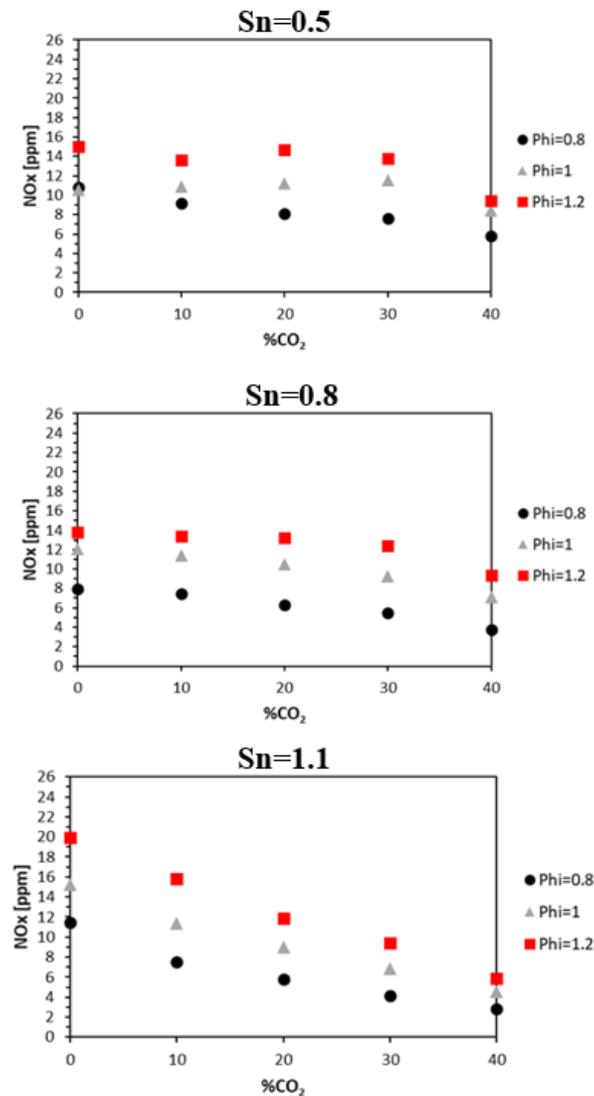
**Figure III.12.** Photographies de trois cas de flammes de biogaz (0% CO<sub>2</sub>, 20% CO<sub>2</sub> et 40% CO<sub>2</sub>) en fonction du nombre de swirl avec une richesse fixe à 0.8.

### III.2.2.2. Émissions polluantes

Les Figure III.13 et III.14 présentent respectivement les résultats de l'effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible sur les concentrations de NO<sub>x</sub> et de CO dans les gaz brûlés, pour des richesses globales différentes (0.8 ; 1 et 1.2) en utilisant 3 différents nombres de swirl (0.5, 0.8 et 1.1).

Figure III.13 montre que l'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible réduit les niveaux de NO<sub>x</sub> dans les gaz brûlés pour toutes les richesses étudiées. En particulier, à une richesse de 1, la teneur en NO<sub>x</sub> diminue de 11 à 7 ppm en augmentant le taux de CO<sub>2</sub> à 40 %, soit une réduction de 36 % de NO<sub>x</sub>. L'effet thermique de l'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible est responsable de la diminution des niveaux de NO<sub>x</sub>. Cet effet thermique diminue la température de la flamme, et donc le NO thermique, réduisant ainsi la production de NO<sub>x</sub>. La diminution de la température de la flamme entraîne une moindre émission de NO<sub>x</sub>, ce qui concorde avec le mécanisme de formation thermique de NO<sub>x</sub>. Les mêmes résultats d'émissions de CO et de NO<sub>x</sub> ont été rapportés par Zaidaoui et al. [48] dans le cas de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans l'air. En somme, l'ajout de CO<sub>2</sub> au

combustible peut être considéré comme une stratégie efficace pour réduire les émissions de  $\text{NO}_x$  dans les gaz brûlés.



**Figure III.13.** Émissions de  $\text{NO}_x$  en fonction des pourcentages d'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) et pour trois nombres de swirl (0.5, 0.8 et 1.1).

Il convient de noter que l'augmentation de la richesse entraîne également une augmentation des émissions de  $\text{NO}_x$  pour tous les swirls utilisés, comme le montre la Figure III.13. Par exemple, pour un nombre de swirl de 0.5, les émissions de  $\text{NO}_x$ , pour la flamme avec 0%  $\text{CO}_2$ , augmentent de 10.5 ppm à 15 ppm lorsque la richesse augmente de 0.8 à 1.2. L'augmentation des émissions de  $\text{NO}_x$  est principalement due à la forte température atteinte dans la flamme à des richesses globales élevées.

L'effet de swirl sur la production de  $\text{NO}_x$  dans les gaz brûlés a également été évalué. Les résultats présentés dans la Figure III.13 ont montré que l'augmentation du nombre de swirl a eu un effet sur la production de  $\text{NO}_x$ . Plus spécifiquement, nous avons observé que pour les

nombres de swirl  $S_n=0.5$  et  $S_n=0.8$ , l'effet sur la production de  $\text{NO}_x$  n'était pas significatif. Cependant, avec le passage à  $S_n=1.1$ , nous avons constaté une légère augmentation de la production de  $\text{NO}_x$  à 0% et 10% de  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Toutefois, à partir de 20% jusqu'à 40% de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, les émissions de  $\text{NO}_x$  diminuent avec l'augmentation du  $S_n$ . Par exemple, à 30% de  $\text{CO}_2$  et une richesse de 1.2, les émissions de  $\text{NO}_x$  ont diminué de 14 ppm à  $S_n=0.5$  pour atteindre 9 ppm avec  $S_n=1.1$ . Cette évolution peut s'expliquer par la réduction de la température de flamme induite par le swirl, conformément au mécanisme de Zeldovich. Cela s'explique principalement par un meilleur mélange avec les produits de combustion dans la zone de recirculation interne créée par les écoulements à fort swirl [102]. De plus, l'effet de réduction de  $\text{NO}_x$  avec l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible était plus important avec l'augmentation du nombre de swirl. Ainsi, l'ajout de  $\text{CO}_2$  avait un effet plus important sur la réduction de la production de  $\text{NO}_x$  à  $S_n=1.1$  par rapport à  $S_n=0.5$  et  $S_n=0.8$ .

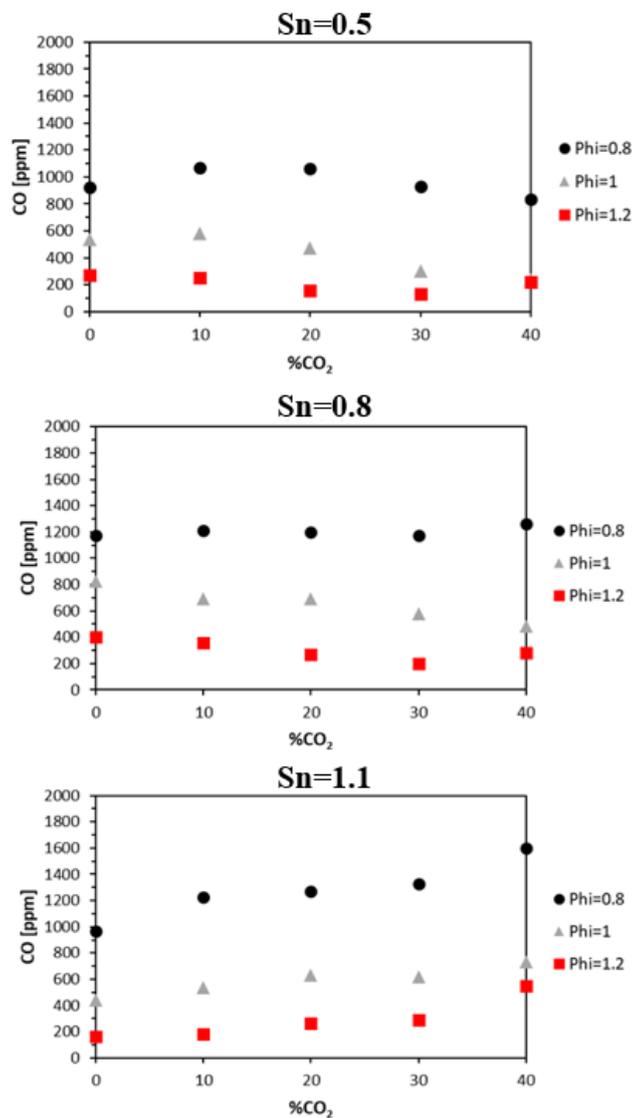
En termes de production de CO, la production de CO est favorisée dans les régions avec une concentration élevée de combustible, des températures basses et une faible concentration d'air, ce qui réduit la vitesse de réaction d'oxydation du CO en  $\text{CO}_2$  [103]. La Figure III.14 montre que les niveaux de CO augmentent avec l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Par exemple, dans des conditions stœchiométriques, la teneur en CO dans les gaz brûlés augmente de 530 ppm à 616 ppm avec une augmentation de 40 % de la concentration de  $\text{CO}_2$ , ce qui représente une augmentation de 16 % des émissions de CO. Cela s'explique par le fait que le  $\text{CO}_2$  agit comme un diluant dans le mélange de combustible, réduisant la disponibilité d'oxygène et conduisant par conséquent à une combustion incomplète, ce qui augmente les émissions de CO. L'ajout de  $\text{CO}_2$  au mélange de combustible favorise également des températures plus basses, ce qui peut favoriser la formation de CO en raison de l'extinction de la réaction d'oxydation, entraînant ainsi des niveaux plus élevés de CO dans certaines régions de la flamme [103].

La Figure III.14 montre également une réduction des émissions de CO avec l'augmentation de la richesse globale. La teneur en CO dans les gaz brûlés diminue de 921 à 273.5 ppm pour une augmentation de richesse de 0.8 à 1.2 pour le cas de flamme avec 0%  $\text{CO}_2$ , ce qui représente une diminution de 70.3 % du CO. Cela est dû au comportement différent de la flamme lorsque la richesse globale augmente, devenant plus stable avec beaucoup moins d'émissions de CO. Dans nos expériences, la stabilité de la flamme a été évaluée en analysant la hauteur d'accrochage et la distribution d' $\text{OH}^*$  dans les flammes. Comme illustré la Figure III.5, la hauteur d'accrochage diminue avec l'augmentation de la richesse globale. L'effet de la richesse sur la stabilité de la flamme est lié à l'équilibre entre le combustible et l'oxydant dans le processus de combustion.

L'effet de swirl sur la production de CO a également été examiné. Les résultats montrent que pour les nombres de swirl  $S_n=0.5$  et  $S_n=0.8$ , l'effet sur la production de CO n'était pas significatif. Cependant, avec le passage à  $S_n=1.1$ , nous avons constaté une réduction significative de la production de CO. En général, l'augmentation du nombre de swirl peut réduire la production de CO, car cela favorise une combustion plus complète en augmentant le mélange entre le combustible et l'oxydant et aussi le temps de séjour à l'intérieur de la zone de réaction, ce qui favorise la conversion du CO en  $\text{CO}_2$ . De plus, l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le

combustible a également eu un effet sur la production de CO comme mentionné dans la section précédente, mais cet effet a différé en fonction du nombre de swirl. Pour  $Sn=0.5$ , nous avons observé une légère diminution de la production de CO avec l'ajout de  $CO_2$ . Cependant, pour  $Sn=0.8$  et  $Sn=1.1$ , nous avons observé une augmentation de la production de CO avec l'ajout de  $CO_2$ .

Il est important de noter que ces effets sont spécifiques aux conditions de combustion étudiées dans cette étude et que d'autres paramètres tels que la composition du combustible, la température et la pression peuvent également affecter la production de CO.



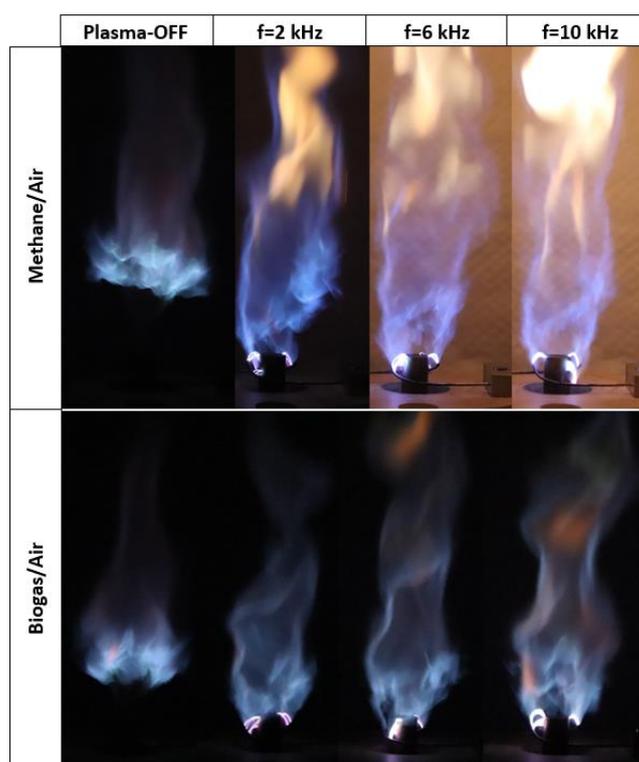
**Figure III.14.** Émissions de CO en fonction des pourcentages d'ajout de  $CO_2$  dans le combustible pour trois richesses globales différentes (0.8, 1 et 1.2) et pour trois nombres de swirl (0.5, 0.8 et 1.1).

### III.2.3. Combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant

La combustion de biogaz présente des défis en termes de stabilité de flamme et d'émissions polluantes, qui peuvent être aggravés par l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Pour surmonter ces défis, l'utilisation de la combustion assistée par plasma à arc glissant a été étudiée. Dans cette section, nous allons étudier les effets du plasma sur la stabilité et les émissions polluante des flammes de biogaz ainsi que les espèces détectées pour différentes conditions de flamme et du plasma grâce à la spectroscopie d'émission optique.

#### III.2.3.1. Effet du plasma sur la stabilité et les émissions polluantes

La Figure III.15 présente des photographies des flammes de méthane et de biogaz (80%  $\text{CH}_4$ -20%  $\text{CO}_2$ ) à différentes fréquences de répétition d'impulsion. La richesse globale a été maintenue à 0.8 lors des expériences de combustion assistée par plasma. Le temps d'exposition de la caméra était de 1/125 s et la tension électrique appliquée (IEV) était fixée à 10.5 kV. On peut observer que le comportement de la flamme, sa couleur, sa forme et la hauteur de d'accrochage ont été modifiés en présence du plasma impulsif microseconde (MPP) et par l'augmentation de la fréquence de répétition des impulsions (PRF).



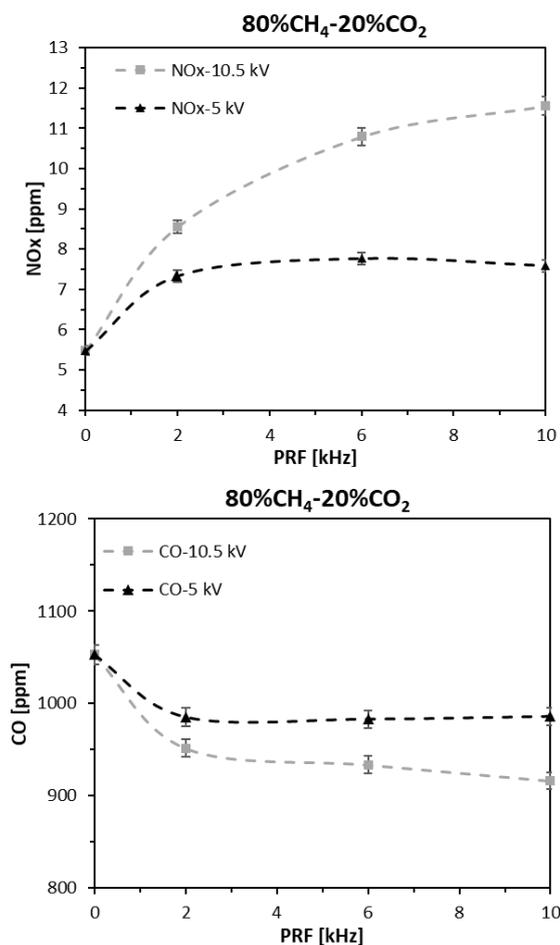
**Figure III.15.** Photographies des flammes de méthane/air et biogaz/air dans deux cas, avec et sans activation du plasma, à différentes fréquences de répétition d'impulsions (2 kHz, 6 kHz et 10 kHz).

Il y a eu un effet notable sur la luminosité visible de la flamme lorsque la décharge plasma était activée. Visuellement, la flamme semblait être plus longue, plus proche du brûleur et avec une

luminosité plus jaune/orangée. Ces résultats peuvent être attribués à plusieurs facteurs. L'augmentation de la libération de chaleur par le plasma peut entraîner une flamme plus longue et plus proche du brûleur [104], ainsi qu'une luminosité plus jaune/orangée due à une température de flamme plus élevée et même probablement à une augmentation des suies. Dans l'annexe C, une étude préliminaire a été réalisée pour évaluer l'impact du plasma sur la formation de suies. La modification de la composition chimique de mélange par le plasma peut également le rendre plus réactif et plus facile à allumer, conduisant à une flamme plus stable, comme cela a été rapporté dans [105].

Bien que les mécanismes sous-jacents soient complexes, tous ces facteurs jouent un rôle dans les modifications observées de la flamme. Ces résultats ont clairement démontré que le MPP est un bon moyen pour stabiliser la flamme et de réduire sa hauteur d'accrochage. Dans ces expériences, les flammes ont été contrôlées simplement en modifiant la PRF du plasma sans modifier les configurations géométriques, il s'agit d'un contrôle actif de la combustion.

La Figure III.16 présente les résultats de l'analyse des émissions des NO<sub>x</sub> et CO à différentes PRFs et IEV. Chaque mesure a été effectuée cinq minutes après la condition mise en place pour garantir un écoulement stable dans la chambre de combustion et les analyseurs de gaz. Ainsi, les concentrations présentées ici correspondent à la concentration moyenne mesurée pendant ces cinq minutes.



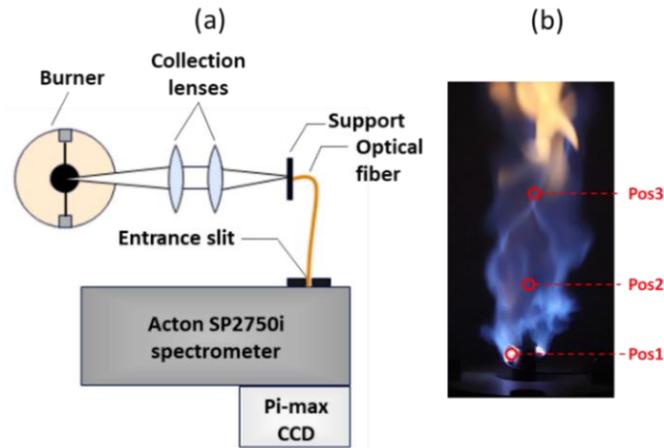
**Figure III.16.** Émissions de NO<sub>x</sub> et CO d'une flamme du biogaz (80% CH<sub>4</sub>-20% CO<sub>2</sub>)/air avec PRF à différentes tensions IEV (5 kV et 10.5 kV).

Le CO a diminué de 13% de 1053 à 916 ppm lorsque la PRF est passée de 0 à 10 kHz à une tension de 10.5 kV. La réduction des émissions de CO est due à une combustion plus complète du combustible et à une amélioration de la conversion du CO en CO<sub>2</sub> avec le plasma. L'activation du plasma entraîne une production accrue de radicaux et d'espèces excités, tels que OH, O et H, ainsi qu'un craquage plus important des hydrocarbures. Cela conduit à une oxydation plus rapide du CO en CO<sub>2</sub>. L'oxydation du CO est très lente en l'absence de petites quantités de H<sub>2</sub> ou de H<sub>2</sub>O. L'oxydation plus forte du CO est probablement due à la concentration en OH, qui est connue pour être la plus efficace pour libérer de la chaleur [67].

Les résultats de la Figure III.16 indiquent que les émissions de NO<sub>x</sub> peuvent augmenter avec l'activation du plasma. Lorsque la fréquence du plasma passe de 0 à 10 kHz à une tension fixe de 10.5 kV, le taux de NO<sub>x</sub> augmente de 5,5 ppm à 11.5 ppm, ce qui reste significativement très bas. L'augmentation des émissions de NO<sub>x</sub> est probablement liée à l'augmentation de la température locale causée par le plasma. Ainsi, la génération de quantités significatives de radicaux N\* et O\* par le plasma est discutée dans la section suivante. À une puissance du plasma plus élevée, les taux de formation de NO\* à partir d'oxygène atomique et de divers états excités de N<sub>2</sub>\* augmentent, ce qui entraîne une augmentation des émissions de NO<sub>x</sub>.

### III.2.3.2. Spectroscopie d'émission optique

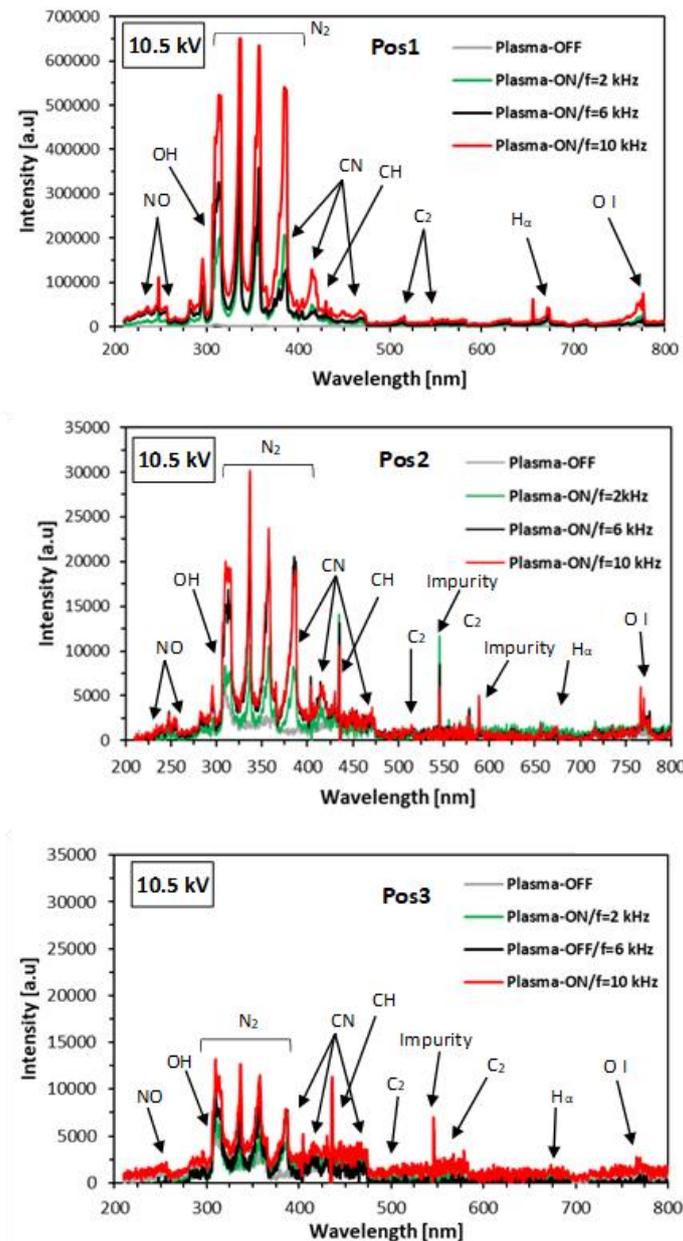
Dans cette section, nous allons étudier l'effet des paramètres du plasma sur les espèces émises lors de la combustion assistée par plasma à arc glissant de biogaz. Cette analyse permettra de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans les résultats précédemment obtenus. Dans cette étude, un système de spectroscopie d'émission optique (SEO) a été utilisé pour enregistrer les spectres d'émission optique de la combustion assistée par plasma. Le système était composé d'un spectromètre Acton Research Corporation SP2750i avec une plage de longueur d'onde de 210 à 810 nm, et d'une caméra intensifiée (ICCD, Princeton Instrument). Les positions d'acquisition de ce système sont illustrées dans la Figure III.17. Les détails de ce système ont été discutés dans le chapitre II "dispositif expérimental et techniques de mesure" dans la section II.3.4.2.



**Figure III.17.** (a) Dispositif expérimental pour la spectroscopie d'émission optique, (b) Positions d'acquisition de spectres.

#### III.2.3.2.a. Effet de la fréquence de répétition des impulsions

La Figure III.18 présente des spectres d'émission optique du MPP et de la flamme, présent à différentes positions d'acquisition (Pos1, Pos2 et Pos3) sans et avec activation du plasma à différentes fréquences de répétition d'impulsions.



**Figure III.18.** Spectres d'émission optique (SEO) dans une flamme de 80% CH<sub>4</sub>-20% CO<sub>2</sub>/air assistée par MPP. Les mesures ont été effectuées à trois positions de vue différentes, nommées Pos1, Pos2 et Pos3, et à différentes fréquences de répétition du plasma.

Les pics spectraux typiques de la combustion pour la flamme hydrocarbure-air (CH\* et OH\*) ont été identifiés dans les spectres, avec ou sans activation du plasma. Entre 300 et 450 nm, l'émission d'OH\* est difficile à distinguer des bandes du système de second positif de l'azote N<sub>2</sub> avec une émission la plus intense à 337.1 nm. Toutefois, les bandes moléculaires de l'oxyde nitrique NO\*, l'émission atomique de l'oxygène O\* et la ligne de Balmer de l'hydrogène H<sub>α</sub>\* sont détectées avec l'activation du plasma, alors qu'elles ne l'ont pas été sans plasma. Ces caractéristiques montrent que les décharges MPP dissocient le combustible, l'O<sub>2</sub>, le N<sub>2</sub>, et éventuellement CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O [106].

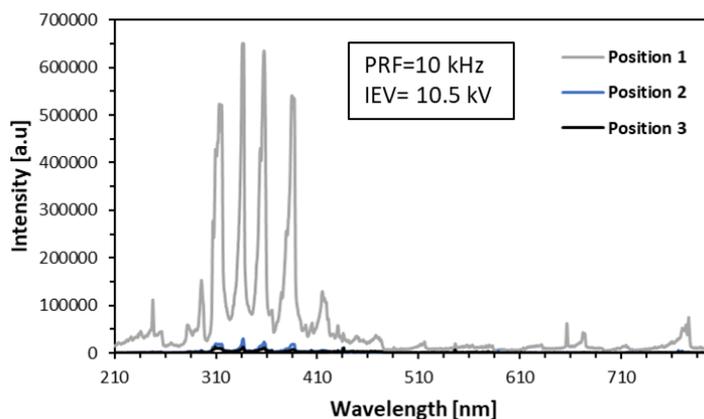
L'effet de la PRF sur les intensités des spectres est un phénomène important dans cette étude. En effet, on peut observer que les intensités d'émission des espèces augmentent avec la PRF. Cela s'explique par le fait que l'activation de MPP permet une dissociation plus efficace des molécules et des atomes impliqués dans la combustion, augmentant ainsi leur concentration dans le plasma. De plus, la répétition d'impulsions à haute fréquence permet de maintenir cette concentration de particules excitées pendant une plus longue période de temps, ce qui augmente la probabilité de collision et d'excitation des espèces présentes dans la flamme. En conséquence, cela conduit à une augmentation de l'intensité des pics spectraux typiques de la combustion, ainsi que des bandes moléculaires de l'oxyde nitrique  $\text{NO}^*$ , l'émission atomique de l'oxygène  $\text{O}^*$  et la ligne de Balmer de l'hydrogène  $\text{H}_\alpha^*$ . Cette augmentation de l'intensité des spectres montre bien l'influence du MPP sur les espèces chimiques intervenant dans les zones de réaction et sur l'assistance de la combustion.

Pour mieux comprendre l'effet du MPP sur les différentes espèces, certains groupes de longueurs d'onde ont été observés séparément à Pos2 dans les Figures III.21-III.24.

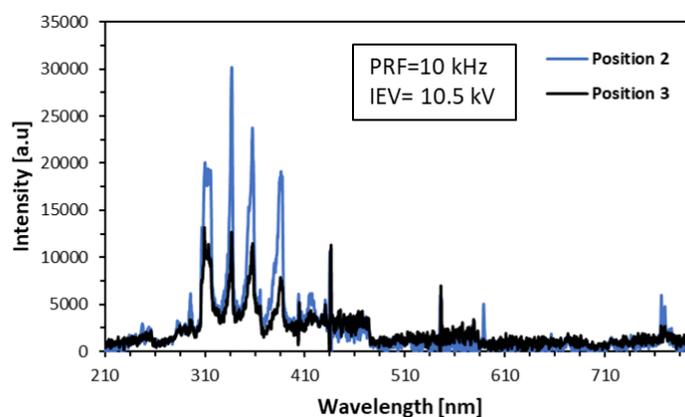
### III.2.3.2.b. Effet de la position d'acquisition du spectre d'émission

Dans cette étude, nous avons considéré trois positions d'acquisition différentes, comme illustré dans la Figure III.17, Pos 1 dans le plasma, Pos 2 à la base de la flamme et Pos3 dans la flamme, mais à une position plus élevée que Pos 2. Nos résultats ont montré que la détection des espèces émises par le plasma était plus facile à Pos1, qui est entre les électrodes au niveau de décharge plasma. Cependant, à mesure que la position d'acquisition s'éloigne de la zone de décharge plasma, les espèces émises par le plasma ont tendance à s'atténuer progressivement, comme le montre la Figure III.18.

La Figure III.19 présente les spectres d'émission optique dans une flamme de 80%  $\text{CH}_4$ -20%  $\text{CO}_2$ /air assistée par MPP, mesurés à trois positions d'acquisition différentes, nommées Pos1, Pos2 et Pos3, à PRF fixé à 10 kHz et IEV à 10.5 kV. Les émissions optiques des espèces générées dans le plasma diminuent en intensité à mesure que la position d'acquisition s'éloigne de la zone de décharge plasma. Les spectres d'émission optique dans une flamme de 80%  $\text{CH}_4$ -20%  $\text{CO}_2$ /air assistée par MPP à Pos2 et Pos3, à PRF fixé à 10 kHz et IEV à 10.5 kV sont présentés dans la Figure III.20. Ces mesures ont permis de distinguer plus clairement les émissions optiques à différentes positions dans la flamme. Nous avons également constaté que les émissions optiques de la flamme diminuent en intensité à mesure que la position d'acquisition s'éloigne de la base de la flamme.



**Figure III.19.** Spectres d'émission optique dans une flamme de 80% CH<sub>4</sub>-20% CO<sub>2</sub>/air assistée par MPP. Les mesures ont été effectuées à trois positions d'acquisition différentes, nommées Pos1, Pos2 et Pos3, à PRF fixé à 10 kHz et IEV à 10.5 kV.



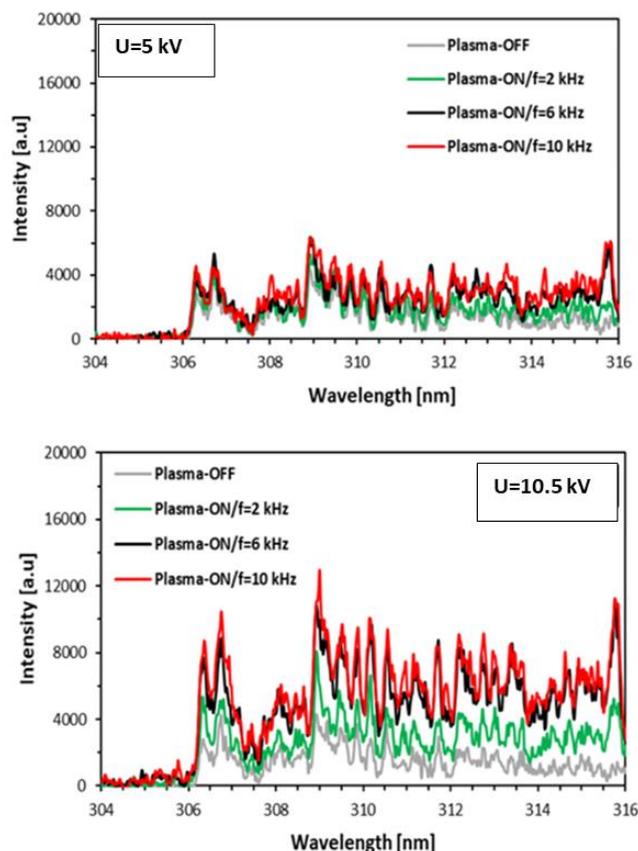
**Figure III.20.** Spectres d'émission optique dans une flamme de 80% CH<sub>4</sub>-20% CO<sub>2</sub>/air assistée par MPP. Les mesures ont été effectuées à deux positions d'acquisition différentes, nommées Pos2 et Pos3, à PRF fixé à 10 kHz et IEV à 10.5 kV.

### III.2.3.2.c. Etude des espèces détectées

Pour étudier davantage l'effet du plasma et l'influence des paramètres du plasma sur les espèces réactives émises, nous avons examiné l'impact sur certaines espèces présentes avant et après l'activation du plasma, telles que l'OH\* et le radical CH\*, ainsi que les espèces détectées après l'activation du plasma, notamment l'oxygène atomique (O\*).

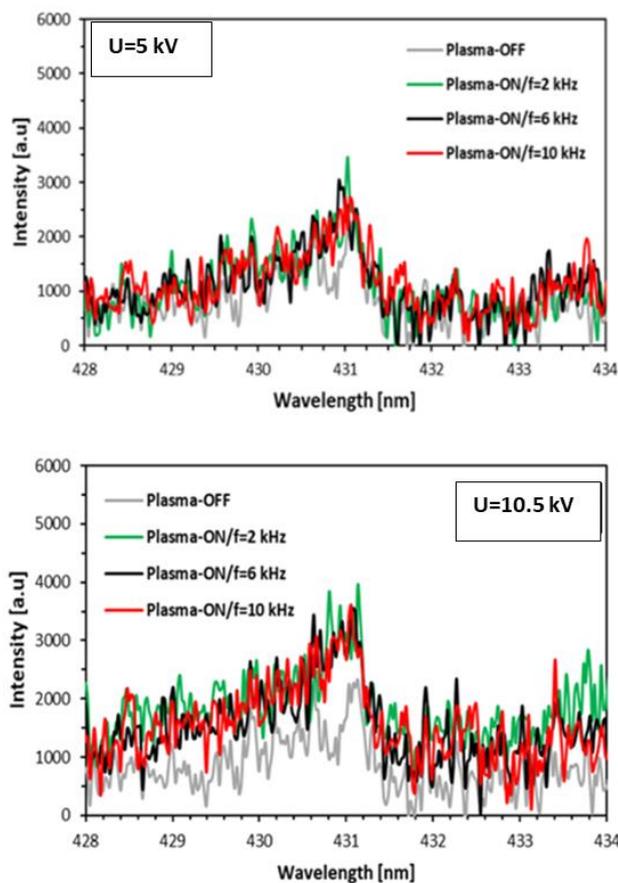
La Figure III.21 montre une bande spectrale OH\* à 309 nm. En augmentant l'IEV et le PRF du plasma, une augmentation appréciable de l'intensité OH\* a été observée. Cependant, pour les valeurs IEV inférieures à 10.5 kV, il n'y avait pas de changement typique de l'intensité en fonction de la fréquence de répétition d'impulsion. Le maximum de l'intensité du signal d'OH\* (309 nm / 306.5 nm) à une PRF de 10 kHz a triplé avec la tension de 10.5 kV comparé au cas sans plasma. Ces résultats sont importants pour l'amélioration de la combustion et d'autant plus révélateur que OH est un radical clé impliqué dans de nombreux processus de combustion, tels que l'initiation et la propagation de la flamme. L'utilisation de la décharge

plasma pour produire ou amplifier des espèces réactives telles que  $\text{OH}^*$  peut potentiellement améliorer l'efficacité de la combustion en augmentant le taux de réaction.



**Figure III.21.** SEO de  $\text{OH}^*$  dans la plage 304-316 nm à Pos2 sans et avec plasma à trois différentes PRFs pour deux tensions IEV différentes (5 kV et 10.5 kV).

Dans la Figure III.22, on observe que l'intensité de l'émission  $\text{CH}^*$  (431 nm) augmente avec l'activation du plasma. Cependant, à IEV fixé et pour une augmentation supplémentaire de fréquence, l'intensité de l'émission  $\text{CH}^*$  reste presque stable, ce qui signifie que le PRF n'a pas d'effet sur l'intensité d'émission  $\text{CH}^*$ . Ce phénomène peut être attribué à une combinaison de facteurs qui affectent les réactions chimiques se produisant dans la zone de combustion. L'un de ces facteurs est la stabilité thermique du système réactionnel, qui peut influencer l'énergie d'activation et la cinétique des réactions. De plus, le temps de séjour des réactifs dans la zone de combustion, ainsi que l'équilibre entre la production et la destruction de  $\text{CH}$ , peut également jouer un rôle dans la détermination de l'intensité de cette espèce, comme rapporté par Ju et Sun [68]. Comparée à l'impact du plasma sur  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$  augmente lentement avec l'activation du plasma. Le MPP provoque une production importante d' $\text{OH}$  sans générer plus d'autres radicaux libres [107], tels que  $\text{CH}^*$ .



**Figure III.22.** SEO de CH\* dans la plage 428-434 nm à Pos2 sans et avec plasma à trois différentes PRFs avec deux tensions IEV différentes (5 kV et 10.5 kV).

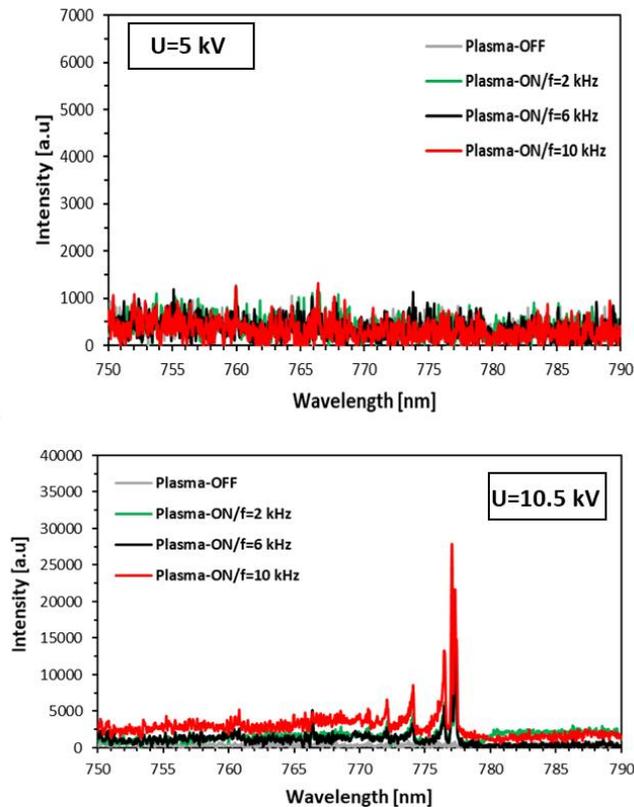
Bien que l'oxygène soit présent dans toutes les positions d'acquisition, notre spectromètre présente une réponse plus faible dans le rouge, ce qui pose une difficulté générale pour détecter l'oxygène atomique dans les spectres de la flamme. En revanche, dans l'air ambiant, l'émission de l'oxygène atomique est clairement visible, sans aucun élément pour la masquer.

Dans la plage de longueurs d'onde 750-790 nm, la raie spectrale de l'oxygène atomique O\* a été détectée, comme indiqué dans la Figure III.23. Les résultats ont montré que la fréquence de répétition de l'impulsion et la tension appliquée ont un effet significatif sur l'amplitude de l'intensité de O\*. En effet, il a été constaté que l'intensité de O\* augmentait avec l'augmentation de PRF et de la tension. La production d'atomes d'oxygène peut se produire par la dissociation de l'oxygène moléculaire O<sub>2</sub> grâce à l'impact électronique ou aussi à l'excitation de N<sub>2</sub> qui domine complètement les spectres avec l'activation du plasma, comme le montre la Figure III.18 :



Les atomes d'oxygène sont connus pour leur grande influence dans l'amélioration de la combustion, car ils transfèrent de l'énergie au gaz et contribuent considérablement à améliorer l'allumage.

En effet, toutes ces espèces étudiées jouent un rôle majeur dans l'amélioration de la combustion, en particulier  $O^*$  et  $OH^*$ , qui sont bien connus pour leur rôle dans l'initiation de la combustion.



**Figure III.23.** SEO de  $O^*$  dans la plage de 750-790 nm sans et avec plasma à Pos1 à trois différentes PRFs avec deux tensions IEV différentes (5 kV et 10.5 kV).

### III.2.3.3. Effet du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif

Avant d'aborder les résultats, il est important de souligner que la Figure III.12 (vu précédemment) présente la localisation du champ de vitesses par rapport à la sortie du brûleur, ainsi que les positions précises auxquelles les profils de vitesse et fluctuations ont été obtenus.

La Figure III.24 présente les champs moyens de vitesses radiale  $U$  et longitudinale  $V$  (en échelle de couleurs) avec le champ de vecteurs résultant de la combinaison des deux vitesses. Cette étude est effectuée pour la flamme sans  $CO_2$  (0%  $CO_2$ ) ajouté au combustible avec  $\Phi=0.8$  et  $Sn=0.5$  (voir Tableau II.5). Les résultats sont présentés pour deux conditions : sans plasma (Plasma OFF) et avec plasma (Plasma ON) à une fréquence de  $f=10$  kHz et une tension de 10.5 kV.

Les vecteurs vitesses exhibent des caractéristiques distinctes en réponse à l'activation du plasma. Dans la partie annulaire (swirlée), on observe une légère augmentation de la taille des vecteurs lorsque le plasma est activé. La zone de recirculation centrale (ZRC) semble très faiblement affectée par la présence du plasma, hormis le champ proche où la vitesse est légèrement plus élevée avec plasma ON.

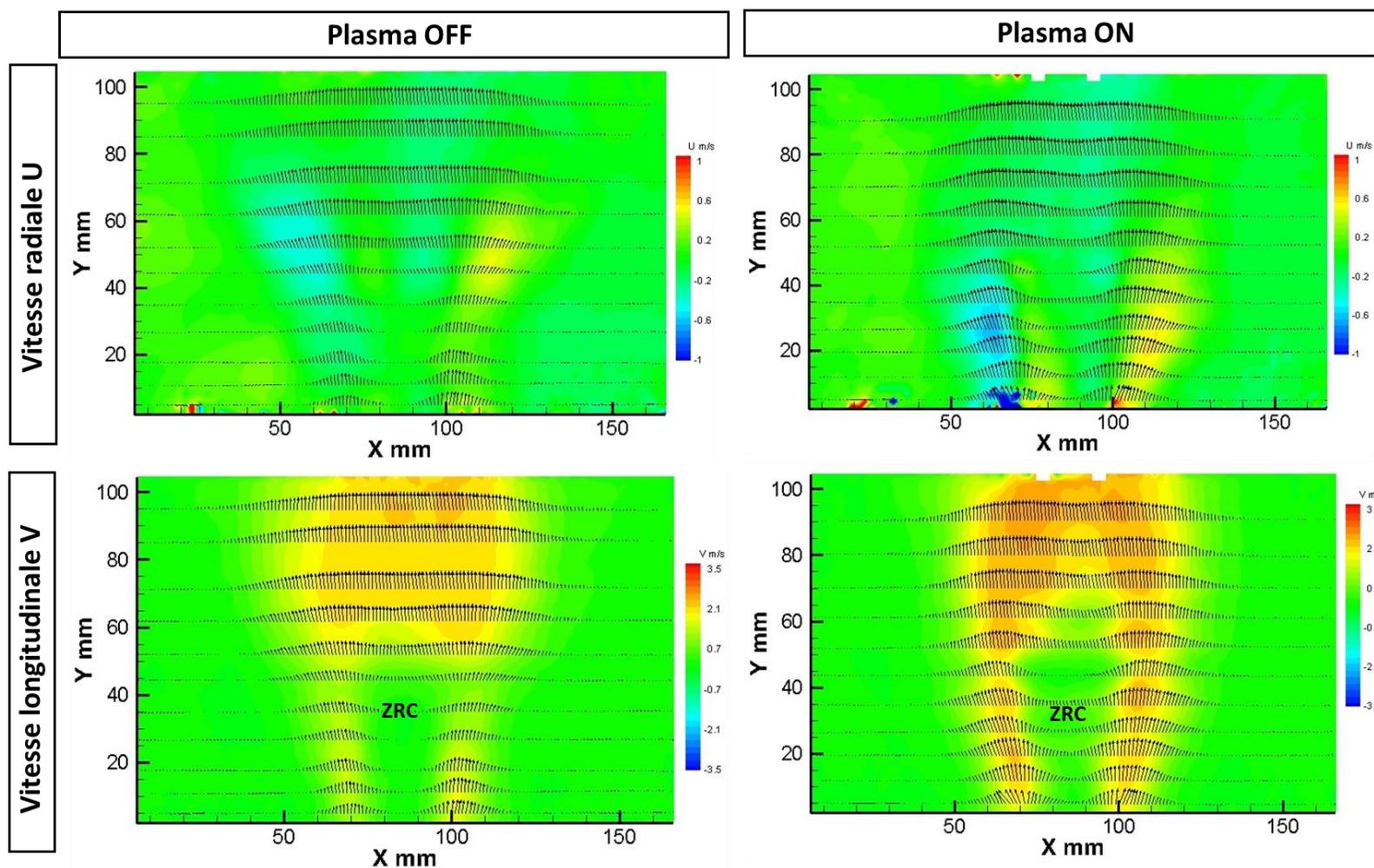
Il convient de noter que le débit d'air prédomine sur le débit de combustible injecté radialement, ce qui conduit à un écoulement axial dominant. Cependant, dans cette configuration de brûleur où l'injection de combustible est radiale, la composante de vitesse radiale ( $U$ ) peut être importante. Nous verrons la différence dans le cas d'injection axiale du combustible dans le prochain chapitre. D'après la Figure III.24, on peut constater que l'emplacement où la vitesse radiale est plus élevée (même si cela reste faible) change en fonction de l'activation du plasma. En l'absence d'activation du plasma, la vitesse  $U$  était plus élevée à des hauteurs éloignées du brûleur, tandis qu'avec l'activation du plasma, cette vitesse se déplace vers la sortie du brûleur. Autrement dit, l'activation du plasma semble influencer le champ de vitesses de l'écoulement réactif à proximité du brûleur, entraînant un changement dans la répartition de la vitesse radiale.

En ce qui concerne la vitesse longitudinale, il a été observé que la présence du plasma entraîne une augmentation relativement importante de  $V$ , en particulier le long des côtés, notamment dans la partie annulaire de l'écoulement. Cette observation suggère que la présence du plasma a un effet direct sur l'écoulement ce qui peut influencer le comportement de la flamme.

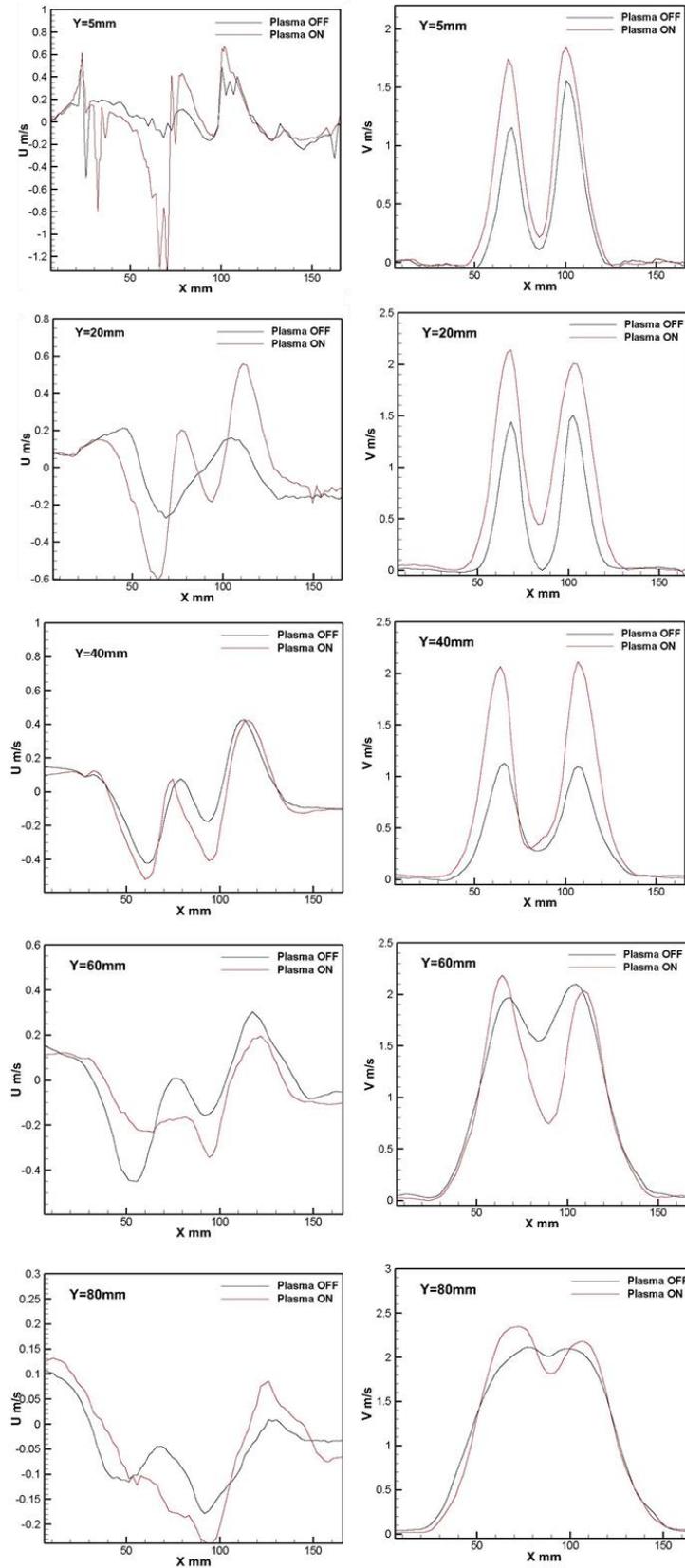
Les profils de vitesses  $U$  et  $V$  à différentes hauteurs  $Y$  (5, 20, 40, 60 et 80 mm), extraits à partir de ces champs de vitesses, ont été regroupés dans la Figure III.25. On peut observer que les régions à proximité immédiate du brûleur semblent présenter une vitesse radiale plus élevée lorsque le plasma est actif. Cependant, à mesure que l'on s'éloigne du brûleur en suivant l'axe  $Y$ , l'effet du plasma semble diminuer car on s'éloigne de la source de la décharge.

On remarque aussi une augmentation non négligeable de la vitesse  $V$  en réponse du plasma. En effet, à  $Y=40$  mm, le maximum de  $V$  (2 contre 1 m/s) est doublé lorsque le plasma est activé. L'augmentation des vitesses proche du brûleur est peut-être dû à l'effet thermique causé par la présence du plasma.

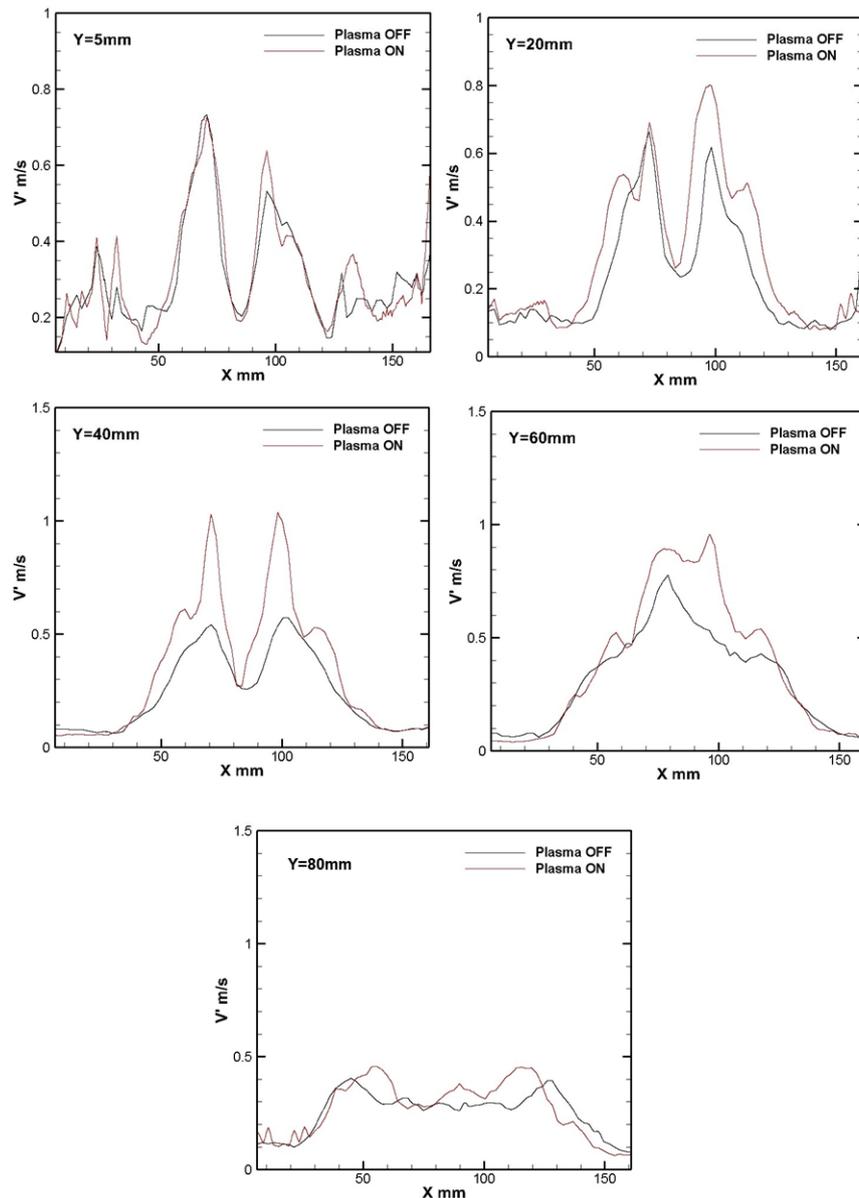
Dans notre étude, nous avons également examiné les fluctuations de vitesse à travers le RMS (Root Mean Square), qui est une valeur représentative de l'amplitude des variations de vitesse. La Figure III.26 présente les profils des fluctuations de vitesse longitudinales ( $V'$ ) à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas où le mélange ne contient pas de  $\text{CO}_2$  (0%  $\text{CO}_2$ ), avec  $\Phi=0.8$  et  $\text{Sn}=0.5$  dans les deux cas sans et avec plasma. D'après ces résultats, on peut constater que les fluctuations de vitesse longitudinale  $V'$  ne sont que marginalement influencées par le plasma à proximité du brûleur ( $Y=5$  mm et  $Y=20$  mm), où il n'y a pratiquement aucune différence observable. Cependant, à des distances plus éloignées de la sortie du brûleur, spécifiquement à  $Y=40$  mm et  $Y=60$  mm, une légère augmentation de  $V'$  a été remarquée avec l'activation du plasma.



**Figure III.24.** Champs moyens de vitesses (en échelle de couleurs) radiale U (en haut) et longitudinale (en bas) avec le champ des vecteurs issus de la composition des deux vitesses pour le cas 0% CO<sub>2</sub> dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $S_n=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et IEV= 10.5 kV.



**Figure III.25.** Profils de vitesse radiale  $U$  (à gauche) et longitudinale (à droite) à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $0\%$   $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.



**Figure III.26.** Profils de fluctuations de vitesse longitudinale  $V'$  à différentes hauteurs ( $Y=5$ , 20, 40, 60, 80 et 100 mm) pour le cas 0%  $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $S_n=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $IEV=10.5$  kV.

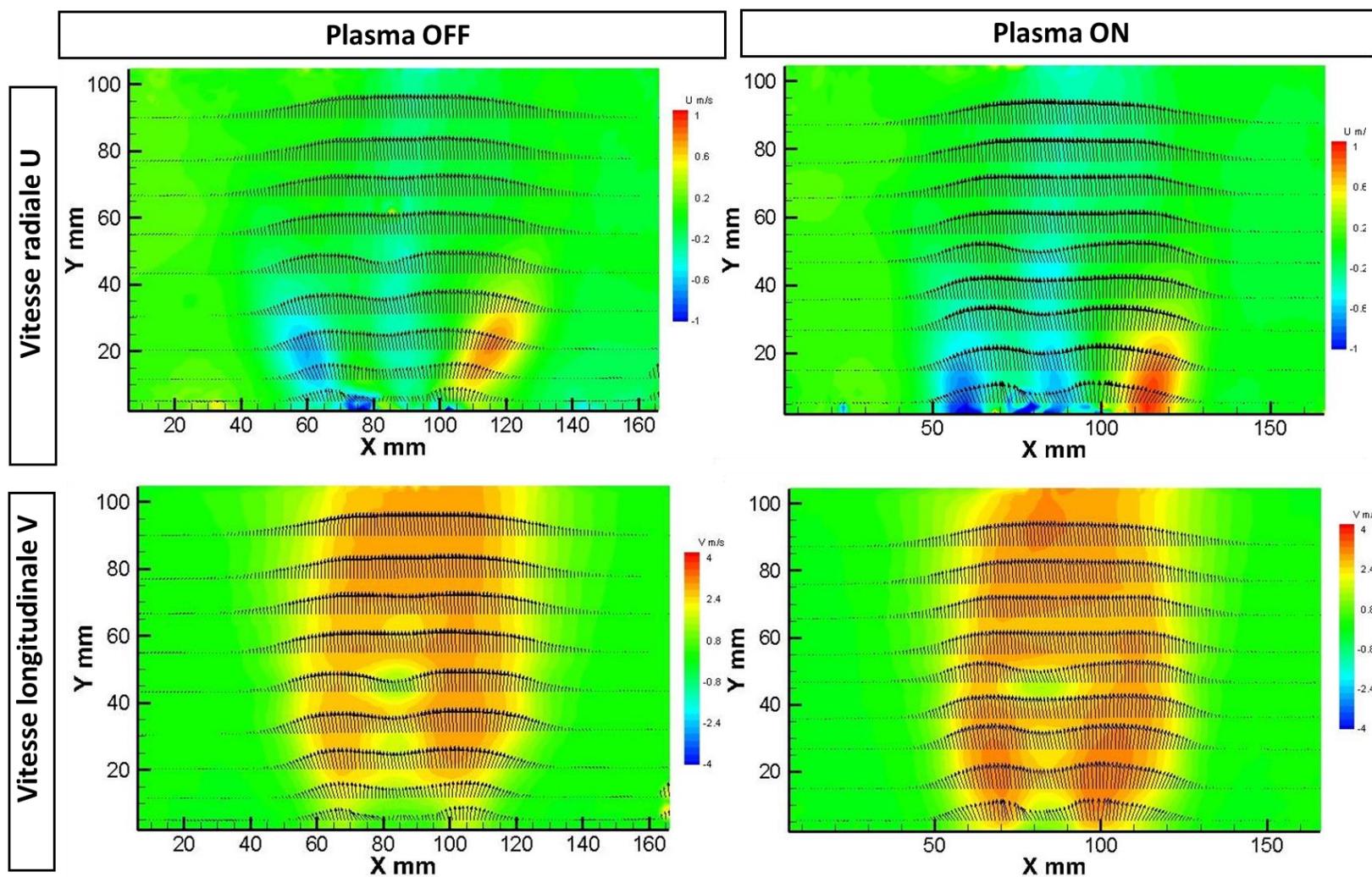
Nous avons également examiné les effets du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif contenant 30% de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de combustible à une richesse globale de 0.8 et  $S_n=0.5$ . La Figure III.27 illustre les champs moyens de vitesses radiale  $U$  et longitudinale  $V$  (en échelle des couleurs), accompagnés des vecteurs résultant des deux vitesses. Nous avons étudié la flamme à la fois sans activation du plasma (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON), en utilisant une fréquence de  $f=10$  kHz et une tension de 10.5 kV. Les détails spécifiques de ces conditions sont répertoriés dans le Tableau II.5 du chapitre II. Il a été observé que les régions de vitesses élevées de  $U$ , même si ces vitesses sont de faible amplitude, subissent des modifications sous l'influence du plasma. De manière similaire aux résultats obtenus précédemment avec 0%  $\text{CO}_2$  dans le mélange, les zones où la vitesse  $U$  est plus élevée

se déplacent vers le brûleur en présence du plasma. Cette tendance est attribuée à l'effet généré par la décharge plasma située à la sortie du brûleur.

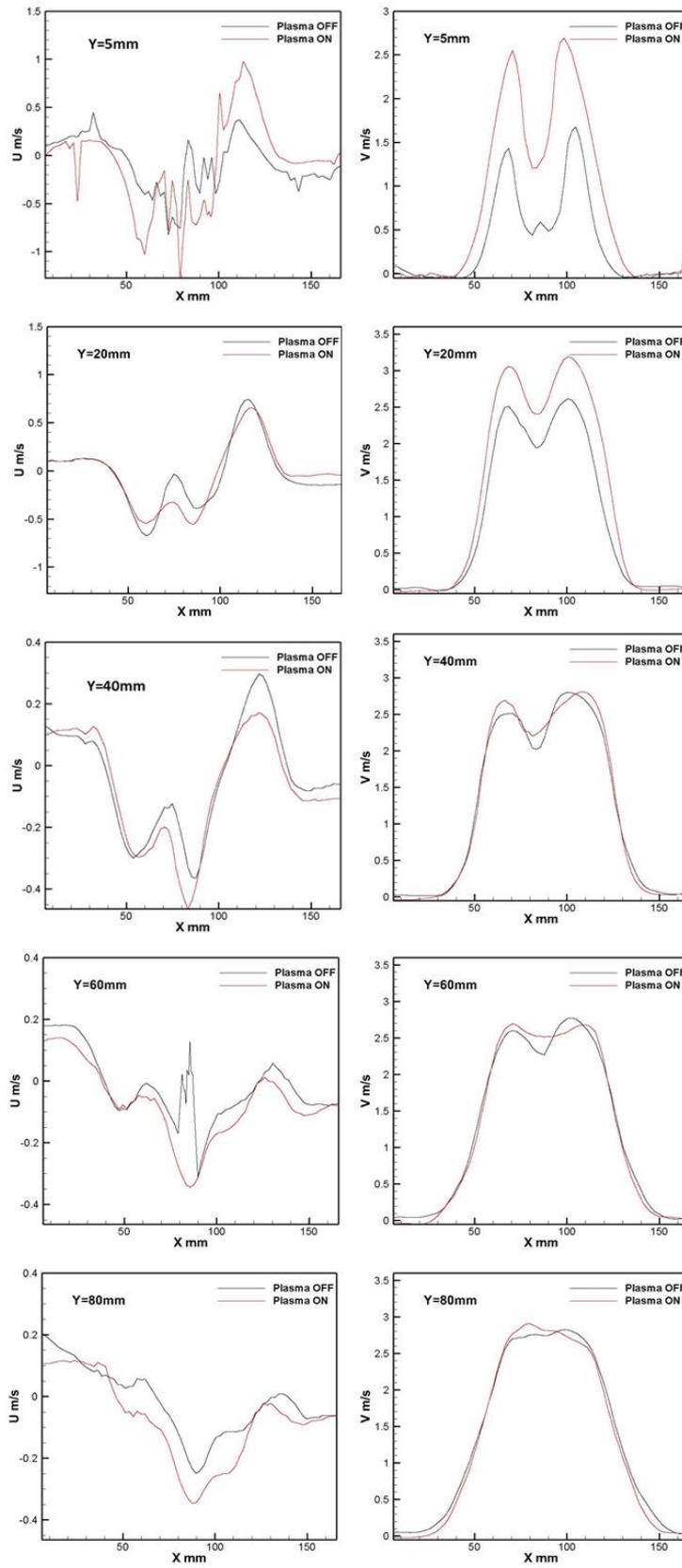
En ce qui concerne la vitesse longitudinale  $V$ , ces champs mettent en évidence l'augmentation de la vitesse  $V$  due au plasma, avec une augmentation particulièrement significative proche du brûleur où l'effet thermique est très fort.

Les profils de la vitesses  $U$  et  $V$  sont présentés dans la Figure III.28 pour différentes hauteurs :  $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm. Ces profils ont été extraits des champs moyens illustrés dans la Figure III.27. Ces résultats confirment nos observations antérieures, montrant une faible augmentation de la vitesse  $U$  en présence du plasma près de la sortie du brûleur. Cependant, à mesure que l'on s'éloigne, cet effet diminue, et la vitesse  $U$  tend vers zéro, même en présence du plasma.

Les profils de la vitesse longitudinale montrent clairement une augmentation de  $V$  en présence du plasma proche du brûleur ( $Y=5$  et  $Y=20$  mm). Cependant, à mesure que l'on s'éloigne avec des hauteurs supérieures à  $40$  mm, l'effet du plasma devient moins prononcé et la vitesse reste relativement similaire malgré la présence du plasma. Cette tendance souligne l'influence du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif, particulièrement à proximité de la décharge plasma à la sortie du brûleur. Cependant, à mesure que l'on s'éloigne de cette décharge plasma, l'effet diminue graduellement.



**Figure III.27.** Champs moyens de vitesses radiale  $U$  (à gauche) et longitudinale  $V$  (à droite) avec le champ des vecteurs issus des deux vitesses pour le cas 30%  $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.



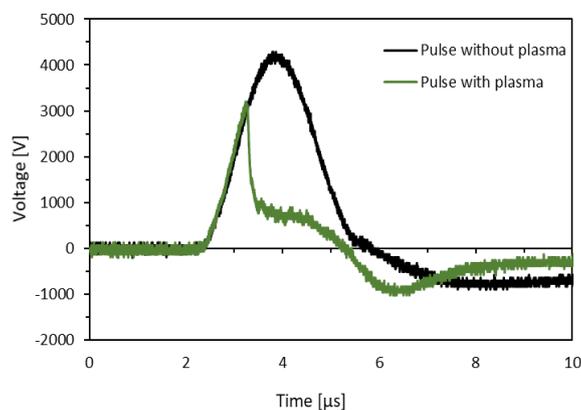
**Figure III.28.** Profils de vitesse radiale  $U$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $30\%$   $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.8$  et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}= 10.5$  kV.

### III.3. Configuration des électrodes : Tige-Anneau

Après avoir étudié l'impact de la configuration arc glissant sur la combustion de biogaz dans la partie précédente, nous allons maintenant nous intéresser à la deuxième configuration des électrodes : la configuration Tige-Anneau. Nous aborderons d'abord la caractérisation du plasma, en examinant l'évolution temporelle de l'impulsion à haute tension (HT) et la puissance du plasma. Ensuite, nous analyserons l'effet de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension appliquée sur la stabilité des flammes de biogaz ainsi que les émissions polluantes. Enfin, nous concluons cette section en discutant des résultats de la spectroscopie d'émission optique, en examinant l'effet de l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, de la fréquence de répétition des impulsions, et de la tension appliquée sur les espèces détectées.

#### III.3.1. Caractérisation du plasma

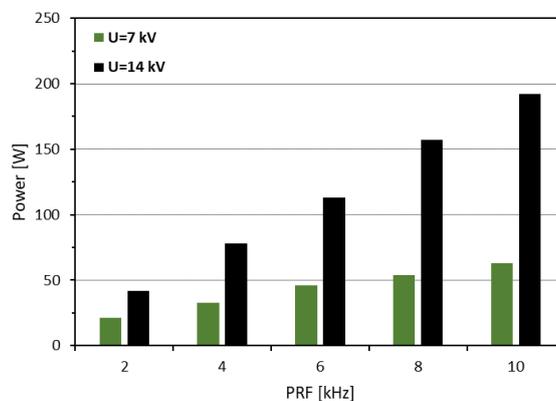
La Figure III.29 présente l'évolution temporelle de l'impulsion HT (haute tension) avant et après l'initiation du plasma aux niveaux des électrodes. La forme de l'impulsion de tension de l'impulsion HT a été modifiée par l'allumage du plasma. L'apparition du plasma a eu un impact sur la forme HT. Cela est dû au fait que le plasma a une conductivité électrique qui modifie les propriétés de la tension appliquée. Lorsque le plasma est activé, il devient conducteur et permet le passage de courant électrique. Les courbes de tension de cette configuration ressemblent aux courbes de tension de la configuration précédente, Figure III.1.



**Figure III.29.** Évolution temporelle de l'impulsion HT avant et après l'initiation du plasma.

La Figure III.30 présente la consommation d'énergie du plasma impulsionnel microseconde pour différents paramètres du plasma (fréquence de répétition d'impulsions et tension électrique appliquée). Les résultats montrent que ce type de plasma consomme une quantité d'énergie relativement faible dans les diverses conditions de fonctionnement. En effet, la puissance appliquée de ce type de plasma n'a pas dépassé  $200$  W, même à des niveaux élevés de PRF et de IEV et avec une électronique non optimisée pour cette configuration

expérimentale. Cette puissance ne représente qu'une fraction minimale de la puissance des flammes étudiées, qui peuvent atteindre des niveaux beaucoup plus élevés, généralement de l'ordre de plusieurs kilowatts. Les résultats de la Figure III.30 mettent également en évidence l'effet significatif de la PRF et surtout de la IEV sur la consommation d'énergie du plasma qui augmente avec l'augmentation de ces derniers.



**Figure III.30.** Puissance consommée par le plasma pour différentes fréquences et tensions appliquées au plasma.

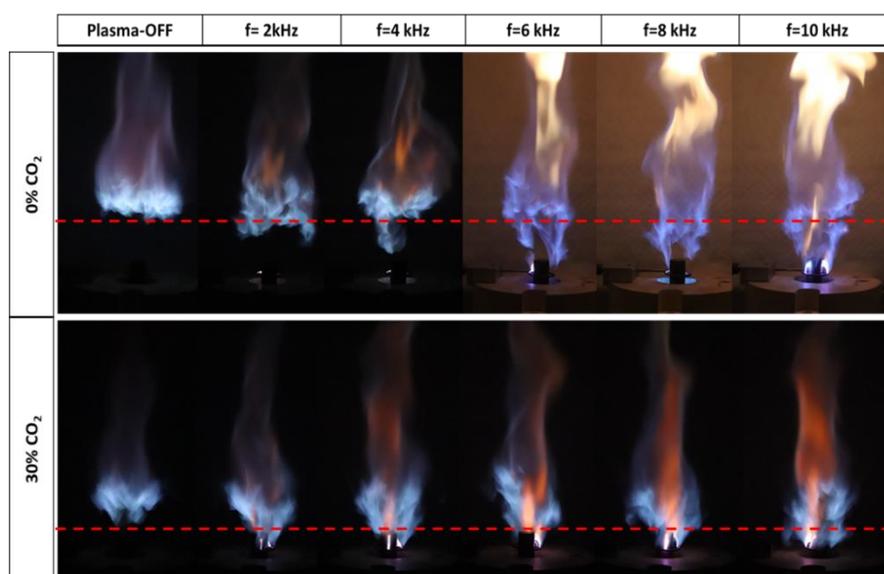
### III.3.2. Effet de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension électrique appliquée

#### III.3.2.1. Stabilité des flammes de biogaz

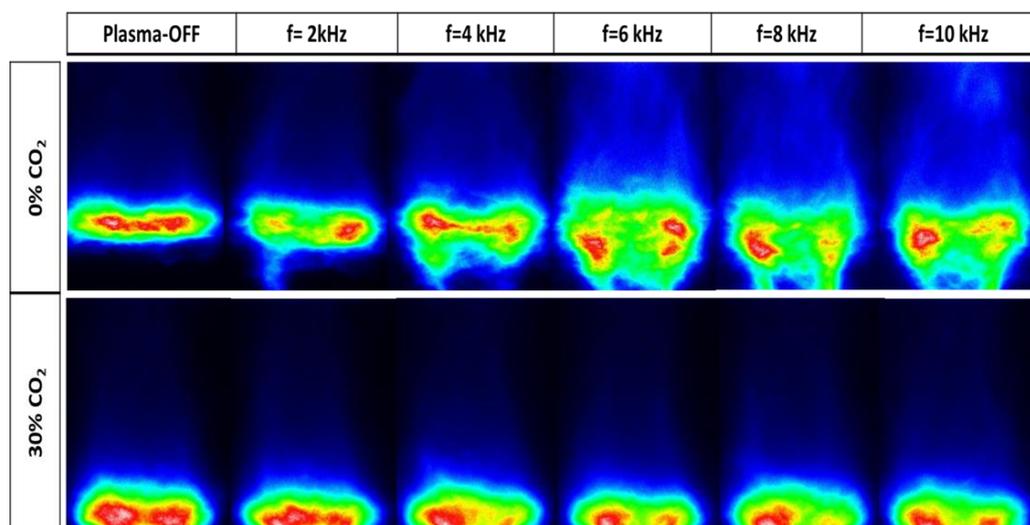
La Figure III.31 présente des photographies des flammes de méthane et de biogaz sans et avec activation plasma à différentes fréquences de répétition d'impulsions. La richesse globale a été maintenue à 1 dans ce cas. Comme dans la configuration arc glissant vu dans la section précédente de ce chapitre, les deux flammes semblaient être plus longues, plus proches du brûleur et avec une luminosité différente avec l'activation plasma. Les aspects et les caractéristiques des flammes de méthane et de biogaz avec l'activation du plasma ont été similaires à ceux obtenus avec la configuration des électrodes microseconde d'arc glissant dans la partie III.2.4.1. Les résultats mettent en évidence que l'utilisation du plasma impulsionnel microseconde avec la configuration Tige-Anneau a eu un effet non négligeable de réduction de la hauteur d'accrochage des flammes de méthane et de biogaz. Cependant, il est important de noter que cet effet est localisé. Il est attribuable au déplacement rapide de l'arc électrique autour de la tige (cathode), créant une décharge instable et en glissement. En conséquence, la flamme suit cette décharge instable, ce qui entraîne la diminution de la hauteur d'accrochage observée. Les résultats ont montré que l'activation plasma a permis d'obtenir des flammes plus proches du brûleur mais perturbé à cause de déplacement de l'arc électrique. Les expériences ont permis de constater que la hauteur d'accrochage des flammes diminuait progressivement jusqu'à ce qu'elles soient finalement accrochées à la zone du plasma à une PRF de 10 kHz.

Pour valider ces résultats, la méthode de la chimiluminescence OH\* est utilisée pour visualiser les flammes CH<sub>4</sub>/Air et biogaz/air sans et avec activation au plasma à différentes

fréquences de répétition d'impulsions (Figure III.32). Il a été observé que la distribution d' $\text{OH}^*$  suit le mouvement du plasma le long de l'anneau, et la hauteur d'accrochage a diminué avec l'activation du plasma et avec l'augmentation de la fréquence. Cela suggère que le plasma modifie la structure de la flamme en produisant plus d'espèces actives telles que les radicaux  $\text{OH}^*$ , ce qui favorise la combustion. Cet effet était plus clair sur les images  $\text{OH}^*$  pour les flammes de méthane que pour celles de biogaz. Cela est dû au fait que le plasma est nettement plus intense que la flamme, il était donc difficile de capturer simultanément les deux, donc la région d'acquisition a été fixée au-dessus de la tige d'injection. Comme la flamme du biogaz était déjà près de la tige d'injection, l'effet du plasma n'a pas été détecté dans la région d'acquisition pour cette flamme. Ces résultats pourraient être attribués à une formation plus élevée d'espèces actives pendant la décharge plasma et avec l'augmentation de la fréquence. Cette approche sera discutée dans la prochaine section avec l'analyse de spectres.



**Figure III.31.** Photographies des flammes de  $\text{CH}_4$  et de  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  sans plasma et avec plasma à différentes fréquences. Les lignes pointillées rouges indiquent le bas de chaque flamme avant l'activation du plasma.

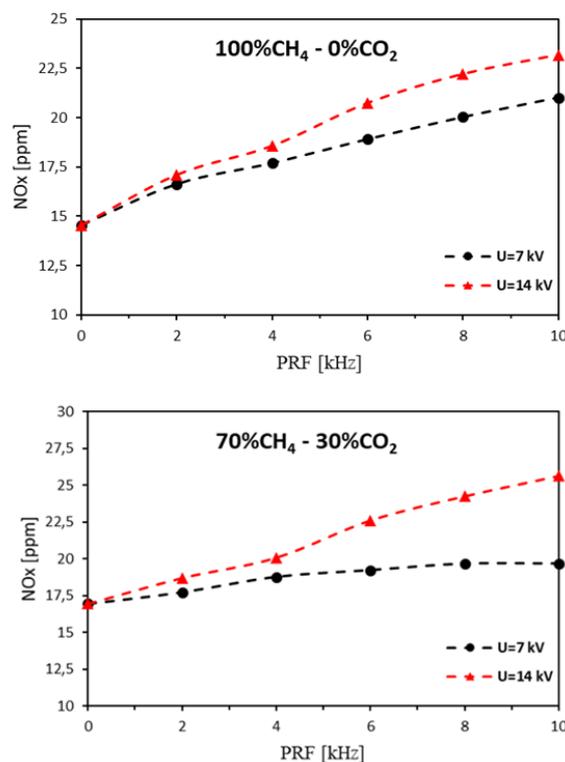


**Figure III.32.** Images moyennes de la chimiluminescence OH\* en fonction de la fréquence de répétition d'impulsions pour deux cas de flammes 0% CO<sub>2</sub> et 30% CO<sub>2</sub> dans le combustible.

### III.3.2.2. Emissions polluantes

L'effet de MPP en utilisant la configuration Tige-Anneau sur les émissions polluantes (NO<sub>x</sub> et CO) est présenté dans les Figures III.35 et 36.

Les résultats ont montré que la présence du plasma entraînait une légère augmentation des émissions de NO<sub>x</sub> avec l'augmentation de la PRF pour les deux cas de flammes, sans et avec 30 % de CO<sub>2</sub> dans le combustible, comme indiqué dans la Figure III.33. L'augmentation des émissions de NO<sub>x</sub> est due à une augmentation de la température locale et à la génération de radicaux N\* et O\* par le plasma, comme observé dans la section suivante. Le plasma impulsionnel microseconde Tige-anneau est capable de générer des quantités significatives de ces radicaux, qui peuvent réagir avec le combustible et l'air pour former des oxydes d'azote. À des puissances du plasma élevées, les taux de formation de NO\* à partir de l'oxygène atomique et de divers états excités de N<sub>2</sub>\* augmentent, ce qui entraîne une augmentation des émissions de NO<sub>x</sub>.



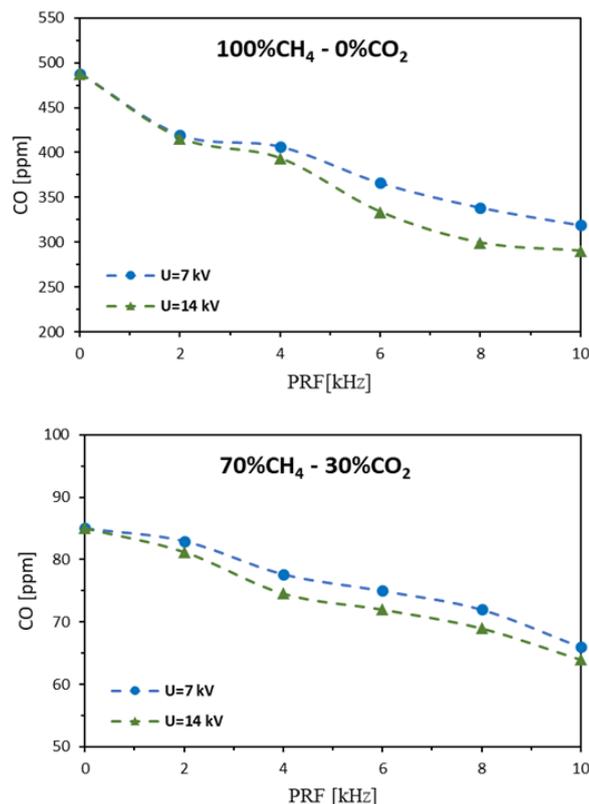
**Figure III.33.** Les émissions de NO<sub>x</sub> des flammes de CH<sub>4</sub>-Air et 70% CH<sub>4</sub> / 30% CO<sub>2</sub>-Air en fonction de la PRF à différentes IEV (7 kV et 14 kV).

La Figure III.34 montre une diminution importante des émissions de CO pour les deux cas de flammes, le méthane et le biogaz avec 30% de CO<sub>2</sub> dans le combustible, avec l'activation du plasma et l'augmentation de la fréquence de répétition d'impulsions. Pour la flamme de

méthane, le CO diminue de 40.5% de 460 à 300 ppm lorsque la fréquence de répétition d'impulsions augmente de 0 à 10 kHz à  $U=14$  kV. Cette réduction est attribuable à une combustion plus complète du combustible et à une amélioration de la conversion du CO en  $\text{CO}_2$  par activation du plasma. En effet, le plasma génère des radicaux  $\text{OH}^*$  qui réagissent avec le CO pour former du  $\text{CO}_2$  et de l'hydrogène, comme indiqué par la réaction suivante :



Cette réaction de conversion du CO en  $\text{CO}_2$  est favorisée par l'activation du plasma.



**Figure III.34.** Les émissions de CO des flammes de  $\text{CH}_4$ -Air et 70%  $\text{CH}_4$  / 30%  $\text{CO}_2$ -Air en fonction de la PRF à différentes IEV (7 kV et 14 kV).

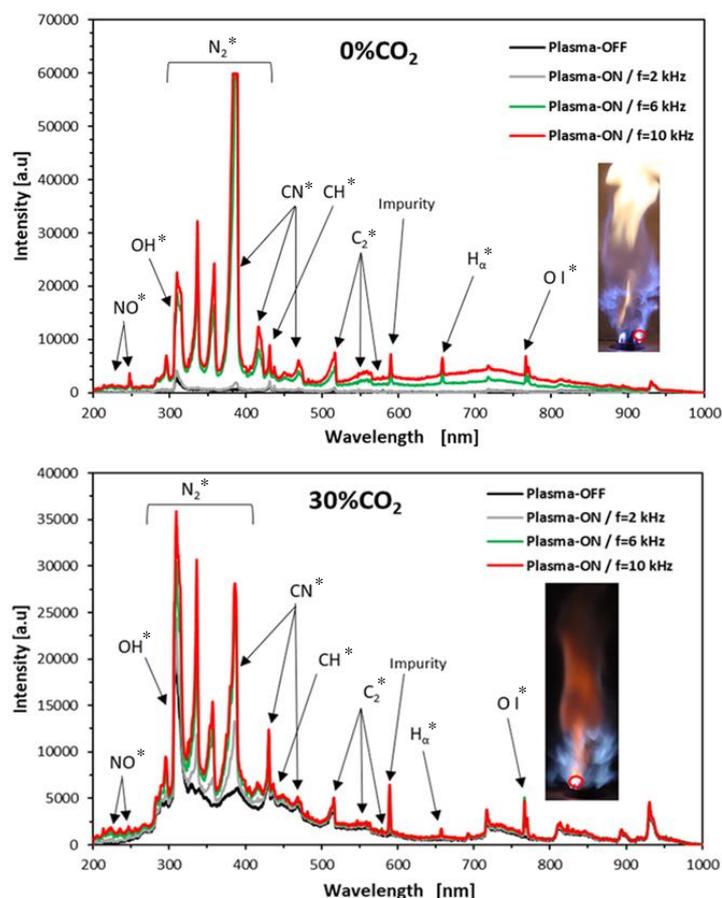
En résumé, l'activation du plasma impulsionnel microseconde Tige-Anneau a un impact sur les émissions de  $\text{NO}_x$  et de CO dans les flammes de biogaz. Le plasma induit une faible augmentation des émissions de  $\text{NO}_x$  due à la production de radicaux  $\text{N}^*$  et  $\text{O}^*$  qui ont un impact sur la chimie de la flamme. En revanche, le plasma entraîne une diminution importante des émissions de CO en favorisant la conversion du CO en  $\text{CO}_2$  par la génération de radicaux  $\text{OH}^*$ .

### III.3.3. Effet du plasma sur les spectres d'émission optique

Figure III.35 illustre les spectres d'émission optique (SEO) de la flamme et du plasma impulsionnel microseconde Anneau-Tige à la position d'interaction plasma-flamme, avec des mesures effectuées sans et avec activation plasma à différentes fréquences de répétition d'impulsions. Chaque spectre est la moyenne de 10 acquisitions. Les mesures ont été effectuées avec un temps d'intégration de 2 secondes, et le cercle rouge dans les images à droite de chaque

spectre indique la position de visée de l'installation optique. Il convient de noter que l'effet du plasma sur les spectres était plus important pour les flammes de  $\text{CH}_4$  que pour celles avec du  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Les flammes avec une proportion plus élevée de  $\text{CO}_2$  présentent des intensités de raies spectrales plus faibles par rapport aux flammes sans  $\text{CO}_2$ . Cela est dû au fait que la présence de  $\text{CO}_2$  a un effet de dilution sur la flamme, réduisant la température et modifiant les taux de réaction dans la flamme [39]. Cela peut influencer la composition de la flamme et donc les espèces émettant les lignes spectrales, ce qui se reflète dans les spectres d'émission optique.

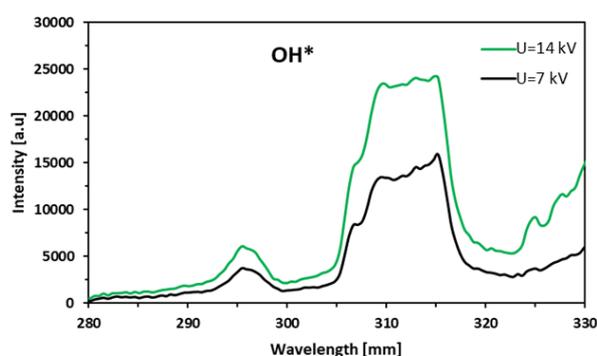
La Figure III.35 montre que le plasma peut amplifier certaines espèces excitées déjà présentes dans les flammes, ainsi que produire de nouvelles espèces excitées. Les espèces excitées qui étaient déjà présentes dans les flammes, telles que  $\text{OH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$ ,  $\text{CN}^*$  et  $\text{CH}^*$ , ont été amplifiées avec l'augmentation de la fréquence de répétition des impulsions. Ces espèces excitées jouent un rôle important dans la combustion des hydrocarbures. En effet, les espèces excitées telles que les radicaux  $\text{OH}^*$  et  $\text{CH}^*$  peuvent réagir avec d'autres espèces réactives pour initier ou poursuivre la réaction de combustion. L'énergie fournie par le plasma aux espèces excitées déjà présentes dans les flammes a conduit à leur amplification, ce qui peut améliorer la qualité de la combustion et contribuer à stabiliser les flammes.



**Figure III.35.** Spectres d'émission optique des flammes  $\text{CH}_4$ -Air et  $70\%\text{CH}_4/30\%\text{CO}_2$ -Air avec et sans activation plasma. Le temps d'intégration est de 2s. Le cercle rouge dans les images à droite de chaque spectre indique la position d'acquisition de l'installation optique.

En outre, l'activation du plasma a également conduit à l'apparition de nouvelles raies spectrales pour les molécules excitées des  $N_2^*$  et  $NO^*$ , ainsi que pour les atomes  $H_\alpha^*$  et  $O^*$ . Ces pics spectraux augmentent en intensité avec l'augmentation de PRF pour les deux types de flammes, avec ou sans  $CO_2$  dans le combustible. Les molécules de  $N_2^*$  et  $NO^*$  sont des espèces excitées qui peuvent jouer un rôle important dans la combustion. Les atomes d'hydrogène excité ( $H_\alpha^*$ ) et les atomes d'oxygène ( $O^*$ ) ont été également détectés avec l'activation du plasma et peuvent réagir avec d'autres espèces réactives pour produire des produits de combustion tels que l'eau et le dioxyde de carbone. L'augmentation de l'intensité des pics spectraux pour les atomes  $H_\alpha^*$  et  $O^*$  observée avec l'activation du plasma indique que le plasma fournit de l'énergie supplémentaire à ces espèces excitées, ce qui peut contribuer à l'initiation et à la poursuite de la réaction de combustion.

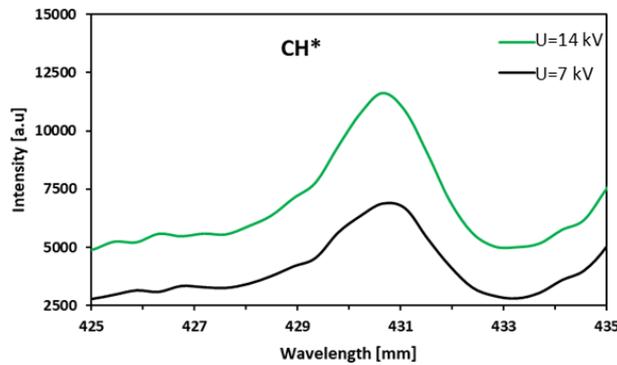
L'effet du plasma impulsionnel microseconde Anneau-Tige sur différentes espèces dans la flamme en faisant varier la tension électrique appliquée du plasma à une fréquence de répétition d'impulsions fixe de 10 kHz a été étudié. La Figure III.36 illustre les effets du plasma sur l'intensité de la bande spectrale  $OH^*$  à différentes tensions appliquées du plasma et à une fréquence de répétition des impulsions de 10 kHz. La bande spectrale  $OH^*$  est un indicateur de la production d'espèces réactives, qui jouent un rôle important dans l'initiation de la combustion. Comme on peut le voir sur le graphique, l'augmentation de la tension provoque une augmentation significative de l'intensité de la bande  $OH^*$ . Cette augmentation est particulièrement importante en passant de 7 kV à 14 kV, où l'intensité de la bande  $OH^*$  augmente de plus de 1.5 fois aux alentours de 310 nm. Cette augmentation montre que l'activation du plasma et l'augmentation de l'énergie du plasma peuvent considérablement améliorer la production d'espèces réactives telles que  $OH^*$ .



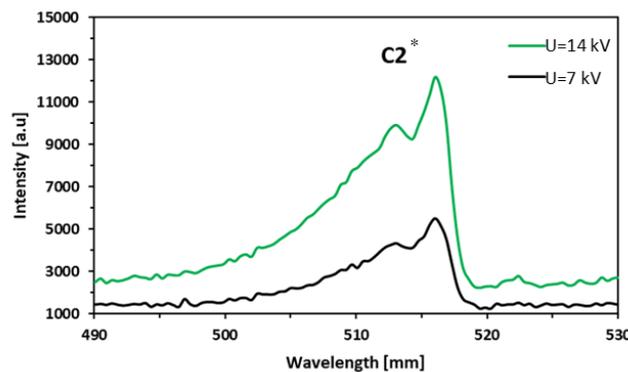
**Figure III.36.** SEO d' $OH^*$  dans la région de longueur d'onde 280-330 avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV).

En poursuivant l'étude de spectroscopie d'émission optique, nous avons également examiné les variations d'intensité de raies spectrales  $CH^*$  et  $C_2^*$  en fonction de IEV, qui sont révélatrices de la décomposition du  $CH_4$  par le plasma en amont de la flamme. Concernant la raie spectrale  $CH^*$ , la Figure III.37 montre une augmentation significative de son intensité, jusqu'à un doublement, lorsque la tension appliquée est augmentée de 7 kV à 14 kV, tout en maintenant une PRF de 10 kHz.

En ce qui concerne la bande spectrale  $C_2^*$ , une augmentation de tension de 7 kV à 14 kV à une fréquence de répétition d'impulsions de 10 kHz entraîne une augmentation de son intensité de 1.8 fois, comme indiqué dans la Figure III.38. En effet, l'augmentation de la tension appliquée du plasma permet de fournir une énergie suffisante pour exciter les molécules de gaz  $C_2$ , créant ainsi plus de radicaux  $C_2^*$ .

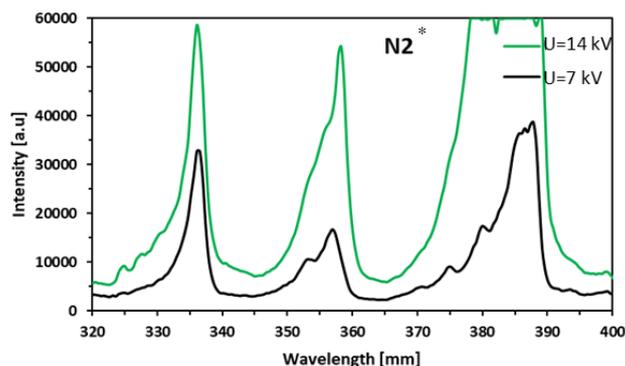


**Figure III.37.** SEO de  $CH^*$  dans la région de longueur d'onde 425-435 nm avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV) à PRF= 10 kHz.



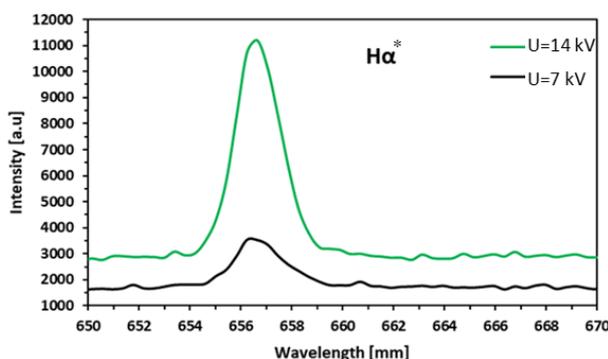
**Figure III.38.** SEO de  $C_2^*$  dans la région de longueur d'onde 490-530 nm avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV) à PRF= 10 kHz.

Les espèces intermédiaires qui apparaissent avec l'activation plasma, telles que  $N_2$ , ont également été étudiées (Figure III.39).  $N_2$  domine complètement le spectre, mais il y a également des atomes d'oxygène ( $O$ ) à 777 nm qui sont produits par la dissociation de  $O_2$  par impact électronique ou avec le  $N_2$  excité. Les atomes d'oxygène sont connus pour leur grande influence dans l'amélioration de la combustion car ils transfèrent de l'énergie au gaz et contribuent de manière significative à l'amélioration de l'allumage et à la réduction des émissions polluantes.



**Figure III.39.** SEO de  $N_2^*$  dans la région de longueur d'onde 320-400 avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV) à PRF= 10 kHz.

En outre, les résultats de Figure III.40 montrent que l'activation plasma a un effet significatif sur la production de la raie Balmer de l'hydrogène,  $H_{\alpha}$ , à 656 nm. On peut voir sur le graphique que l'intensité d'émission de cette raie augmente considérablement avec l'augmentation de la tension appliquée à une PRF fixe. Cela suggère que l'augmentation de l'énergie du plasma peut stimuler la production d'espèces réactives telles que  $H^*$ .



**Figure III.40.** SEO de  $H^*$  dans la région de longueur d'onde 650-670 nm avec deux IEV différentes (7 kV et 14 kV) à PRF= 10 kHz.

Toutes ces espèces intermédiaires jouent un rôle important dans l'amélioration de la combustion, en particulier les espèces CH, OH, H et  $O^*$ . Ces dernières sont connues pour leur rôle crucial dans l'initiation de la combustion dans la littérature scientifique [108], [109]. Ainsi, l'activation plasma peut considérablement améliorer la production de ces espèces réactives, ce qui peut contribuer à une combustion plus efficace et possibilité de contrôler activement les émissions polluantes.

### III.4. Conclusion

Le chapitre III porte sur l'utilisation de deux configurations du plasma, l'Arc Glissant et la Tige-Anneau, pour assister la combustion de biogaz dans un brûleur à injection radiale.

Nos résultats ont montré que l'ajout de  $CO_2$  au combustible diminue la hauteur d'accrochage dans cette configuration de brûleur à injection radiale. Deux configurations de positionnement

d'électrode ont été testées afin d'estimer l'effet plasma pour la stabilisation des flammes. Les deux configurations étudiées ont démontré le bénéfice de l'utilisation d'un plasma pour stabiliser les flammes quel que soit les conditions initiales. Cependant la configuration Tige-Anneau ne produit pas une stabilisation homogène de part de la formation d'un plasma qui se déplace autour de l'axe central, la flamme s'accrochant au plasma suit cette même dynamique.

L'étude de spectroscopie d'émission optique a également montré que le plasma impulsif microseconde génère de nombreuses espèces excitées telles que  $N_2^*$ ,  $NO^*$ ,  $O^*$ , et  $H^*$  dans les deux configurations. L'intensité de ces espèces augmente avec l'augmentation de la fréquence de répétition d'impulsions et de la tension électrique appliquée. L'intensité des raies d'émission des espèces excitées, telles que  $OH^*$ ,  $C_2^*$ ,  $CN^*$ ,  $CH^*$ , présentes en faible quantité avant l'activation du plasma est augmentée avec la présence du plasma et l'augmentation de la tension et de la fréquence.

Les deux configurations ont montré que la présence du plasma conduit à une diminution du CO et une augmentation des NOx dans les gaz produits lors de la combustion

---

## Chapitre IV. Brûleur à injection axiale

---

V.1.	Introduction.....	143
V.2.	Configuration des électrodes : Pointe-Tige-Pointe (PTP).....	143
V.2.1.	Combustion de biogaz assistée par plasma Pointe-Tige-Pointe.....	144
V.2.1.1.	Caractérisation du plasma.....	144
V.2.1.1.1.	Effet de la fréquence de répétition des impulsions et de l'amplitude de la tension appliquée.....	145
V.2.1.1.1.a.	Stabilité des flammes de biogaz.....	145
V.2.1.1.1.b.	Emissions polluantes.....	148
V.2.1.1.2.	Spectroscopie d'émission optique.....	151
V.2.1.1.2.a.	Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> dans le combustible.....	151
V.2.1.1.2.b.	Effet du plasma sur les spectres d'émission optique.....	152
V.3.	Configuration des électrodes : Arc glissant autour d'une tige fixe longue.....	161
V.3.1.	Caractérisation des flammes de biogaz sans plasma.....	161
V.3.1.1.	Stabilité des flammes de biogaz.....	162
V.3.1.2.	Formation des émissions polluantes.....	166
V.3.1.3.	Températures des produits de combustion.....	168
V.3.2.	Combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant.....	169
V.3.2.1.	Caractérisation du plasma.....	169
V.3.2.2.	Effet de l'activation du plasma.....	170
V.3.2.2.a.	Stabilité des flammes de biogaz.....	170
V.3.2.2.b.	Emissions polluantes.....	171
V.3.2.2.c.	Températures des produits de combustion.....	172
V.4.	Configuration des électrodes : Arc glissant autour d'une tige amovible courte.....	173
V.4.1.	Caractérisation de la flamme sans plasma.....	173
V.4.1.1.	Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> dans le combustible sur la structure de la flamme.....	173
V.4.1.2.	Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> dans le combustible sur le champ de vitesses.....	176
V.4.2.	Combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant autour d'une tige amovible.....	181
V.4.2.1.	Effet du plasma sur la stabilité et les émissions polluantes.....	181
V.4.2.2.	Spectroscopie d'émission optique.....	184
V.4.2.2.a.	Effet de l'ajout de CO <sub>2</sub> sur les spectres d'émissions optiques dans la flamme.....	185
V.4.2.2.b.	Effet du plasma sur les spectres d'émissions optiques.....	186
V.4.2.3.	Effets du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif.....	189
V.5.	Conclusion.....	197

## IV.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'utilisation d'un brûleur à injection axiale pour la combustion de biogaz, en y intégrant les systèmes plasma. Il se divise en trois parties, chacune explorant une configuration des électrodes ou configuration de tige centrale différente. Ces configurations ont pour but de traiter par plasma principalement le combustible afin de limiter la formation des NOx tout en gardant les avantages du plasma présentés dans les résultats de la partie précédente.

La première section présente la configuration des électrodes Pointe-Tige-Pointe (Figure II.9), configuration relativement simple et non encombrante. Les résultats portent sur la caractérisation du plasma, les effets de la fréquence de répétition des impulsions (PRF) et de tension électrique délivrée par le générateur (IEV) sur la stabilité des flammes de biogaz et les émissions polluantes, ainsi que sur l'analyse par spectroscopie d'émission optique.

La deuxième section présente la configuration des électrodes à Arc Glissant autour d'une tige fixe longue (50 mm de longueur à partir de la sortie du brûleur, 8 mm de diamètre) intégrée dans le brûleur (Figure II.8). Nous présentons d'abord les résultats de la caractérisation des flammes de biogaz sans plasma, en étudiant les effets de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible et la richesse globale du mélange sur la combustion. Ensuite nous décrivons les résultats de la combustion assistée par plasma à arc glissant et son effet sur la stabilité des flammes de biogaz, les émissions polluantes et les températures des fumées.

La troisième section présente une configuration des électrodes à Arc Glissant autour d'une tige amovible courte (20 mm de taille à partir de la sortie du brûleur, 4 mm ; 8 mm de diamètres) (Figure II.8). Dans un premier temps, les résultats de la caractérisation de la flamme sans plasma, notamment l'effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible et l'effet de la vitesse d'injection de combustible sont présentés. Dans un second temps, nous montrons les résultats de la combustion assistée par plasma à Arc Glissant, notamment l'effet de la fréquence de répétition des impulsions et de l'amplitude de la tension électrique appliquée sur la stabilité des flammes, les émissions polluantes et les températures des fumées. Les résultats de la spectroscopie d'émission optique ainsi que les champs dynamiques de l'écoulement réactif sont également décrits dans cette section.

## IV.2. Configuration des électrodes: Pointe-Tige-Pointe (PTP)

Dans cette section, nous allons analyser les caractéristiques de la flamme du biogaz stabilisée par plasma en utilisant la configuration PTP (Figure II.9). Nous allons également étudier l'effet de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension sur la stabilité de la flamme ainsi que sur les émissions polluantes. Enfin, nous utiliserons la spectroscopie d'émission optique pour analyser l'impact de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible et la fréquence de répétition des impulsions sur les espèces détectées dans la flamme.

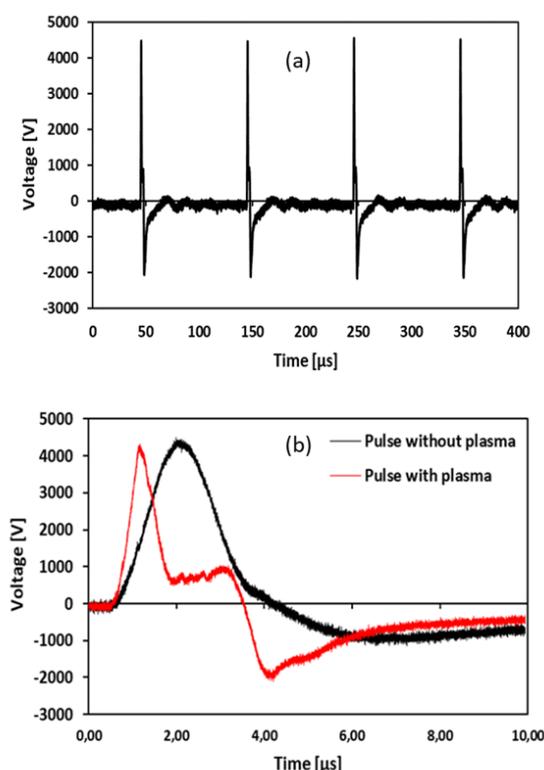
Dans cette partie de l'étude, la tige centrale utilisée est une tige amovible courte de diamètre de 4 mm et longueur de 20 mm à partir de la sortie du brûleur. La teneur en CO<sub>2</sub> dans le mélange de combustible était de 0%, 17% et 29%, offrant une gamme de différentes conditions de fonctionnement pour étudier l'impact du CO<sub>2</sub> sur le processus de combustion. La richesse globale ( $\Phi$ ) est fixée à 0.8 tout au long de l'étude, tandis que le nombre de swirl ( $S_n$ ) est fixé à

0.8. Tableau II.6 fournit un aperçu détaillé des trois conditions opératoires sélectionnées pour l'étude.

## IV.2.1. Combustion de biogaz assistée par plasma Pointe-Tige-Pointe

### IV.2.1.1. Caractérisation du plasma

La Figure V.1. (a) montre l'évolution temporelle de la tension du plasma impulsionnel microseconde pour plusieurs impulsions plasma. On peut observer que la décharge n'est pas continue, mais se fait sous forme de pulses successifs avec des durées d'impulsions de l'ordre de la microseconde et une fréquence de répétition contrôlée. Cette caractéristique est importante pour la combustion assistée par plasma, car elle permet de contrôler finement l'énergie apportée au processus de combustion, ce qui peut avoir un impact significatif sur la stabilité de la flamme et les émissions polluantes. La Figure V.1. (b) présente l'évolution temporelle de l'impulsion à haute tension (HT) observée avant et après l'initiation du plasma au niveau des électrodes. L'activation du plasma modifie clairement la forme de l'impulsion de tension. Comparée à l'impulsion sans activation du plasma (ligne noire), l'impulsion avec activation du plasma (ligne rouge) montre une légère diminution de la tension crête et une diminution de la durée de montée et de descente de l'impulsion. De plus, la forme d'impulsion change significativement par rapport à celle avant activation du plasma. Il est intéressant de noter que la tension de décharge crête reste constante à environ 4.5 kV, quelles que soient les conditions du plasma et des flammes étudiées

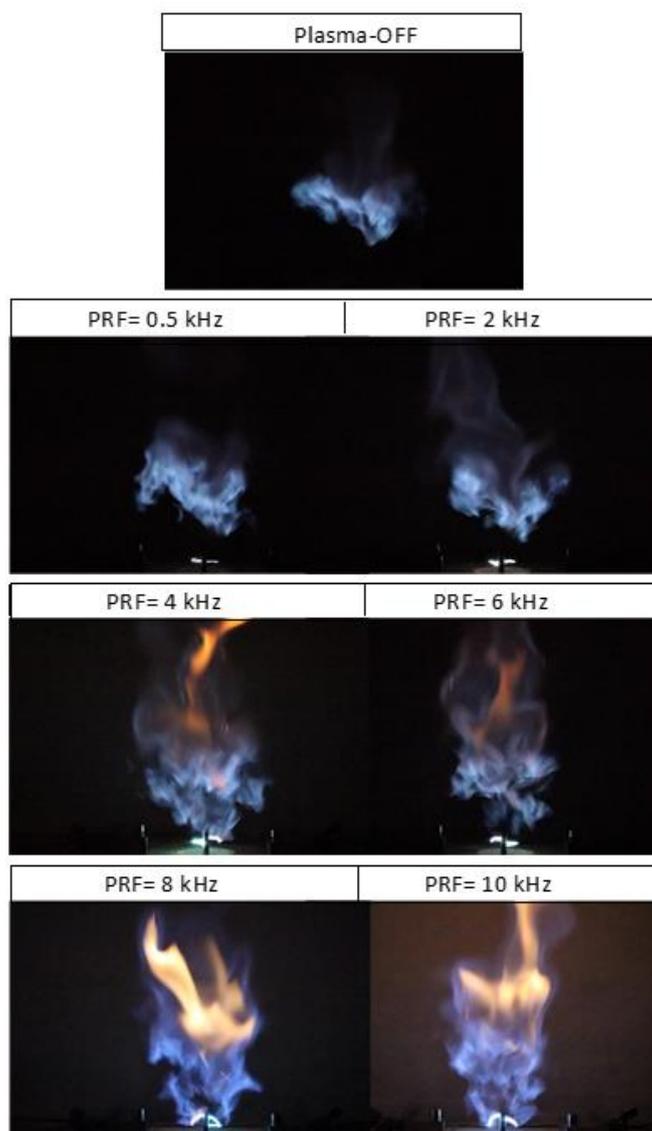


**Figure V.1.** Évolution temporelle (a) des impulsions HT avec plasma ; (b) d'une impulsion HT sans (ligne noire) et avec (ligne rouge) initiation du plasma. Les signaux sont moyennés sur 25 impulsions de HT.

### IV.2.1.1. Effet de la fréquence de répétition des impulsions et de l'amplitude de la tension appliquée

#### IV.2.1.1.a. Stabilité des flammes de biogaz

La Figure V.2 présente une série d'images capturées d'une flamme de 83% CH<sub>4</sub>-17% CO<sub>2</sub>/Air à différentes fréquences de répétition d'impulsions du plasma PTP. La caméra utilisée avait un temps d'exposition de 1/250 s, et la tension électrique appliquée était fixée à 10.5 kV.



**Figure V.2.** Photographies de la flamme dans les deux cas Plasma-OFF et Plasma-ON avec différentes fréquences de répétition des impulsions du plasma (de 0.5 kHz à 10 kHz).

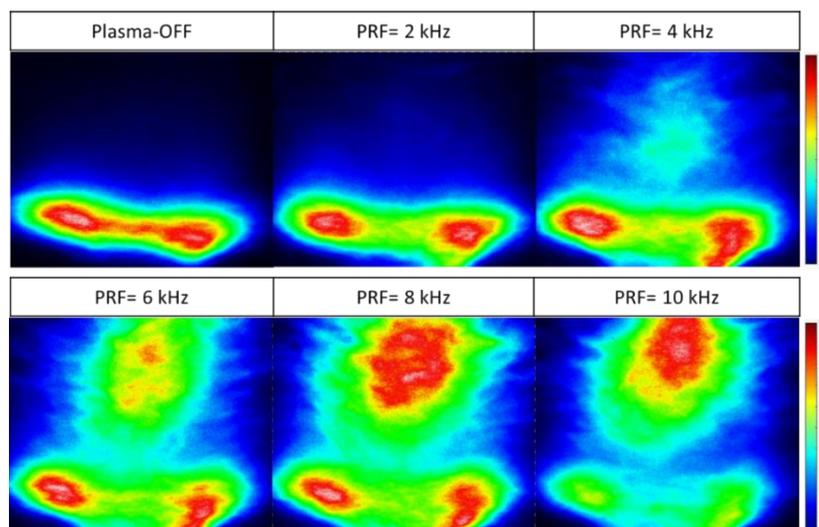
Les résultats montrent que la présence du plasma pulsé PTP influence de manière significative le comportement de la flamme, et cet effet augmente avec l'augmentation de la fréquence de répétition du plasma. La couleur, la forme et la hauteur d'accrochage de la flamme ont toutes été affectées par la présence du plasma. Une différence notable a été observée dans la luminosité visible de la flamme lorsque la décharge plasma était activée. Visuellement, la flamme semblait

être plus longue, plus proche du brûleur et avec une luminosité plus jaune/orange, ce qui pourrait être dû à une augmentation de la formation des suies. L'Annexe C présente une étude préliminaire portant sur l'impact du plasma sur la formation des suies, révélant que le plasma accroît la production de suies dans certaines conditions d'expérience.

L'étude a conclu que le plasma impulsif microseconde PTP est un bon moyen de stabiliser une flamme et de réduire sa hauteur d'accrochage, offrant un contrôle actif de la combustion. Ceci a été démontré par le fait que les flammes peuvent être contrôlées simplement en faisant varier la fréquence de répétition d'impulsions du plasma, sans modifier la configuration géométrique.

Pour confirmer ces affirmations, la méthode de la chimiluminescence  $\text{OH}^*$  a été utilisée pour analyser la distribution spatiale de l'intensité d'émission d' $\text{OH}^*$  dans les flammes de  $\text{CH}_4/\text{Air}$  et de Biogaz/Air avec et sans activation du plasma à différentes PRFs (Figures V.3 et V.4).

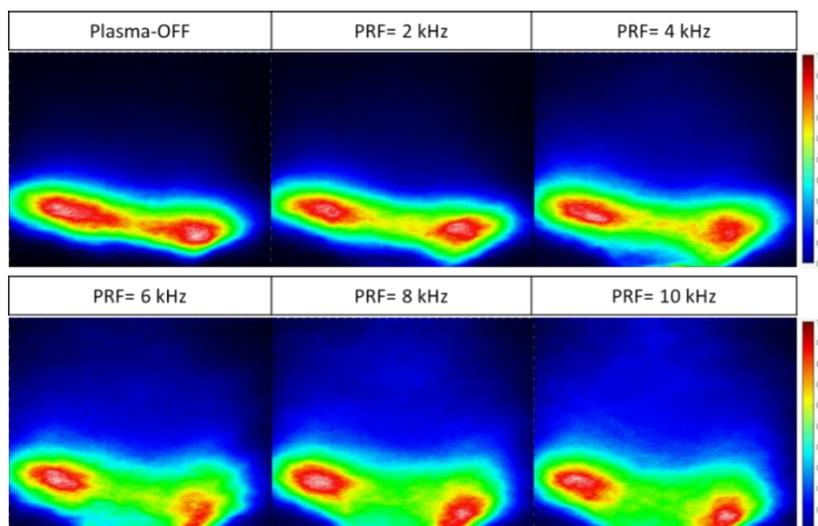
Les études ont montré que la distribution spatiale d' $\text{OH}^*$  était plus étendue dans la flamme  $\text{CH}_4/\text{Air}$  à des fréquences de répétition du plasma supérieures à 4 kHz, comme le montre la Figure V.3. Cela suggère que l'activation du plasma à des PRFs plus élevées a conduit à la formation de plus d'espèces réactives, telles que les radicaux  $\text{OH}^*$  et  $\text{CH}^*$ , qui ont réagi avec les espèces de combustible pour former des produits plus nombreux et plus réactifs, conduisant ainsi à une zone de réaction plus étendue. En revanche, la flamme Biogaz/Air a montré une distribution spatiale d' $\text{OH}^*$  moins étendue, sans différences significatives entre les fréquences de répétition du plasma. Cela peut être dû aux différences de la composition chimique de Biogaz/Air par rapport à  $\text{CH}_4/\text{Air}$ , qui peuvent affecter la formation et la réactivité des espèces réactives pendant l'activation du plasma.



**Figure V.3.** Images moyennes de 100 images instantanées d'intensité d'émission  $\text{OH}^*$  de la flamme  $\text{CH}_4/\text{air}$  avec et sans activation du plasma en fonction de l'augmentation de la PRF.

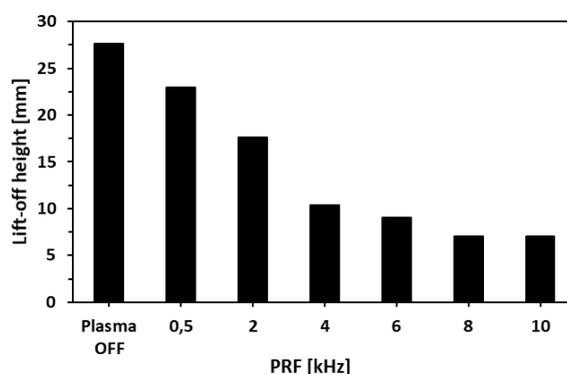
La flamme 83% $\text{CH}_4$ %-17% $\text{CO}_2$ /Air a également été étudiée en utilisant la technique de la chimiluminescence  $\text{OH}^*$  pour évaluer les effets de l'activation du plasma sur la hauteur

d'accrochage de la flamme, comme le montre la Figure V.4. Les expériences ont montré que l'accrochage de la flamme du biogaz au nez du brûleur s'effectue à partir de la fréquence 4 kHz. En effet, la présence du plasma à ces fréquences stimule la production d'espèces réactives et augmente la température locale, favorisant ainsi les réactions chimiques dans la flamme. Pour étudier plus en détail ces effets, une analyse des spectres a été réalisée pour étudier les espèces excitées dans la flamme. Les résultats ont montré que la décharge du plasma à des fréquences plus élevées conduit à la formation de plus d'espèces excitées, telles que OH\* et O\*.



**Figure V.4.** Images moyennes de 100 images instantanées d'intensité d'émission OH\* de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/air avec et sans activation du plasma en fonction de l'augmentation de la PRF.

La Figure V.5 montre la hauteur d'accrochage ( $H_f$ ) d'une flamme de 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air en fonction des PRFs. On rappelle que les hauteurs d'accrochage des flammes ont été déterminées à partir des images de chimiluminescence OH\* après traitement.



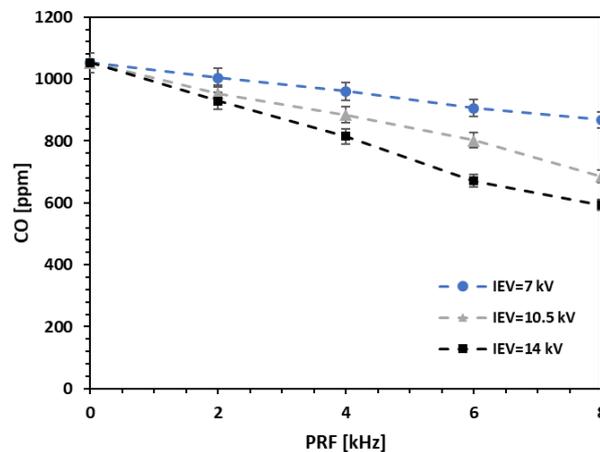
**Figure V.5.** Hauteur d'accrochage de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air à différentes PRFs du plasma.

Il a été observé que la présence du plasma réduisait considérablement la hauteur d'accrochage de la flamme. Par exemple, avec une fréquence de répétition du plasma de 10 kHz,  $H_f$  a été réduite de près de 74.6% par rapport au cas sans plasma. Cette réduction de la hauteur d'accrochage indique que l'activation du plasma conduit à un processus de combustion plus stable et plus efficace. L'activation du plasma a joué un rôle crucial dans le contrôle de  $H_f$  de la flamme pour les deux types de flammes étudiées. À mesure que la PRF du plasma augmentait, la base de la flamme s'approchait du brûleur. Les espèces chimiques impliquées de ces comportements seront discutées plus en détail dans la section suivante.

#### IV.2.1.1.b. Emissions polluantes

Dans cette section, les émissions polluantes  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{O}_2$  et  $\text{CO}_2$  avec différentes fréquences PRF et tensions IEV sont analysées. Chaque mesure a été effectuée trois minutes après les réglages des paramètres pour être dans un régime établi et a duré cinq minutes. Les concentrations des espèces chimiques présentées dans cette étude correspondent à des valeurs moyennes prises pendant ces cinq minutes.

La Figure V.6 présente les résultats de l'analyse de la concentration d'émission de CO dans les fumées de la flamme avec 17%  $\text{CO}_2$  dans le mélange de combustible, à une richesse globale fixée à 0.8,  $\text{Sn}=0.8$  et une puissance de 4.8 kW, en fonction de la PRF pour différentes IEV.



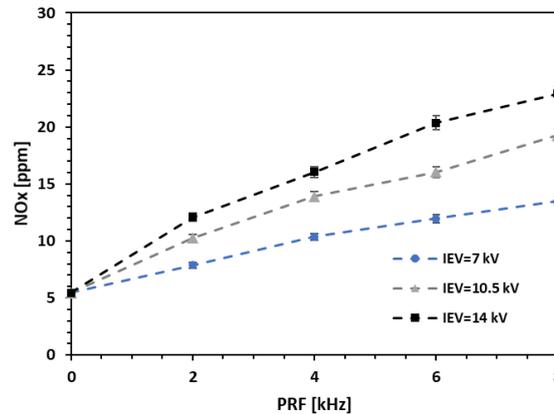
**Figure V.6.** Émissions de CO de la flamme  $83\%\text{CH}_4\text{-}17\%\text{CO}_2\text{/Air}$  en fonction de la PRF à différentes IEV. Les résultats montrent que le CO est présent en concentrations élevées sans activation plasma, et même avec une activation plasma à basse tension électrique appliquée (par exemple, à IEV=7 kV).

Les résultats montrent que l'augmentation de PRF diminue significativement la teneur en CO dans les gaz brûlés. Le CO diminue de 46% de 1053 à 569 ppm lorsque le PRF augmente de 0 à 10 kHz à IEV=14 kV. Cette diminution de la concentration de CO est due à la conversion du CO en  $\text{CO}_2$ , qui est favorisée par la présence de OH. L'oxydation du CO en présence de OH est en effet l'un des chemins les plus efficaces pour l'élimination du CO [67], OH est hautement réactif et peut libérer une grande quantité de chaleur lors de la réaction. La réaction du CO avec  $\text{OH}^*$  conduit à la formation de  $\text{CO}_2$  et de radicaux  $\text{H}^*$  selon la réaction suivante :



En somme, ces résultats suggèrent que l'activation plasma pourrait contribuer à réduire les émissions CO en favorisant sa conversion en CO<sub>2</sub> via la présence d'OH\*, qui est de plus en plus élevé avec l'augmentation de la fréquence du plasma.

La Figure V.7 montre les résultats de la concentration d'émission de NO<sub>x</sub> dans les gaz brûlés en fonction des fréquences de répétition d'impulsions et des tensions appliquées du plasma. Les résultats indiquent que lorsque la PRF du plasma est augmentée de 0 à 10 kHz à une IEV fixe de 14 kV, la concentration de NO<sub>x</sub> augmente de 5.5 ppm à 23.4 ppm. Cependant, cet effet diminue lorsque IEV diminue, ce qui suggère que la puissance du plasma a un impact fort sur la production de NO<sub>x</sub>.



**Figure V.7.** Émissions de NO<sub>x</sub> de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air en fonction de la PRF à différentes tensions électriques appliquées.

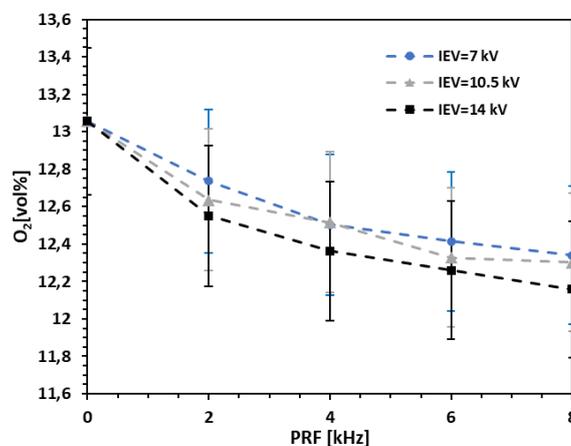
L'augmentation des émissions de NO<sub>x</sub> avec l'activation du plasma peut être attribuée à plusieurs facteurs. Tout d'abord, le plasma génère des radicaux et des espèces excitées, tels que N\* et O\*, qui peuvent réagir avec les molécules du combustible, entraînant ainsi la production de NO<sub>x</sub>. De plus, la température locale du plasma peut augmenter, ce qui peut favoriser la formation de NO<sub>x</sub> par les réactions thermiques via le mécanisme de Zeldovich [110]. Ces réactions incluent :



En outre, à une puissance du plasma plus élevée, les taux de formation de NO\* augmentent comme le montre la Figure IV.12, ce qui conduit à des émissions de NO<sub>x</sub> encore plus élevées. Cela est dû au fait que NO\* est un intermédiaire clé dans la production de NO<sub>x</sub> et que sa formation peut être renforcée par la présence de ces espèces excitées.

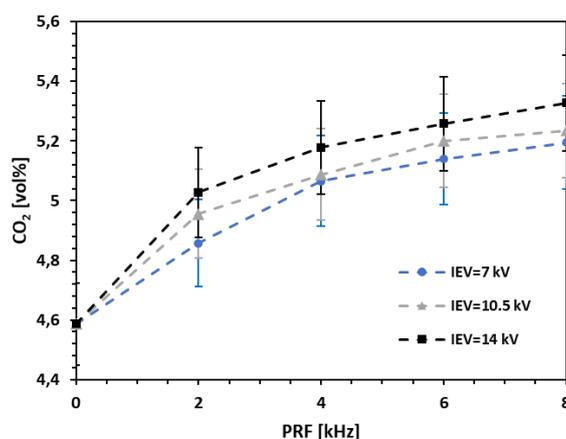
La Figure V.8 présente les émissions d'oxygène (O<sub>2</sub>) de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air en fonction de la fréquence PRF du plasma. Les données montrent que O<sub>2</sub> diminue à mesure que la PRF augmente. Cependant, cette réduction reste inférieure à 1% en valeur absolue, ce

qui, en termes relatifs, représente une diminution d'environ 10%. Cela indique que la PRF a un effet limité sur les émissions d'oxygène dans les gaz brûlés. D'autre part, les résultats indiquent que la tension électrique appliquée (IEV) n'a pas eu d'effet notable sur  $O_2$  dans la flamme étudiée.



**Figure V.8.** Émissions de  $O_2$  de la flamme  $83\%CH_4-17\%CO_2/Air$  en fonction de la PRF à différentes tensions électriques appliquées.

La Figure IV.9 présente les émissions de  $CO_2$  de la flamme  $83\%CH_4-17\%CO_2/Air$  en fonction de PRF à différentes tensions électriques appliquées lors de la combustion assistée par plasma. Les données révèlent une tendance à l'augmentation des émissions de  $CO_2$  à mesure que la PRF augmente. Toutefois, il est important de noter que cette augmentation n'est pas statistiquement significative, ce qui signifie que la variation observée est trop faible pour être considérée comme ayant un impact réel sur les émissions de  $CO_2$  dans les gaz brûlés. Parallèlement, l'étude montre également que les différentes IEV appliquées au plasma n'ont pas eu d'effet notable sur les émissions de  $CO_2$  dans la flamme étudiée. Cela suggère que la variation des tensions électriques appliquées n'a pas entraîné de changement significatif dans les niveaux d'émission de  $CO_2$  pour cette étude.



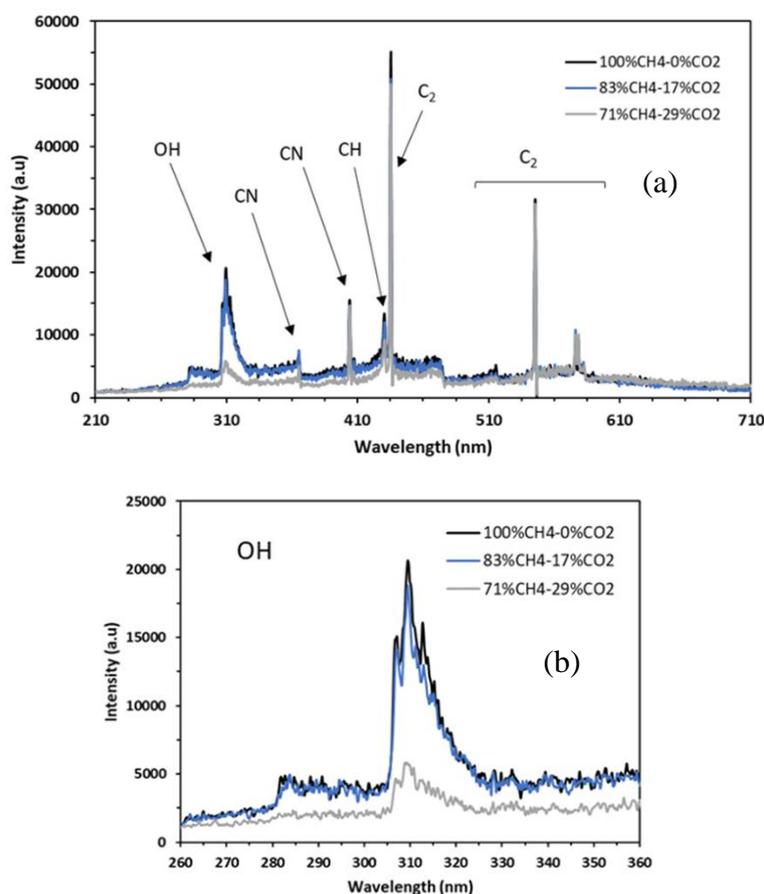
**Figure IV.9.** Émissions de  $CO_2$  de la flamme  $83\%CH_4-17\%CO_2/Air$  en fonction de la PRF à différentes IEV

### IV.2.1.2. Spectroscopie d'émission optique

Dans cette section, nous nous intéressons à la spectroscopie d'émission optique pour la configuration des électrodes Pointe-Tige-Pointe. Cette technique permet d'analyser les espèces présentes dans le plasma et leur évolution en fonction des paramètres opératoires. Deux aspects clés seront abordés dans cette partie : l'effet de l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible et l'effet de la fréquence de répétition des impulsions sur les spectres. En outre, nous examinerons également l'impact de la fréquence et de la tension délivrée par le générateur sur les espèces détectées.

#### IV.2.1.2.a. Effet de l'ajout de $\text{CO}_2$ dans le combustible

La Figure IV.10 présente les spectres d'émission optique (SEO) correspondant aux trois conditions de flamme avec 0 %, 17 % et 29 % de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, à une richesse globale de 0.8, comme indiqué dans le Tableau II.6.



**Figure IV.10.** (a) SEO mesurés à partir des flammes avec trois compositions de mélange de combustible (100% CH<sub>4</sub>, 83% CH<sub>4</sub>-17% CO<sub>2</sub>, 71% CH<sub>4</sub>-29% CO<sub>2</sub>) (voir Tableau II.6), (b) Spectres d'émission OH\* mesurés à partir des flammes avec différentes compositions de mélange de combustible.

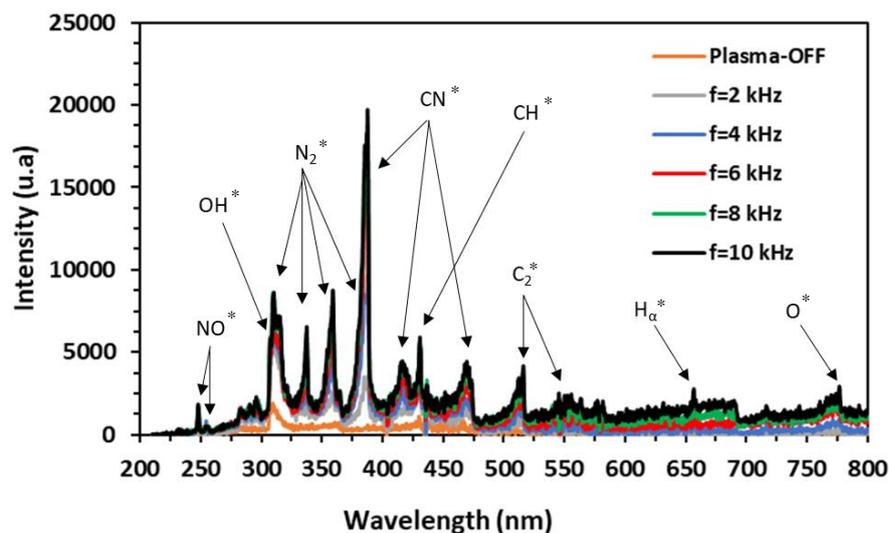
Dans cette étude, les pics des espèces excitées OH\* (309 nm), CH\* (431 nm) et le système de bande Swan C<sub>2</sub>\* ont été détectés, qui sont les pics observés dans les flammes d'hydrocarbures.

Les résultats montrent que l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible entraîne une diminution de bandes moléculaires d' $\text{OH}^*$ ,  $\text{CN}^*$  et  $\text{CH}^*$  dans la flamme. Cependant, l'effet le plus significatif est observé sur le pic spectral d' $\text{OH}^*$ . L'émission  $\text{OH}^*$  présentée dans Figure IV.11.(b) se produit dans la plage de longueurs d'onde de 280 à 320 nm, avec une intensité maximale autour de 309 nm. L'intensité maximale de l'émission  $\text{OH}^*$  est observée dans les flammes à faible concentration de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de combustible. Par exemple, l'ajout de 29% de  $\text{CO}_2$  au mélange de biogaz provoque une diminution d'un facteur de 3.3 de l'émission  $\text{OH}^*$  à 309 nm. La présence de  $\text{CO}_2$  dans le combustible a un impact significatif sur la température de la flamme, la position du front de flamme et la zone de réaction, comme rapporté dans [99]. Le  $\text{CO}_2$  agit comme un diluant et abaisse la température de la flamme, réduisant ainsi la formation de radicaux de combustion hautement actifs comme l' $\text{OH}^*$ ,  $\text{CN}^*$  et  $\text{CH}^*$ . Par conséquent, la distribution des espèces intermédiaires et des radicaux dans le processus de combustion est étroitement liée à la température de la flamme dans la zone de réaction.

#### IV.2.1.2.b. Effet du plasma sur les spectres d'émission optique

La Figure IV.11 montre que l'activation plasma modifie les caractéristiques de la flamme et que l'augmentation de PRF renforce encore cet effet. Ceci suggère que les voies de réaction sont différentes de celles de la combustion sans plasma. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'activation plasma introduit de nouvelles voies et mécanismes de réaction qui ne sont pas présents dans la combustion conventionnelle.

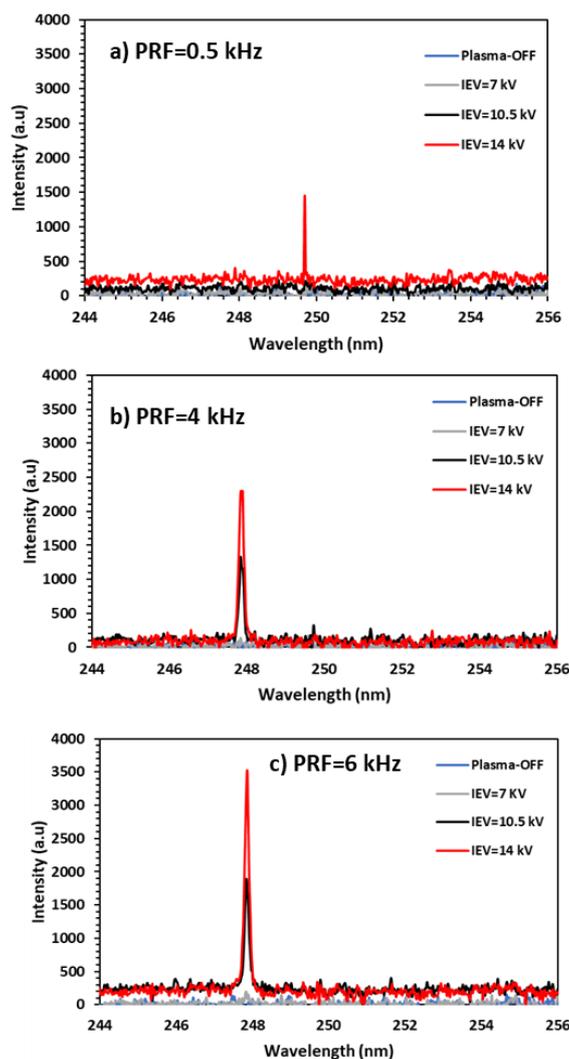
En effet, les résultats des SEO montrent que la présence du plasma PTP impulsif microseconde conduit à la détection de nouveaux pics spectraux de molécules excitées de  $\text{N}_2^*$  et  $\text{NO}^*$ , d'atomes  $\text{H}_\alpha^*$  et  $\text{O}^*$ , qui n'étaient pas présents avant l'activation plasma. Ces espèces excitées sont formées grâce au transfert d'énergie du plasma aux espèces présentes lors de la combustion, conduisant à la formation d'intermédiaires et de radicaux hautement réactifs. L'augmentation de l'intensité de toutes les émissions avec le PRF indique que l'activation plasma peut avoir des effets favorables sur la flamme. En effet, les espèces excitées générées par le plasma peuvent initier et favoriser les réactions chimiques, conduisant à une combustion plus rapide et plus complète. Par exemple, les molécules excitées de  $\text{N}_2^*$  et  $\text{NO}^*$  peuvent favoriser la formation d'intermédiaires hautement réactifs tels que les radicaux  $\text{O}^*$  et  $\text{OH}^*$ , ce qui peut conduire à la stabilisation de la flamme et à l'amélioration de la combustion. Les détails supplémentaires sur les mécanismes réactionnels proposés pour expliquer ces observations seront discutés dans la section suivante.



**Figure IV.11.** Spectre d'émission de la flamme 83% CH<sub>4</sub>-17% CO<sub>2</sub>/Air à différentes fréquences de répétition du plasma.

Afin d'étudier l'effet du plasma PTP impulsionnel microsecondes sur différentes espèces, chaque plage de longueurs d'onde a été observée séparément dans les Figures IV.12 à IV.19. Les graphes présentent la spectroscopie d'émission optique de la flamme 83%CH<sub>4</sub>-17%CO<sub>2</sub>/Air à différentes IEV et PRF. Chaque plage de longueurs d'onde correspond à des espèces significatives telles que NO\*, OH\*, N<sub>2</sub>\*, CN\*, CH\*, C<sub>2</sub>\*, et H<sub>α</sub>\*.

La Figure IV.12 illustre le spectre d'émission NO\* présente dans la plage 244-256 nm à 3 différentes PRFs : 0.5 kHz, 4 kHz et 6 kHz avec différents IEVs. L'étude montre qu'après l'ajout du plasma PTP à des niveaux de PRF et IEV spécifiques, il y a eu une forte augmentation du niveau d'intensité de NO\*. La Figure IV.12 démontre que l'effet du plasma sur les spectres de NO\* commence à être observé à partir d'une tension IEV de 10.5 kV et d'une fréquence PRF de 4 kHz. En revanche, à une fréquence de 0.5 kHz, le pic observé ne semble pas être une détection du spectromètre, mais plutôt une raie cosmique. A partir de 4 KHz, l'ajout du plasma impulsionnel PTP entraîne une augmentation significative du niveau d'intensité de NO\*. L'augmentation du niveau d'intensité de NO\* a été attribuée à l'augmentation du PRF du plasma. L'étude a révélé qu'à IEV de 14 kV, l'intensité de NO a augmenté de 54% lorsque le PRF a été augmenté de 2 kHz (de 4 kHz à 6 kHz). Cette augmentation peut être expliquée par un apport de puissance accru, entraînant une production d'espèces réactives telles que N<sub>2</sub>, O, OH, etc., responsables de la formation de NO. La décharge électrique dissocie N<sub>2</sub> et génère des états excités vibrationnel. Les réactions entre les atomes libres et les molécules excitées peuvent augmenter la production de NO\* [111]. En général, l'excitation accrue des espèces et la formation d'espèces réactives dues à la décharge électrique du plasma contribuent à l'augmentation des niveaux d'intensité de NO\*.

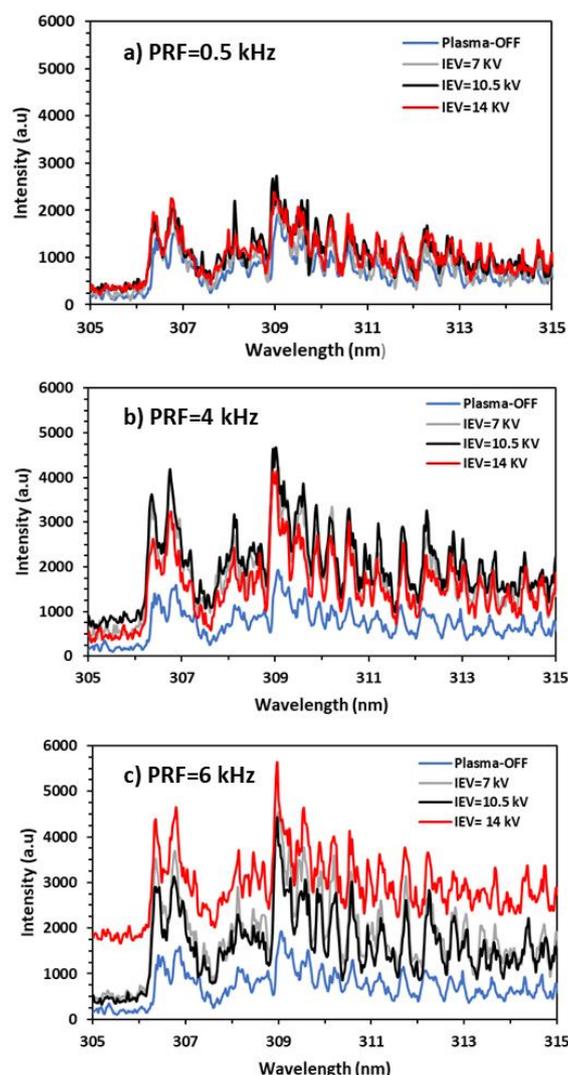


**Figure IV.12.** Spectre d'émission de  $\text{NO}^*$  dans la plage de 244-256 nm à 3 différentes PRFs: a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

La Figure IV.13 permet de mettre en évidence que l'augmentation de l'IEV du plasma a un impact significatif sur l'intensité de la raie spectrale  $\text{OH}^*$  lorsque le PRF atteint une valeur de 4 kHz ou 6 kHz. Par ailleurs, lorsque la PRF est fixée à une valeur de 0.5 kHz, même une augmentation de l'IEV ne permet pas d'augmenter l'intensité de la bande spectrale  $\text{OH}^*$ . Ces observations suggèrent que le PRF joue un rôle critique dans la production de radicaux  $\text{OH}^*$ . Lorsque l'IEV est maintenu à une valeur constante de 14 kV et que le PRF est augmenté de 4 kHz à 6 kHz, l'intensité de la bande spectrale  $\text{OH}^*$  à 309 nm a augmenté de près de 37%.

L'intensité maximale de la bande spectrale  $\text{OH}^*$  (306.5-309 nm) a été observée à une PRF de 6 kHz et a augmenté de plus de 3 fois lorsque l'IEV était augmenté à 14 kV en comparaison au cas plasma OFF. Ces résultats indiquent que l'augmentation de l'IEV et du PRF peut significativement améliorer la production de radicaux  $\text{OH}^*$  dans le plasma. Il est important de noter que les radicaux  $\text{OH}^*$  sont formés par la dissociation de molécules d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ou d'autres espèces contenant des groupes hydroxyle [112]. Ces espèces sont excitées par les électrons énergétiques présents dans le plasma, ce qui entraîne leur dissociation en radicaux

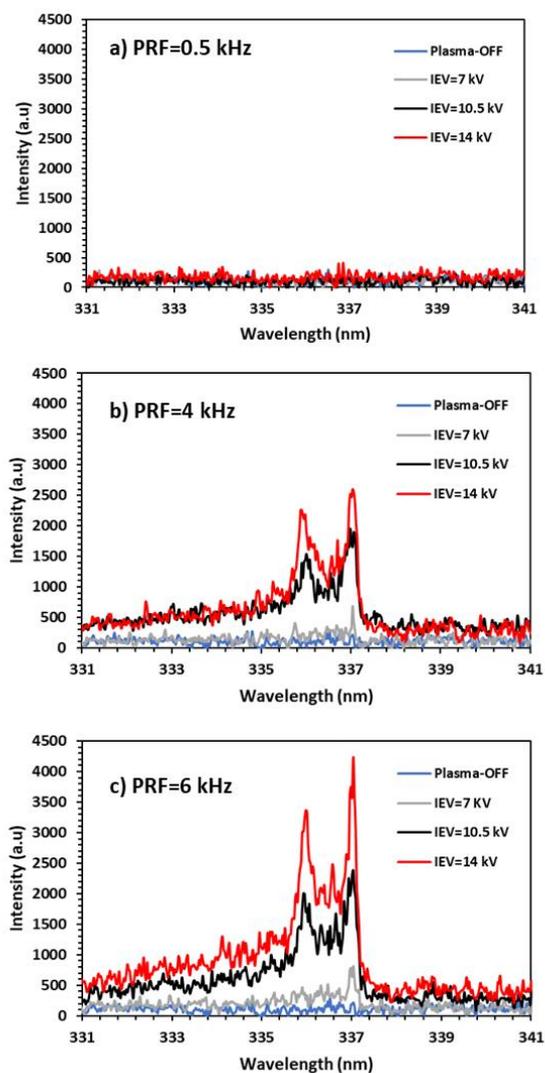
OH\*. Ainsi, l'augmentation de l'énergie fournie par le PRF et l'IEV peut augmenter la dissociation de ces espèces, ce qui se traduit par une amélioration significative de la production de radicaux OH\*. Ces résultats soulignent donc l'importance du PRF et de l'IEV dans la production de radicaux OH\* et la nécessité de les ajuster de manière optimale pour maximiser l'efficacité de la production de ces radicaux dans le milieu plasma-flamme.



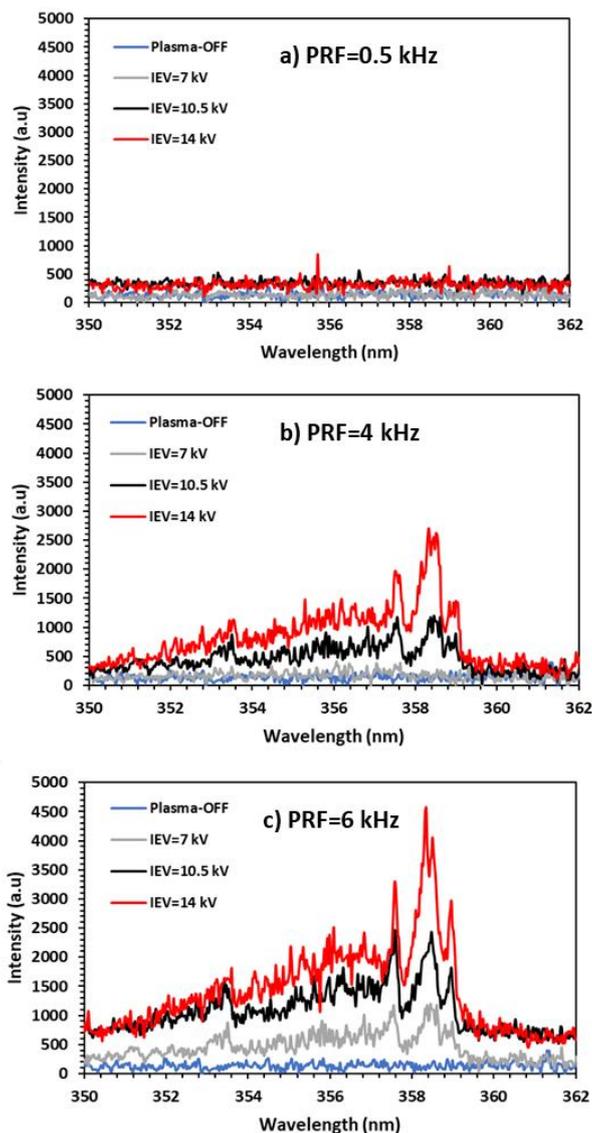
**Figure IV.13.** Spectre d'émission de OH\* dans la plage de 305-315 nm à 3 différentes PRFs: a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

Dans les Figures IV.14 et IV.15, nous nous intéressons à la plage de longueur d'onde 330 à 350 nm, intervalle de présence de l'espèce chimique N<sub>2</sub>\*. L'un des phénomènes observés lors de l'activation du plasma dans cette étude est l'apparition d'espèces excitées de l'azote, ainsi que le radical NH\* à 336 nm, comme illustré dans Figure IV.14. Cela est dû au fait que certains des électrons énergétiques générés par le plasma ont suffisamment d'énergie pour initier la chimie du plasma, ce qui conduit à la formation d'espèces d'azote telles que N<sub>2</sub>\*. Les résultats montrent que les émissions de N<sub>2</sub> ont augmenté avec l'augmentation du PRF (de 4 kHz à 6 kHz) jusqu'à 70% à 337 nm (Figure IV.14) et 200% à 358.5 nm (Figure IV.15) à une IEV de 14 kV.

Ce phénomène a été discuté par Chintala et al. [113] et Adamovich et al. [114], qui ont expliqué que la détection du système  $N_2^*$  avec l'activation du plasma signifie que certains des électrons énergétiques générés par le plasma ont une énergie supérieure à 11 eV [115]. L'augmentation de  $N_2^*$  dans la combustion assistée par plasma avec l'activation du plasma est le résultat de l'interaction des électrons énergétiques générés par le plasma avec les molécules d'azote dans le mélange de combustion.

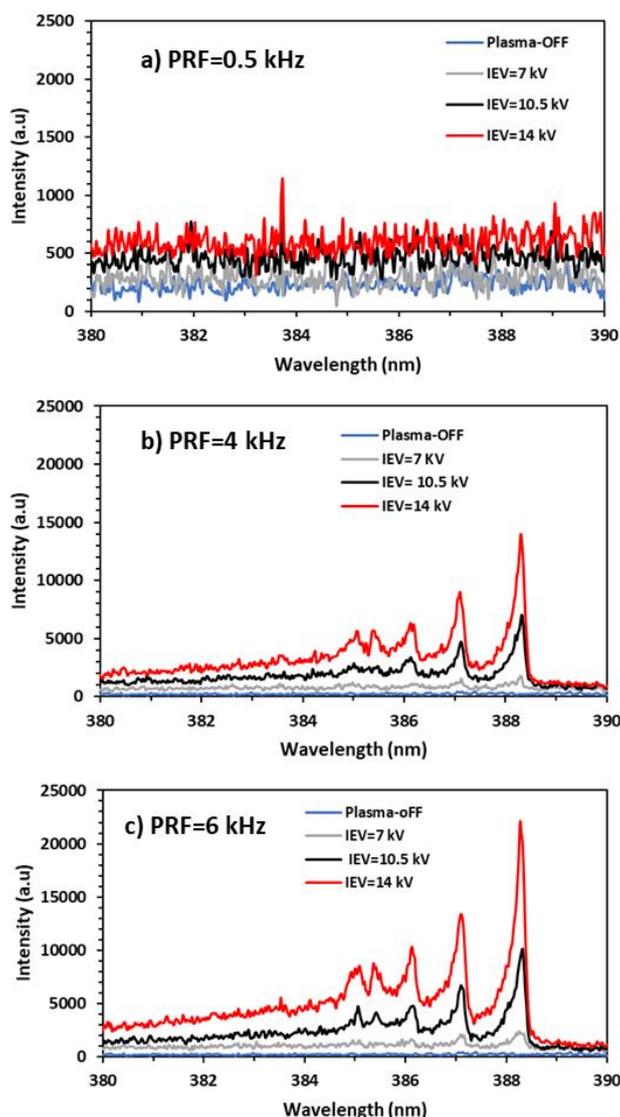


**Figure IV.14.** Spectres d'émission de NH (336 nm) et de  $N_2^*$  (336 nm) dans la plage de 331-341 nm à 3 différentes PRFs : a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.



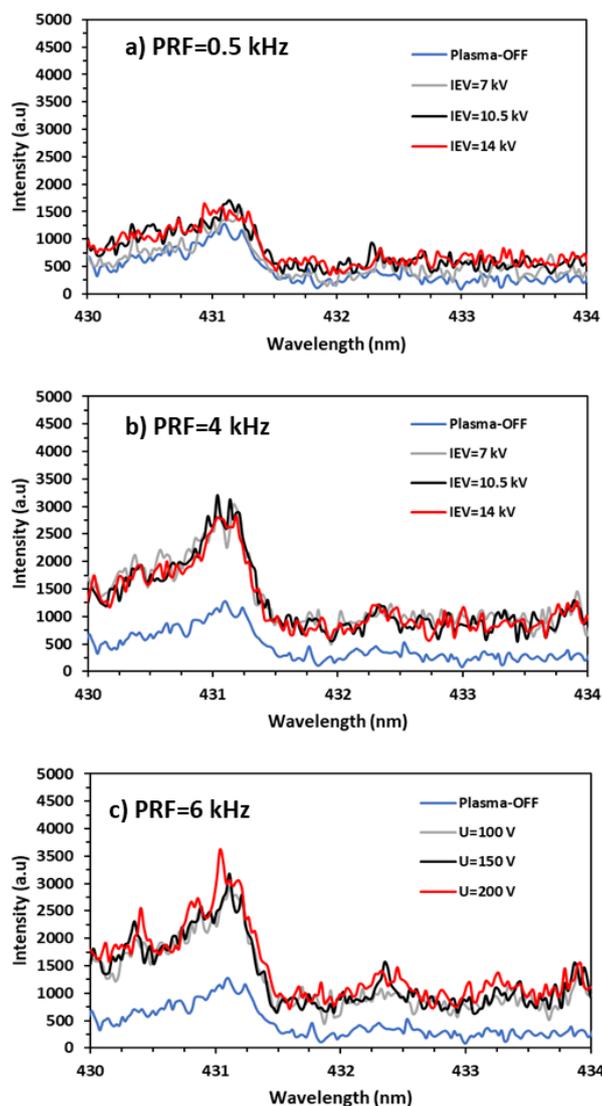
**Figure IV.15.** Spectre d'émission de  $N_2^*$  dans la plage de 350-362 nm à 3 différentes PRFs: a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

La Figure IV.16 présente l'effet des paramètres du plasma sur l'émission du radical  $CN^*$  (vers 388 nm), qui est plus prononcé à des PRFs et des IEVs relativement élevés. À des IEVs faibles (7 kV), il n'y a pas de changement significatif dans l'intensité de l'émission du radical  $CN^*$ . Cependant, pour des PRFs supérieurs à 4 kHz et lorsque la tension du plasma atteint 10.5 kV, l'effet du plasma sur l'émission  $CN^*$  devient évident. Cela suggère que l'activation du plasma devient plus efficace à des niveaux d'énergie et de fréquences plus élevés. L'augmentation de l'intensité de l'émission du radical  $CN^*$  avec l'augmentation de la fréquence de répétition des impulsions indique que l'activation du plasma a un effet sur la formation des radicaux  $CN^*$  lors du processus de combustion. Le radical  $CN^*$  est une espèce réactive qui joue un rôle critique dans la chimie des flammes, car il participe à la production de plusieurs intermédiaires importants de la combustion [116].



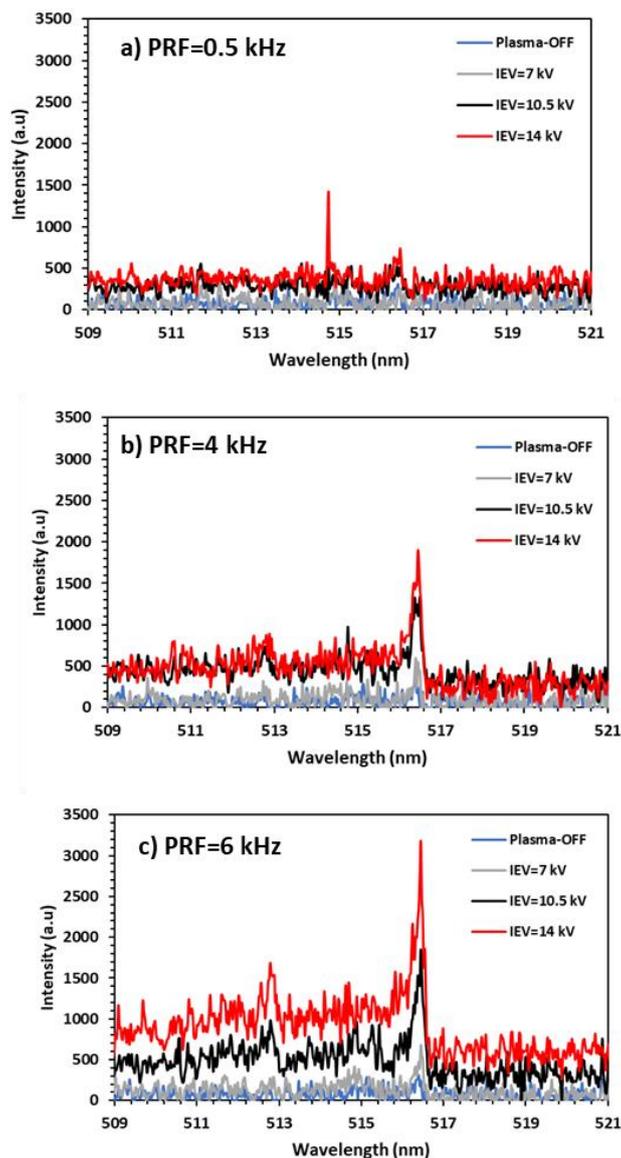
**Figure IV.16.** Spectre d'émission CN\* dans la plage de 380-390 nm à 3 différentes PRFs: a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

La Figure IV.17 montre l'intensité d'émission de CH\* (radical moléculaire) à une longueur d'onde de 431 nm en fonction de la fréquence de répétition de l'impulsion du plasma (PRF) et de la tension délivrée par le générateur (IEV). L'intensité d'émission de CH\* dans la flamme augmente avec l'augmentation de la PRF. Cependant, à une PRF fixe et pour une augmentation supplémentaire de la tension électrique appliquée, l'intensité de CH\* reste presque stable. Une explication possible de cette observation est que le plasma peut produire d'autres espèces réactives que CH\* pour des IEVs plus élevées. Ces espèces peuvent rivaliser avec CH\* pour les réactifs disponibles, ce qui entraîne une intensité stable d'émission de CH\*, malgré une augmentation de l'IEV.



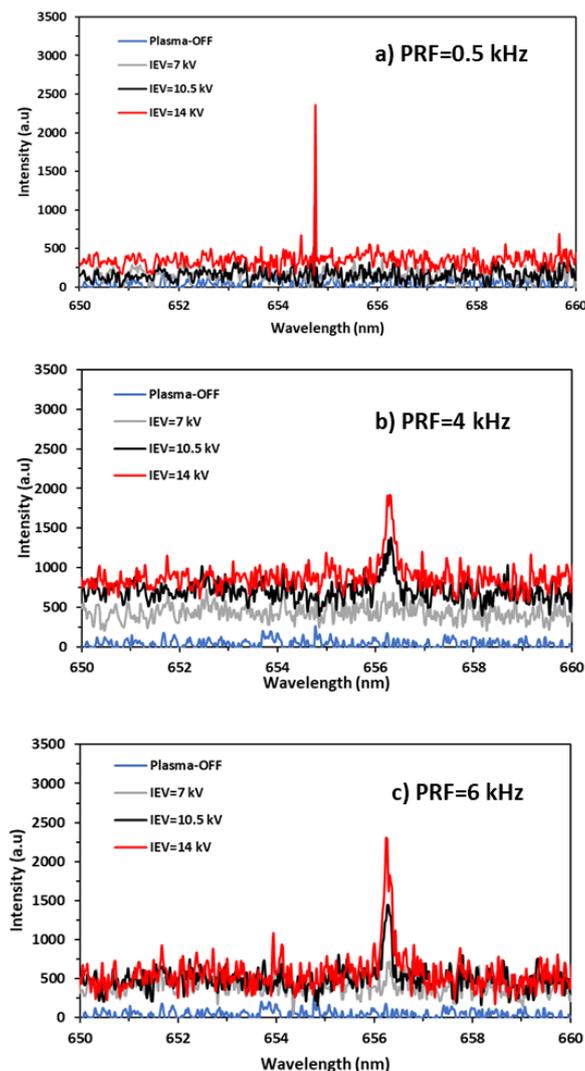
**Figure IV.17.** Spectre d'émission  $\text{CH}^*$  dans la plage de 430-434 nm à 3 différentes PRFs : a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

La Figure IV.18 montre l'intensité de la bande d'émission de  $\text{C}_2^*$  à une longueur d'onde de 516.4 nm en fonction de la fréquence de répétition de l'impulsion du plasma et de la tension électrique appliquée. Les résultats montrent que l'intensité de  $\text{C}_2^*$  dans la flamme augmente avec l'augmentation de la PRF du plasma. Plus précisément, lorsque la PRF du plasma passe de 4 à 6 kHz à une IEV de 14 kV, l'intensité de  $\text{C}_2^*$  augmente de près de 68 %. L'augmentation observée de l'intensité de  $\text{C}_2^*$  avec l'augmentation de la PRF suggère que le plasma renforce la production des radicaux  $\text{C}_2^*$  par son impact sur le processus de combustion. Cet effet peut être dû à divers mécanismes, tels que l'augmentation de l'ionisation et de l'excitation des espèces réactives, la promotion de la formation d'intermédiaires radicalaires ou la modification de la température locale dans la flamme [117].



**Figure IV.18.** Spectre d'émission  $C_2^*$  dans la plage de 509-521 nm à 3 différentes PRFs : a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

Les résultats de la Figure IV.19 démontrent que l'activation du plasma peut entraîner l'apparition de la raie de Balmer de l'hydrogène ( $H_\alpha$ ) à 656 nm. Cette raie spectrale n'était pas observable à partir de la flamme sans décharge plasma, ce qui suggère que la décharge génère des atomes H excités ( $H^*$ ) dans la flamme. L'augmentation de la production de radicaux  $OH^*$  et  $O^*$  lors de l'activation du plasma peut conduire à la formation d'atomes  $H^*$  excités observés via les mesures des SEO. Notons que l'intensité d'émission de raie spectrale  $H_\alpha^*$  augmente légèrement avec l'augmentation de la fréquence PRF de 4 à 6 kHz à une tension de 14 kV.



**Figure IV.19.** Spectre d'émission  $H_{\alpha}$  dans la plage de 650-660 nm à 3 différentes PRFs : a) 0.5 kHz, b) 4 kHz et c) 6 kHz avec différents IEVs.

### IV.3. Configuration des électrodes: Arc glissant autour d'une tige fixe longue

Dans cette section, il s'agit d'étudier la configuration des électrodes arc-glissant appliqué à une tige centrale relativement longue (50 mm de longueur de la sortie du brûleur) de diamètre de 8 mm (voir Chapitre II, section II.2.2.2). Le tableau II.6 dans le chapitre II résume les conditions opératoires utilisés.

#### IV.3.1. Caractérisation des flammes de biogaz sans plasma

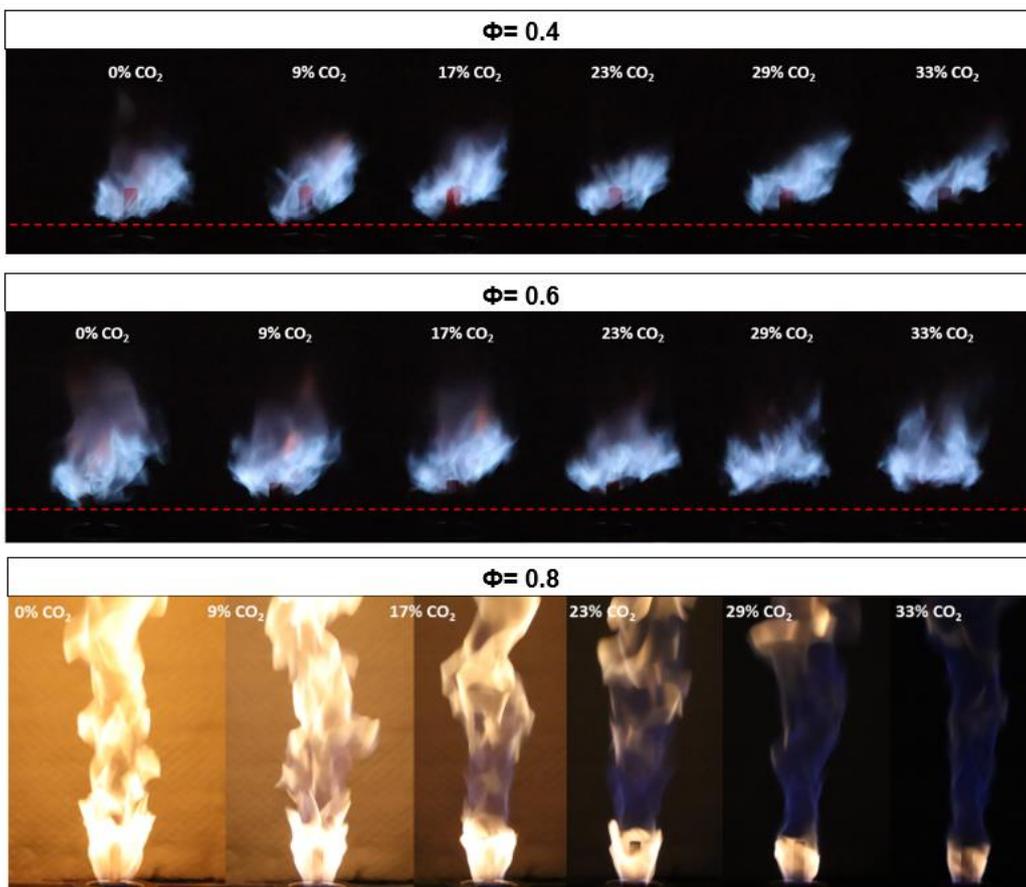
Dans cette section, nous allons présenter la caractérisation des flammes de biogaz avant l'activation du plasma. Cette étape est essentielle pour comprendre les propriétés et le comportement de ces flammes dans différentes conditions. Nous allons examiner l'effet de l'ajout de  $CO_2$  dans le combustible, ainsi que son impact sur la stabilité des flammes, la formation des émissions polluantes et les températures des gaz brûlés. De plus, nous étudierons également l'effet de la richesse globale sur ces paramètres. Cette analyse nous permettra d'obtenir des informations sur les caractéristiques des flammes de biogaz.

La Figure IV.20 présente les photographies des flammes à trois richesses globales différentes (0.4, 0.6 et 0.8) avec une durée d'exposition de 1/100 s. La forme rectangulaire présente dans les flammes sur les photographies est la tige centrale qui servira d'électrode dans le cas d'activation du plasma.

#### IV.3.1.1. Stabilité des flammes de biogaz

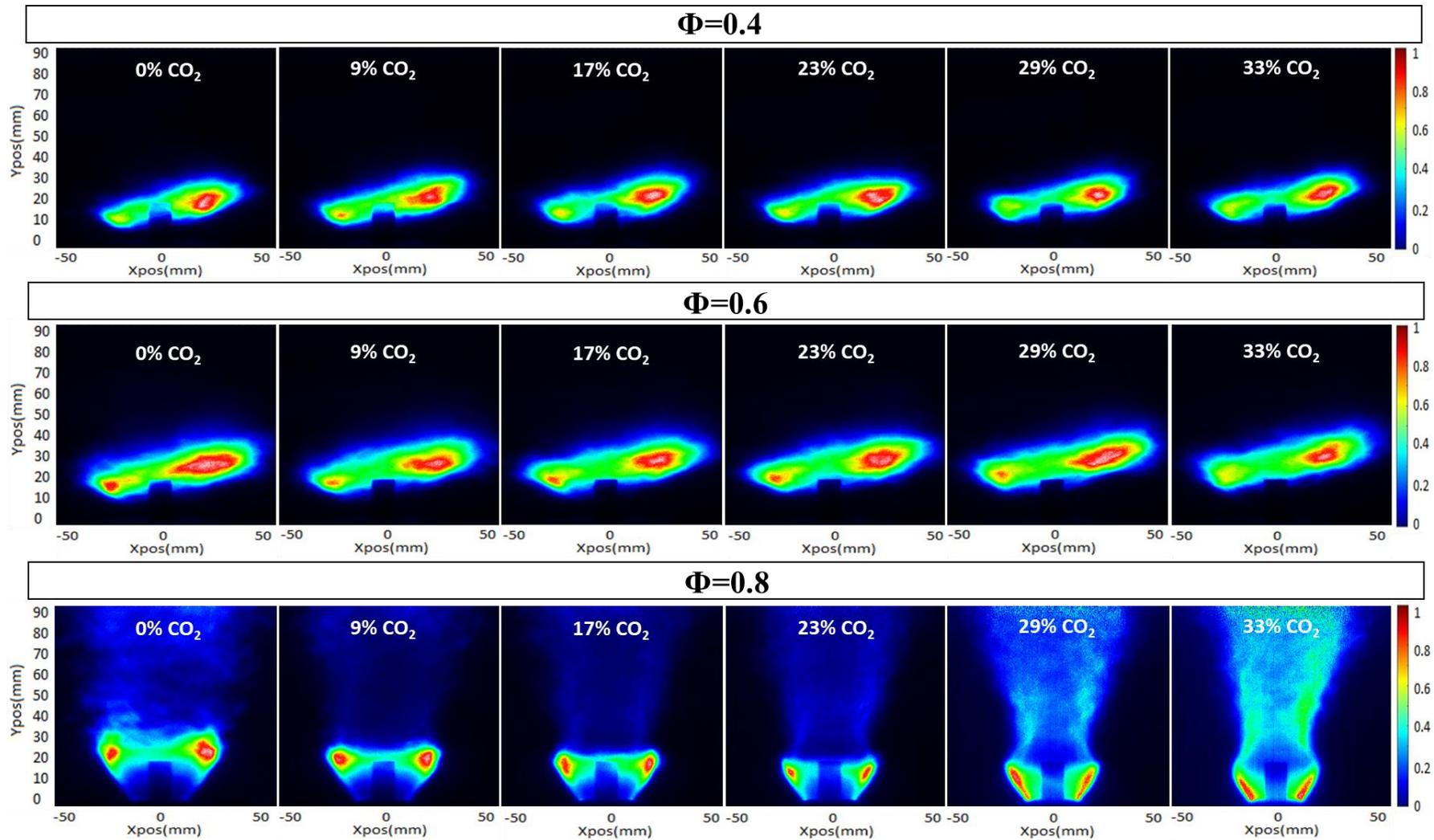
Les résultats présentés dans la Figure IV.20 révèlent que la présence de  $\text{CO}_2$  dans le combustible a un impact significatif sur l'apparence et la position des flammes par rapport au brûleur. Pour les flammes à 0.4 et 0.6 de richesse globale, la flamme était initialement liftée et l'ajout de  $\text{CO}_2$  a entraîné une augmentation de la hauteur d'accrochage de la flamme. En revanche, pour la flamme à une richesse de 0.8, la flamme était initialement accrochée au brûleur et l'ajout de  $\text{CO}_2$  a réduit la couleur jaune dans la flamme tout en la gardant accrochée. La couleur de la flamme varie du jaune au bleu en fonction de la concentration de  $\text{CO}_2$ , qui influe sur le comportement et la structure de la flamme.

Ces résultats soulignent l'importance de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, qui affecte la position et la couleur de la flamme (les suies). Plus précisément, une augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans le combustible provoque un éloignement de la flamme du brûleur. En outre, la couleur de la flamme varie en fonction de la concentration de  $\text{CO}_2$ .



**Figure IV.20.** Photographies des flammes avec un temps d'exposition de 1/100 s en faisant varier le taux de CO<sub>2</sub> pour trois différentes richesses globales (0.4, 0.6 et 0.8). La ligne rouge en pointillé montre la base de la flamme sans CO<sub>2</sub>

La Figure IV.21 présente des images moyennes de chimiluminescence OH\* en fonction du taux de CO<sub>2</sub> dans le combustible (0%, 9%, 23% et 33%) pour un nombre de swirl de 0.8. L'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible déplace la flamme vers le haut pour des richesses de 0.4 et 0.6. Cette évolution est principalement due à une diminution de la vitesse de combustion de la flamme [118] ainsi qu'à une baisse de la température de la flamme [119], ce qui réduit sa capacité à se stabiliser près du brûleur. Par le biais de la chimiluminescence OH\*, nous avons extrait les hauteurs d'accrochage des flammes liftées pour ces deux configurations.



**Figure IV.21.** Images moyennes de la chimiluminescence OH\* en fonction des taux de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour différentes richesses (0.4, 0.6 et 0.8)

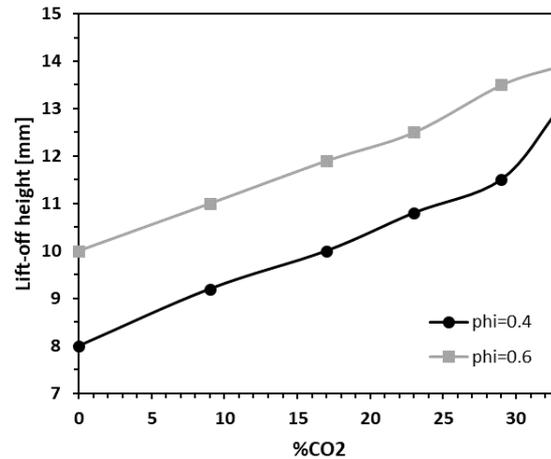
La Figure IV.22 présente les hauteurs d'accrochage ( $H_f$ ) en fonction de la fraction de  $\text{CO}_2$ . On observe une augmentation presque linéaire de la  $H_f$  avec le pourcentage de  $\text{CO}_2$ . Pour la flamme ayant une richesse de 0.6, la hauteur d'accrochage passe de 10 mm à 14 mm en passant de  $\text{CH}_4$  pur à 33% de  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Ce phénomène s'explique par plusieurs facteurs :

- Effet de dilution : L'ajout de  $\text{CO}_2$  induit un effet de dilution, réduisant ainsi la concentration des espèces réactives. Cela entraîne une diminution du taux de réaction et, par conséquent, une diminution de la vitesse de combustion de la flamme, ce qui affaiblit sa stabilité.
- Effet thermique : L'ajout de  $\text{CO}_2$  modifie la température locale de la flamme. En diminuant la température de la flamme, le  $\text{CO}_2$  affecte sa structure et sa stabilité, entraînant ainsi un décrochage de flamme plus important.
- Effet chimique direct : Le  $\text{CO}_2$  participe également à des réactions chimiques. Cette participation peut influencer la structure de la flamme et contribuer à son décrochage. Cet effet sera abordé plus en détail dans les résultats de la spectroscopie d'émission optique, section V.3.3.3, où il a été constaté que l'ajout de  $\text{CO}_2$  réduit l'intensité d'émission des espèces réactives telles que  $\text{OH}^*$  et  $\text{CH}^*$ .

En combinant ces effets de dilution, thermique et chimique, l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible entraîne un décrochage de la flamme.

La richesse globale du mélange combustible joue un rôle crucial dans les caractéristiques des flammes de biogaz. En modifiant la proportion du biogaz par rapport à l'air, on peut observer des variations significatives de la stabilité des flammes et de la formation des émissions polluantes. Dans cette section, nous examinons plus en détail l'effet de la richesse globale sur la stabilité des flammes de biogaz ainsi que sur la formation des émissions polluantes. On rappelle ici que la richesse globale est prise à l'injection pour une flamme non-prémélangée, car il est difficile de connaître la valeur locale de la richesse.

D'après les observations des Figures IV.21 et IV.22, on constate une légère augmentation de la hauteur d'accrochage de la flamme lorsqu'on passe d'une richesse de 0.4 à 0.6. Cette variation est estimée à seulement 2 mm, ce qui reste relativement faible. Il convient de souligner que cette différence peut être attribuée à l'incertitude expérimentale et peut être considérée comme étant dans la marge d'erreur. Cependant, dès lors que la richesse atteint 0.8, la flamme reste complètement accrochée au brûleur pour tous les cas de flammes avec différentes fractions de  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Cette observation indique que la flamme est stabilisée très près du brûleur et ne s'élève plus de manière significative. En effet, l'augmentation de la richesse entraîne une adhérence complète de la flamme à la buse du brûleur, ce qui se traduit par la formation d'une flamme jaune très lumineuse à  $\Phi=0.8$  et une forte production de suies.

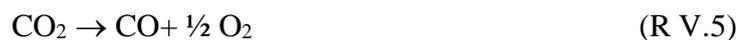


**Figure IV.22.** Hauteur d'accrochage en fonction des différents pourcentages d'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour les flammes décrochées avec des richesses de 0.4 et 0.6, à des puissances de flamme de 2.6 kW et 3.6 kW respectivement, et un Sn= 0.8.

#### IV.3.1.2. Formation des émissions polluantes

L'effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> sur les concentrations de CO et de NO<sub>x</sub> dans les gaz brûlés est présenté dans la Figure IV.23, pour trois richesses globales différentes (0.4 ; 0.6 et 0.8) et un nombre de swirl de 0.8.

Les résultats montrent que l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible a un impact non négligeable sur la teneur en CO dans les gaz brûlés, pour les trois richesses étudiées. Par exemple, pour une richesse de 0.4, la teneur en CO dans les gaz brûlés varie de 691 à 754 ppm lorsque la concentration de CO<sub>2</sub> augmente de 0% à 33%. Cette augmentation de 9% du CO peut-être attribuée à la dissociation thermique du CO<sub>2</sub> dans les régions de haute température de la flamme [120], la réaction est représentée comme suit :



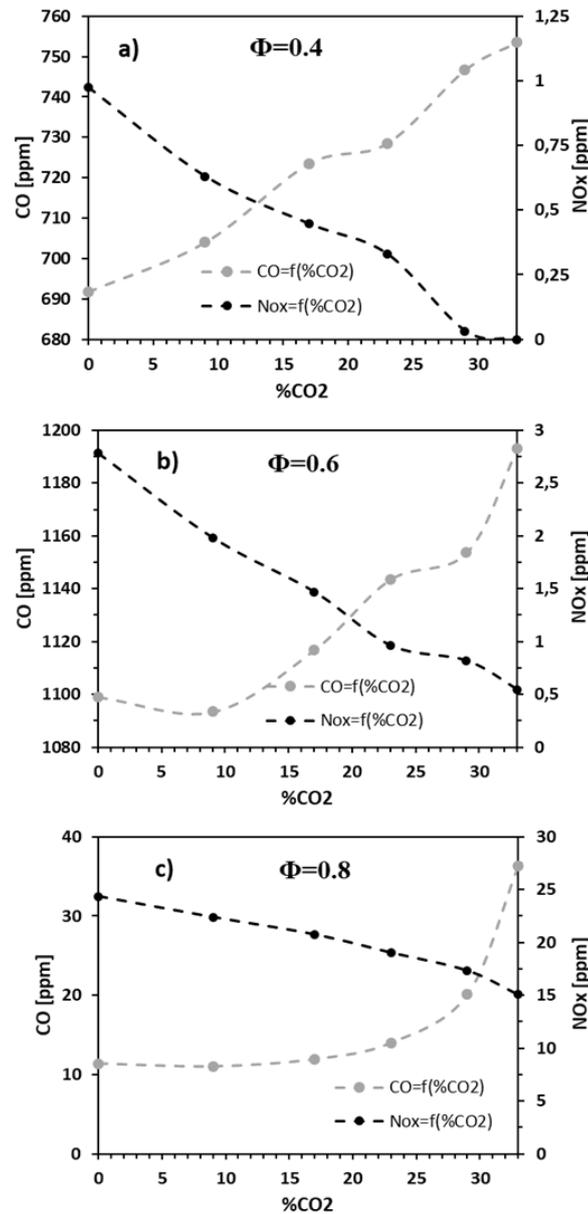
Cette dissociation thermique se produit uniquement à des températures élevées, généralement supérieures à 2000 K. Dans notre cas, la variation de la richesse locale des réactifs non prémélangés, peut contribuer à ces variations de la teneur en CO. En effet, les variations locales de la richesse provoquent des fluctuations de dégagement de chaleur, favorisant ainsi la dissociation thermique du CO<sub>2</sub> et la formation de CO.

La production de CO est aussi favorisée lors de la combustion incomplète c'est-à-dire dans les zones où la concentration de combustible est élevée, les températures sont basses et les concentrations d'air sont relativement faibles, ce qui ralentit le taux de réaction d'oxydation du CO en CO<sub>2</sub> [103]. L'ajout de CO<sub>2</sub> au mélange favorise des températures plus basses, ce qui contribue également à la formation de CO par limitation de la réaction d'oxydation complète. Cela conduit finalement à des niveaux plus élevés de CO dans certaines régions de la flamme.

L'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible permet de réduire la teneur en NO<sub>x</sub> dans les gaz brûlés pour toutes les richesses étudiées. Par exemple, pour une richesse de 0.8, la concentration de NO<sub>x</sub> diminue de 24 à 15 ppm en augmentant la proportion de CO<sub>2</sub> à 33%, soit une réduction de 38% des NO<sub>x</sub>. Il est important de noter que, même avant l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible, les taux de NO<sub>x</sub> sont déjà très bas pour les richesses de 0.4 et 0.6. Cette diminution des NO<sub>x</sub> peut être attribuée à l'effet thermique connu sous le nom de mécanisme de Zeldovich, résultant de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible. Une baisse de la température de la flamme entraîne une émission moindre de NO<sub>x</sub>, en concordance avec le mécanisme de formation thermique des NO<sub>x</sub> [121]. Ce résultat n'est pas surprenant, car il est bien connu que le CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O (EGR) sont utilisés dans certaines installations de combustion (turbines à gaz, moteurs...) pour réduire les émissions polluantes lors de la combustion, en particulier les NO<sub>x</sub>. Des résultats similaires concernant les émissions de CO et de NO<sub>x</sub> ont été rapportés par Zaidaoui et al. [122] dans le cas de l'ajout de CO<sub>2</sub> avec l'air. Ces observations soulignent l'efficacité de l'ajout de CO<sub>2</sub> en combustion pour réduire les émissions polluantes, en particulier les NO<sub>x</sub>. Elles confirment également l'importance de prendre en compte l'effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans la conception et l'optimisation des processus de combustion afin de minimiser l'impact environnemental.

L'augmentation de la richesse de 0.4 à 0.6 entraîne une augmentation des émissions de CO comme le montre Figure IV.23. Pour une richesse de 0.4, la concentration de CO avant l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible est de 692 ppm, tandis que pour une richesse de 0.6, elle atteint environ 1100 ppm. Dans des conditions de mélange pauvre, les émissions de CO diminuent avec la diminution de la richesse en raison de l'augmentation de la concentration en O<sub>2</sub>, ce qui favorise l'oxydation du CO en CO<sub>2</sub> [123]. Cependant, l'augmentation de la richesse de 0.6 à 0.8 conduit à une réduction des émissions de CO, d'une concentration d'environ 1130 ppm à 12 ppm pour un pourcentage de CO<sub>2</sub> < 20%. Cela s'explique par le fait que la flamme se comporte différemment à mesure que la richesse augmente de 0.6 à 0.8, devenant plus stable et accrochée au brûleur avec une libération beaucoup moins importante de CO et une formation plus importante des suies.

L'augmentation de la richesse du mélange de combustion a également un impact significatif sur les émissions de NO<sub>x</sub>, en particulier pour une flamme avec une richesse de 0.8, qui est complètement accrochée au brûleur. On observe une augmentation considérable des émissions de NO<sub>x</sub>, passant de presque 0 ppm à 24 ppm pour une flamme de méthane. Cette augmentation est principalement due au mécanisme thermique de formation de NO<sub>x</sub>, qui dépend fortement de la température de la flamme. Avec une richesse plus élevée, la température de la flamme augmente, favorisant ainsi la production de NO<sub>x</sub>.

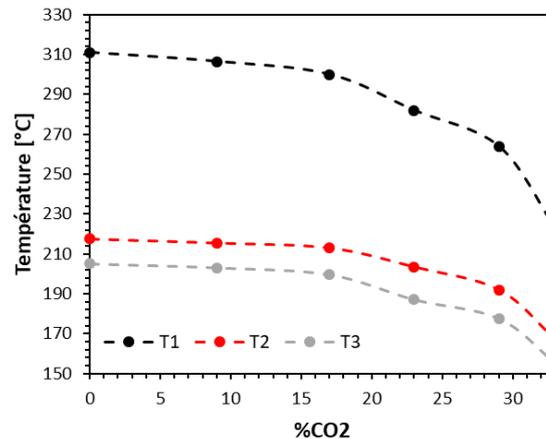


**Figure IV.23.** Émissions de NO<sub>x</sub> et de CO en fonction du pourcentage d'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible pour une richesse de a)  $\Phi=0.4$ , b)  $\Phi=0.6$  et c)  $\Phi=0.8$ .

### IV.3.1.3. Températures des produits de combustion

La tendance de variation de la température en ajoutant du CO<sub>2</sub> dans le combustible avec une richesse de 0.4 a été examinée à l'aide de trois thermocouples de type K situés à différents emplacements dans la chambre de combustion, comme indiqué dans la Figure II.13. L'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible entraîne une diminution de la température des gaz brûlés, ce qui est le résultat de la réduction de la température de la flamme. Par exemple, l'ajout de 33% de CO<sub>2</sub> dans le combustible réduit la température des gaz brûlés T1 de 43%. Cet effet est dû aux propriétés thermiques et radiatives du CO<sub>2</sub> [99].

Ces résultats confirment les observations précédentes sur la diminution des émissions de NO<sub>x</sub> avec l'ajout de CO<sub>2</sub>. En effet, la diminution de la température de la flamme suite à l'ajout de CO<sub>2</sub> conduit à une réduction de la formation de NO<sub>x</sub>, en accord avec le mécanisme de thermique de la formation des NO<sub>x</sub>.



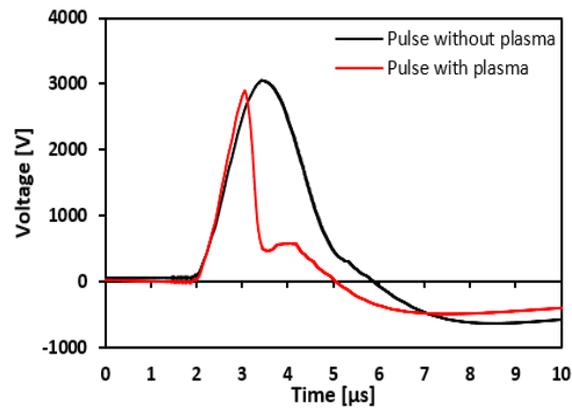
**Figure IV.24.** Température des gaz brûlés (à 3 différentes positions dans la chambre de combustion) en fonction du taux de CO<sub>2</sub> à une richesse de  $\Phi=0.4$ .

### IV.3.2. Combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant

Dans cette section, nous allons nous concentrer sur l'utilisation du plasma à arc glissant pour améliorer la combustion de biogaz. Nous allons caractériser le plasma utilisé et examiner son effet sur la stabilité des flammes de biogaz, les émissions polluantes et les températures des gaz dégagés. Nous allons également utiliser la spectroscopie d'émission optique pour étudier l'effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible sur les spectres d'émission optique dans la flamme et au niveau du plasma, ainsi que l'effet de l'activation du plasma sur ces spectres.

#### IV.3.2.1. Caractérisation du plasma

L'évolution temporelle de l'impulsion HT, avec et sans activation du plasma, est présentée dans la Figure IV.25. La forme de l'impulsion de tension est modifiée par le déclenchement du plasma. La tension appliquée se réfère à l'amplitude maximale de la tension, avant la chute brutale de l'impulsion résultant de l'allumage du plasma. Pour tous les cas étudiés, la tension mesurée à l'aide de la sonde aux niveaux des électrodes HT est de  $(3000 \pm 350)$  V à une fréquence de répétition des impulsions de 10 kHz. La Figure IV.25 montre l'évolution temporelle de l'impulsion HT avant l'initiation du plasma entre les électrodes (ligne noire) et après la production du plasma (ligne rouge). Cette représentation permet de visualiser les différences entre les deux conditions, en termes de forme, d'amplitude et de durée de l'impulsion HV. Avant l'initiation du plasma, l'impulsion HT présente une forme régulière avec une amplitude constante. Cependant, après la production du plasma, l'impulsion HT subit une légère réduction de l'amplitude initiale, suivie d'une chute rapide de l'impulsion correspondant à l'établissement du courant dans le plasma entre les deux électrodes.



**Figure IV.25.** Évolution temporelle de l'impulsion HT avant (ligne noire) et après l'initiation du plasma (ligne rouge). Les formes d'onde sont moyennées sur 15 impulsions de tension.

### IV.3.2.2. Effet de l'activation du plasma

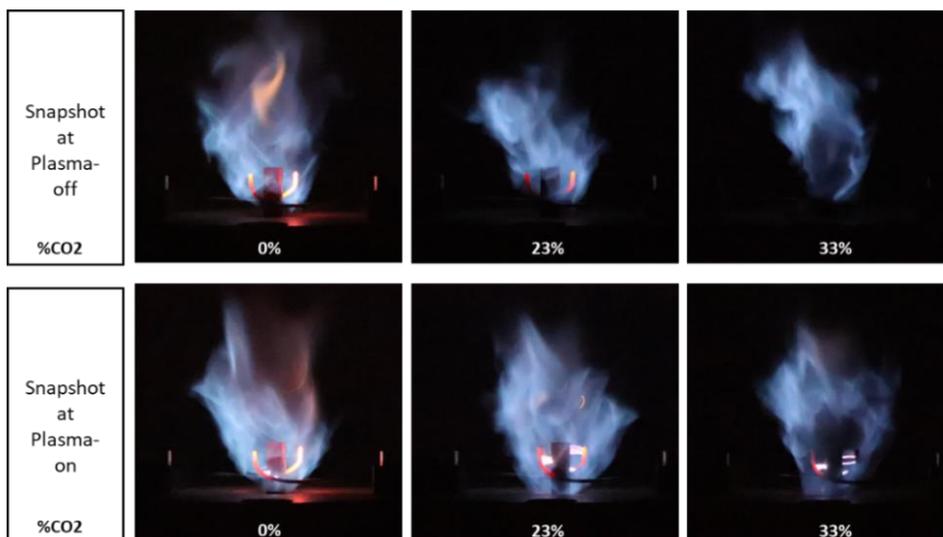
Dans cette section, nous aborderons l'effet de l'activation du plasma Arc Glissant (PGA) sur plusieurs aspects de la combustion du biogaz assistée par plasma. Nous examinerons de près la stabilisation et les émissions polluantes générées lors de la combustion et comment l'activation du plasma peut potentiellement contrôler ces aspects.

#### IV.3.2.2.a. Stabilité des flammes de biogaz

La Figure IV.26 présente des photographies de la flamme prises avec un temps d'exposition de 1/100s. Deux conditions sont comparées : le plasma éteint et le plasma activé avec une fréquence de 10kHz. De plus, différentes fractions d'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible sont étudiées, à savoir 0%, 23% et 33%. La richesse globale est fixée à 0.4. Le choix d'une richesse de 0.4 est peu utilisable, sauf pour les turbines à gaz, mais dans cette étude, cette valeur a été choisie afin de mieux identifier l'effet du plasma sur des flammes instables et liftées. De plus, la présence du swirl à travers la zone de recirculation et les gradients de pression axiale et radiale influenceront l'écoulement et la flamme.

D'après les photographies, on peut observer les différences de forme, de couleur et d'intensité de la flamme entre le plasma éteint et le plasma activé. De plus, l'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible influence également l'apparence de la flamme, notamment en modifiant sa couleur et sa stabilité. Avec la présence du plasma PGA (à une fréquence de 10 kHz), la hauteur d'accrochage de la flamme diminue d'environ la moitié par rapport à la hauteur d'accrochage initiale sans plasma. Par exemple, dans le cas d'un taux de CO<sub>2</sub> de 33%, la hauteur d'accrochage diminue de 20 mm à 10 mm avec l'activation du plasma PGA.

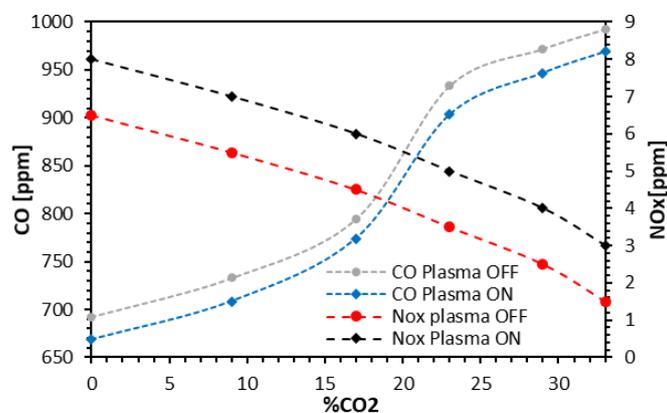
Ces observations démontrent l'influence significative de l'activation du plasma sur les caractéristiques de la flamme, en particulier la hauteur d'accrochage. Cependant, la présence des électrodes dans cette configuration pose un problème pour l'écoulement. Les électrodes peuvent modifier les propriétés de l'écoulement, perturber les structures de la flamme et peuvent causer un accrochage excessif de la flamme.



**Figure IV.26.** Photographies (temps d'exposition de 1/100s) de la flamme dans le cas du plasma éteint (OFF) et du plasma activé ( $f=10\text{kHz}$ ) (ON) avec différentes fractions du  $\text{CO}_2$  (0%, 23% et 33%) à  $\Phi=0.4$ .

#### IV.3.2.2.b. Emissions polluantes

La Figure IV.27 présente les résultats de l'effet du plasma PGA sur les émissions de  $\text{NO}_x$  et de CO à une richesse globale de 0.4, en tenant compte de différentes proportions d'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible.



**Figure IV.27.** Effet du plasma PGA sur les émissions de  $\text{NO}_x$  et de CO à  $\Phi=0.4$  avec différents pourcentages de  $\text{CO}_2$  dans le combustible.

Les résultats montrent une légère diminution des émissions de CO avec le plasma PGA (plasma ON). La réduction des émissions de CO indique une amélioration de la conversion du CO en  $\text{CO}_2$  avec le plasma, comme il a été discuté plus haut. En effet, l'activation du plasma entraîne une production accrue de radicaux et d'espèces excitées ( $\text{OH}^*$ ,  $\text{O}^*$  et  $\text{H}^*$ ) ainsi qu'un craquage plus important des hydrocarbures, conduisant à une oxydation plus rapide du CO en  $\text{CO}_2$ . L'oxydation plus forte du CO est probablement due à la concentration d' $\text{OH}$ , qui est

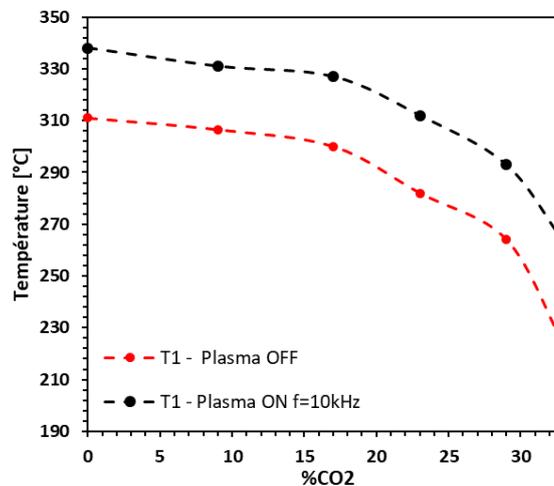
connue comme l'une des réactions les plus efficaces dans la libération de chaleur [67], RV.6 est l'étape clé dans l'oxydation du CO.



Les résultats indiquent également que les émissions de NO<sub>x</sub> étaient faibles et ça augmente très peu quand le plasma est allumé. L'effet du plasma PGA sur les émissions de NO<sub>x</sub> n'est pas négligeable, mais les valeurs restent très faibles par rapport aux normes et aux limitations pour le NO<sub>x</sub>. À 33% CO<sub>2</sub> dans le combustible, le taux de NO<sub>x</sub> augmente de 1.5 ppm à 3 ppm avec l'activation du plasma. L'augmentation de NO<sub>x</sub> est possiblement liée à l'augmentation de la température locale induite par le plasma via le mécanisme thermique du NO, comme on l'avait vu dans la section précédente. En général, le NO émis par les flammes hydrocarbure-air est principalement généré par le mécanisme thermique ou Zeldovich qui a été expliqué dans la section 2.2.2.b. de ce chapitre.

#### IV.3.2.2.c. Températures des produits de combustion

La Figure IIV.28 présente l'effet du plasma PGA sur la température des gaz brûlés (T1) dans les cas du plasma désactivé et activé. Les résultats montrent que la température des gaz brûlés est significativement affectée par l'application du plasma PGA. En présence du plasma, on observe une augmentation de la température par rapport au cas sans plasma.



**Figure IIV.28.** Effet du plasma PGA sur la température des gaz brûlés (T1) dans le cas du plasma éteint (OFF) et du plasma activé (ON).

Des études antérieures, menées par Varella et al. [67] et Boushaki et al. [124], ont également examiné l'effet de la combustion assistée par PGA sur les émissions de polluants. Ils ont constaté une légère augmentation de la production de NO<sub>x</sub> en présence du plasma. Ces résultats suggèrent que l'utilisation du PGA peut avoir des effets variables sur les émissions de polluants.

#### IV.4. Configuration des électrodes : Arc glissant autour d'une tige amovible courte

Il convient de rappeler que la tige centrale dans cette section est amovible (chapitre II, section II.2.2.2), ce qui offre la possibilité de modifier le diamètre de la tige, et courte par rapport à la configuration de tige précédente (20 mm à partir de la sortie du brûleur au lieu de 50 mm).

Le Tableau II.7 présente les conditions opératoires de cette étude, qui englobent les divers paramètres clés. Ces paramètres comprennent la teneur en CO<sub>2</sub> présente dans le mélange de combustible, allant de 0% à 30%, les débits d'air, de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>, ainsi que les vitesses d'écoulement en variant les diamètres de la tige métallique centrale (4 et 8 mm). La richesse globale a été maintenue constante à 0.7 pour tous les cas étudiés. De plus, pour garantir la cohérence, le nombre de swirl et la puissance de la flamme ont également été maintenus constants à 0.5 et 6.5 kW, respectivement.

##### IV.4.1. Caractérisation de la flamme sans plasma

Avant d'explorer les effets de l'activation du plasma sur la combustion du biogaz, il est essentiel de caractériser d'abord la flamme de CH<sub>4</sub> sous l'effet d'ajout de CO<sub>2</sub>. Cette section se concentre donc sur la caractérisation de la flamme du biogaz en l'absence du plasma. En particulier, l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible est étudié pour évaluer leur impact sur la position spatiale et la dynamique de la flamme. Ces facteurs sont cruciaux pour caractériser la combustion de biogaz et pour comparer les résultats avec l'activation du plasma.

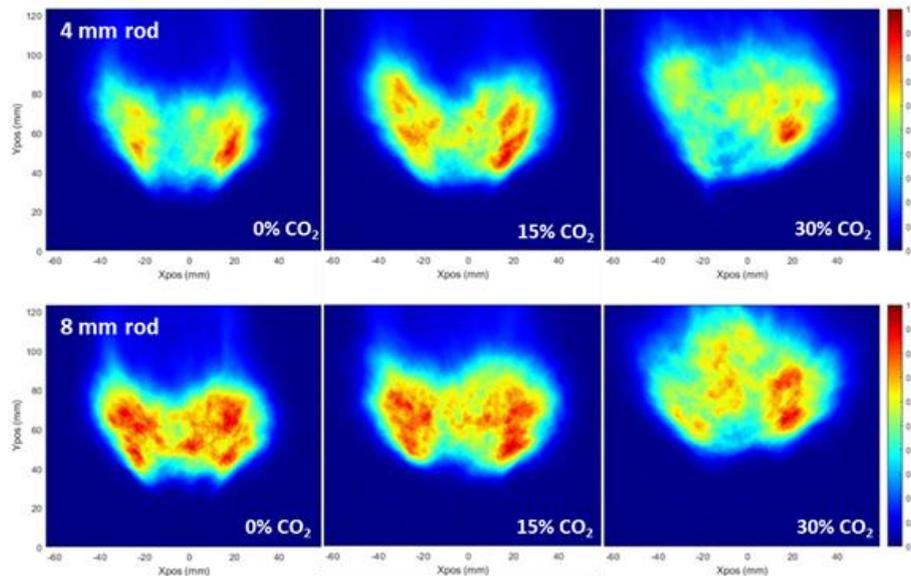
##### IV.4.1.1. Effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible sur la structure de la flamme

La Figure IV.29 présente les images moyennes de la chimiluminescence OH\* d'une flamme du biogaz avec une concentration croissante de CO<sub>2</sub>, à deux vitesses d'injection de combustible (deux tiges centrales différentes, 4 et 8 mm). Pour les deux cas de vitesses, l'intensité de la chimiluminescence OH\* diminue avec l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans le combustible. Le CO<sub>2</sub> agit comme un diluant dans la flamme, ce qui peut réduire la concentration de radicaux OH\* formés lors de la combustion. De plus, on observe que la hauteur d'accrochage de la flamme augmente avec l'ajout de CO<sub>2</sub> au combustible. Cela peut être attribué à des modifications de la température de la flamme et de la dynamique d'écoulement causées par l'effet de dilution du CO<sub>2</sub>, comme il a été vu précédemment.

Notons que l'intensité de la chimiluminescence OH\* est plus élevée dans le cas d'une tige centrale de diamètre 8 mm comparée à celle de 4 mm de diamètre. Cette observation suggère que le taux de formation des radicaux OH\* est plus important pour la plus grande vitesse d'injection de combustible. Ces résultats sont cohérents avec les études antérieures sur les flammes non-prémélangées, qui ont démontré que l'augmentation de la vitesse d'injection de combustible peut améliorer le mélange et la turbulence [125], [126].

À partir de la chimiluminescence OH\*, les longueurs de flamme ( $L_f$ ) et les hauteurs d'accrochage ( $H_f$ ) ont été extraites pour les différentes conditions opératoires utilisées. La

Figure IV.30 présente  $L_f$  et  $H_f$  en fonction du pourcentage d'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, pour deux cas de tige centrale (4 mm et 8 mm).



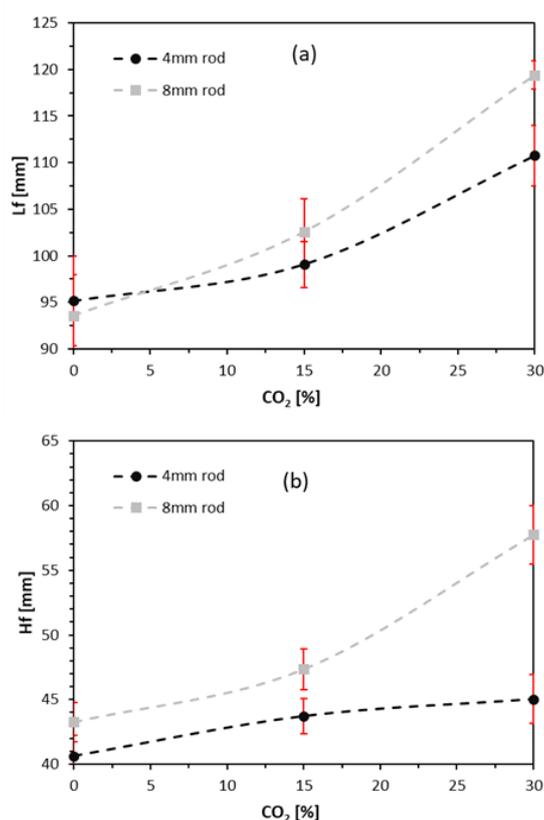
**Figure IV.29.** Images moyennes de la chimiluminescence  $\text{OH}^*$  en fonction des taux de  $\text{CO}_2$  dans le combustible en utilisant deux différents diamètres de tige centrale 4 mm et 8 mm.

La Figure IV.30(a) montre que la longueur de flamme augmente avec l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$ . En utilisant une tige centrale de 8 mm de diamètre, la longueur de flamme passe de 93.5 mm à 119.4 mm suite à l'ajout de 30% de  $\text{CO}_2$  dans le combustible (de 0% à 30%  $\text{CO}_2$ ), soit une augmentation de 27.7 % de  $L_f$ . Cela peut s'expliquer par le fait que l'ajout de  $\text{CO}_2$  agit comme un diluant dans la flamme, réduisant ainsi la vitesse de réaction et le taux de libération de chaleur, ce qui conduit à un allongement de la flamme. La longueur de flamme est relativement plus élevée dans le cas de vitesse d'injection plus forte (8 mm contre 4 mm de diamètre de tige) lorsque le %  $\text{CO}_2$  est augmenté. À 30% de  $\text{CO}_2$  par exemple, on observe une augmentation de la  $L_f$  de 110 à 120 mm lorsque le diamètre de la tige passe de 4 mm à 8 mm.

La hauteur d'accrochage de la flamme ( $H_f$ ) est également influencée par l'ajout de  $\text{CO}_2$ , comme l'illustre la Figure IV.30(b). Les résultats montrent que  $H_f$  augmente avec l'augmentation du pourcentage de  $\text{CO}_2$  dans le combustible pour les deux différentes vitesses d'injection. En utilisant une tige centrale de 8 mm de diamètre,  $H_f$  passe de 43.3 mm à 57.8 mm, entre le cas du méthane pur et 30 % de  $\text{CO}_2$  soit une augmentation de 33.5 % de hauteur d'accrochage. Cette augmentation de  $H_f$  peut être attribuée à l'effet de dilution du  $\text{CO}_2$ , qui réduit la température, la vitesse de la flamme [127] et modifie la dynamique de l'écoulement des gaz [128], [129].

Comme la longueur de la flamme, la hauteur d'accrochage est plus importante pour la tige centrale de 8 mm par rapport à celle de 4 mm. L'écart entre les deux cas est plus prononcé pour la  $H_f$  comparant à  $L_f$ . Au fur et à mesure que le  $\text{CO}_2$  augmente, l'écart pour les deux configurations s'accroît. En effet à 30% du  $\text{CO}_2$ ,  $H_f$  est à 58 mm pour la tige centrale de 8 mm contre 45 mm pour la tige centrale de 4 mm.

Il est important de noter que les effets de la teneur en  $\text{CO}_2$  dans le combustible sur la hauteur d'accrochage de la flamme peuvent dépendre des conditions expérimentales et de la configuration de l'installation. D'autres facteurs, tels que la géométrie du brûleur, la composition du combustible et la distribution des débits, peuvent également jouer un rôle très important dans la détermination de la hauteur d'accrochage de la flamme. Par ailleurs, il convient de souligner que, dans le chapitre III, avec la configuration radiale du brûleur, la hauteur de la flamme diminue avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  dans le combustible.

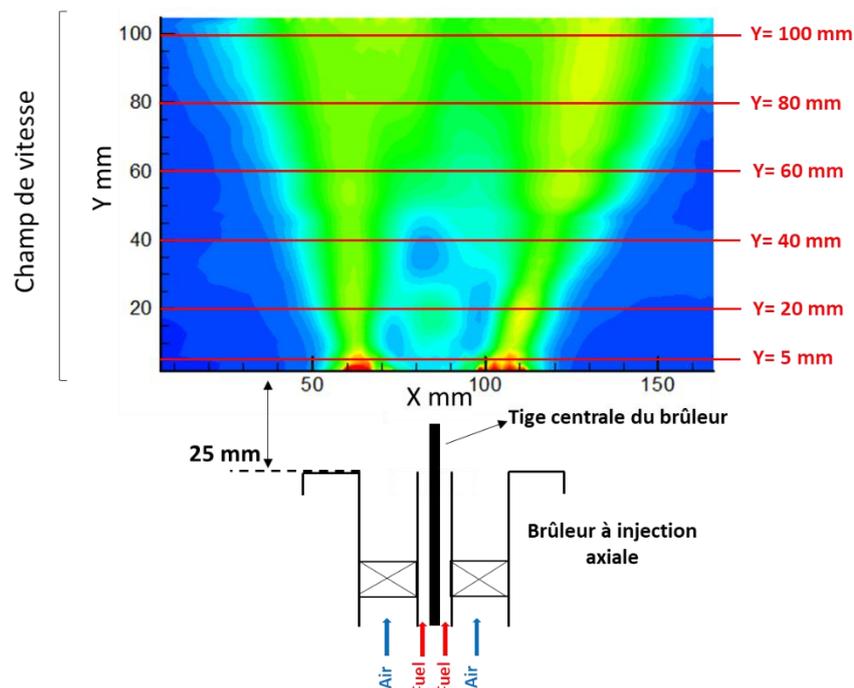


**Figure IV.30.** (a) Longueurs et (b) hauteurs d'accrochage des flammes avec l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible pour deux différents diamètres de tige centrale 4 mm et 8 mm.

#### IV.4.1.2. Effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> dans le combustible sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif

On rappelle que le champ de vitesses débute à 25 mm de la sortie du brûleur (Figure IV.31), comme dans le cas du chapitre III, à cause du système plasma. Pour plus de détails sur le système PIV et les conditions d'utilisation, le lecteur peut se référer à la section II.3.5 du manuscrit.

Les lignes rouges dans la Figure IV.31 représentent les positions horizontales (Y=5, 20, 40, 60 et 80mm, en plus les 25 mm notés ci-dessus) où les profils de vitesse sont extraits et discuté ci-dessous.

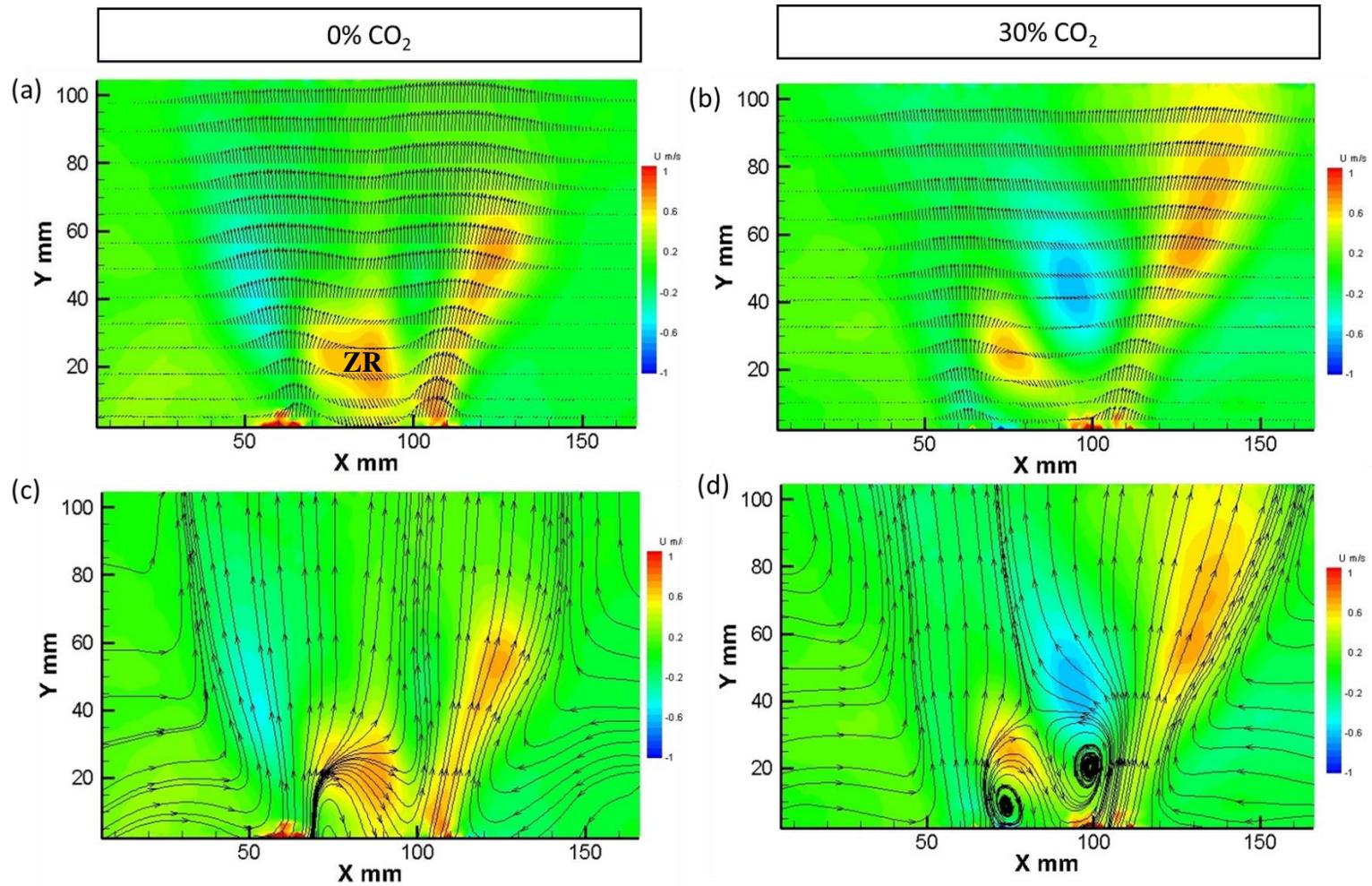


**Figure IV.31.** Position du champ de vitesses par rapport à la sortie du brûleur et les profils horizontaux Y de vitesses.

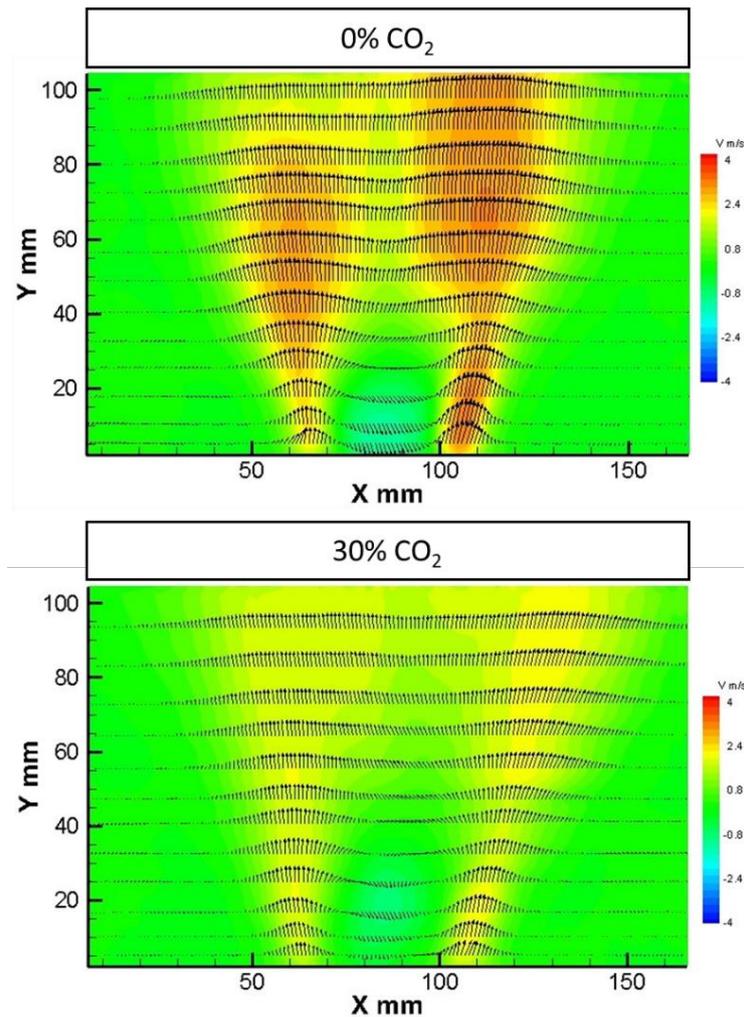
La Figure IV.32 illustre les champs moyens de vitesse radiale ( $U$ ) accompagnés des champs de vecteurs (a et b) ainsi que des lignes de courant (c et d), dérivés de la composition des deux composantes de vitesses pour les deux cas 0% CO<sub>2</sub> (a et c) et 30% CO<sub>2</sub> (b et d) pour la configuration de  $\Phi = 0.7$ , une tige centrale de 4 mm et un nombre de swirl  $S_n = 0.5$ . Comme dans la configuration à injection radiale, l'ajout du CO<sub>2</sub> au combustible montre un effet net sur les champs de vitesses. En effet, on observe une différence au niveau des valeurs de vitesse dans la zone centrale ainsi que dans la partie annulaire. Les lignes de courant semblent également être affectées par l'addition du CO<sub>2</sub> (c et d), comme la présence des tourbillons proche du brûleur.

La Figure IV.33 présente les champs moyens de vitesse longitudinale  $V$  (en échelle de couleur) avec et sans CO<sub>2</sub>, en intégrant le champ des vecteurs (a et b) ainsi que les lignes de

courant (c et d). La vitesse  $V$  subit une légère réduction avec l'ajout de 30% de  $\text{CO}_2$  avec le  $\text{CH}_4$ . Ceci est visible également dans la taille des vecteurs qui est plus importante dans le cas sans  $\text{CO}_2$  (a). On peut expliquer la décroissance de la vitesse axiale avec l'ajout du  $\text{CO}_2$  par l'apparition des tourbillons proche du brûleur (voir Figure IV.32. c et d) qui peuvent a priori ralentir l'écoulement longitudinal.



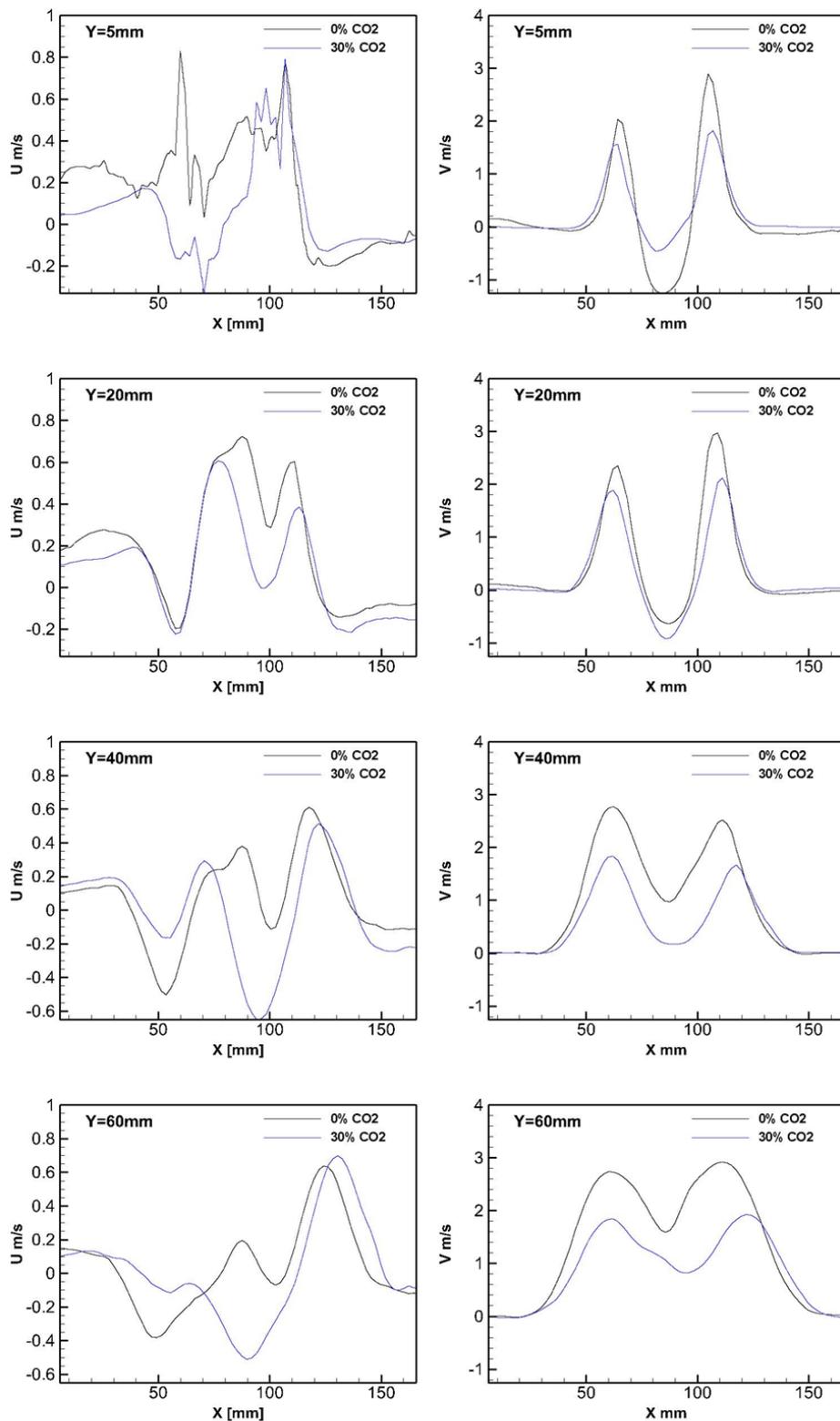
**Figure IV.32.** Champs moyens de vitesse radiale  $U$  avec le champ de vecteurs (a et b) et lignes de courant (c et d) pour les deux cas 0%  $\text{CO}_2$  (a et c) et 30%  $\text{CO}_2$  (b et d) dans le cas  $\Phi=0.7$ , tige centrale de 4 mm et  $\text{Sn}=0.5$ .



**Figure IV.33.** Champs moyens de vitesse longitudinale  $V$  (en échelle de couleur) avec le champ de vecteurs pour les deux cas 0% CO<sub>2</sub> et 30% CO<sub>2</sub> dans le mélange de combustible,  $\Phi=0.7$ , tige centrale de 4 mm et  $Sn=0.5$ .

Afin d'examiner les profils des vitesses  $U$  et  $V$  à différentes hauteurs dans notre champ, nous avons regroupé ces données dans la Figure IV.34 pour la configuration  $\Phi=0.7$ , diamètre de tige centrale de 4 mm et nombre de swirl  $Sn=0.5$ . Ces résultats présentent l'effet de l'ajout du CO<sub>2</sub> avec le combustible sur les profils de vitesse radiale  $U$  (à gauche) et de vitesse longitudinale  $V$  (à droite) à diverses hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  mm). Comme attendu, la vitesse radiale reste relativement faible car l'injection du combustible est longitudinale. Entre 0% et 30% de CO<sub>2</sub> il y a quelques légères différences de vitesse.

Les profils radiaux de la vitesse longitudinale ( $V$ ) illustrent clairement la réduction des valeurs de  $V$  avec l'ajout du CO<sub>2</sub>, comme observé dans les champs de vitesses dans la figure précédente. Même dans la zone centrale, proche du brûleur ( $Y=5$  mm), on observe une vitesse négative plus élevée pour le cas de 0% du CO<sub>2</sub> par rapport à 30% du CO<sub>2</sub>.



**Figure IV.34.** Profils de vitesses radiale  $U$  (à gauche) et longitudinale  $V$  (à droite) à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  mm) pour les deux cas 0%  $\text{CO}_2$  (en noir) et 30%  $\text{CO}_2$  (en bleu),  $\Phi=0.7$ , Tige 4 mm et  $\text{Sn}=0.5$ .

#### **IV.4.2. Combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant autour d'une tige amovible**

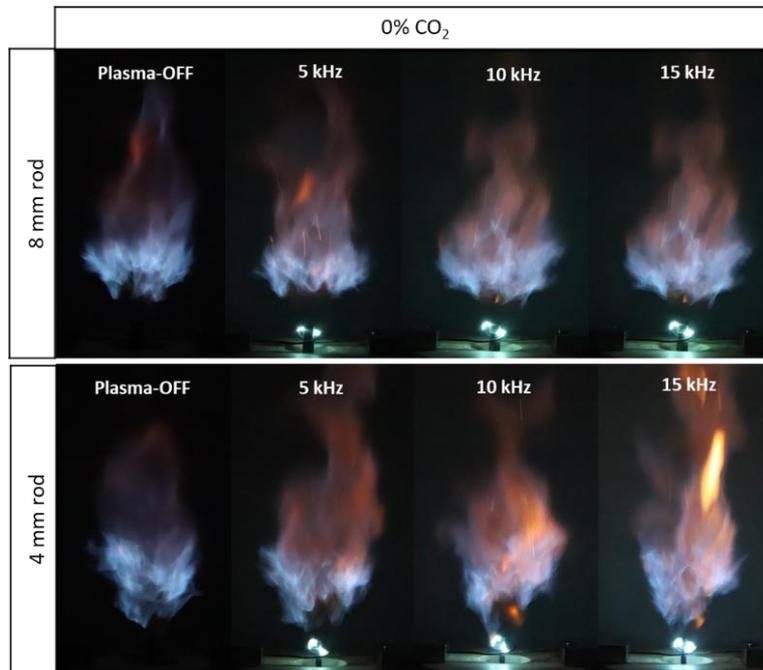
Cette étude se concentre sur la combustion de biogaz assistée par plasma à arc glissant autour d'une tige amovible courte (Figure II.8). Différents aspects de cette combustion sont examinés, notamment l'effet de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension appliquée, ainsi que l'effet de la vitesse d'injection du combustible. On étudie également la stabilité des flammes de biogaz et la formation des émissions polluantes dans ces conditions. En outre, la spectroscopie d'émission optique est utilisée pour analyser l'effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> sur les spectres d'émissions optiques dans la flamme, ainsi que l'effet de la vitesse d'injection de combustible, de la position de visualisation du spectroscope et de la fréquence de répétition des impulsions. Ces investigations fourniront des informations précieuses sur les différents paramètres et leurs influences sur la combustion assistée par plasma dans le contexte spécifique du biogaz comme combustible.

##### **IV.4.2.1. Effet du plasma sur la stabilité et les émissions polluantes**

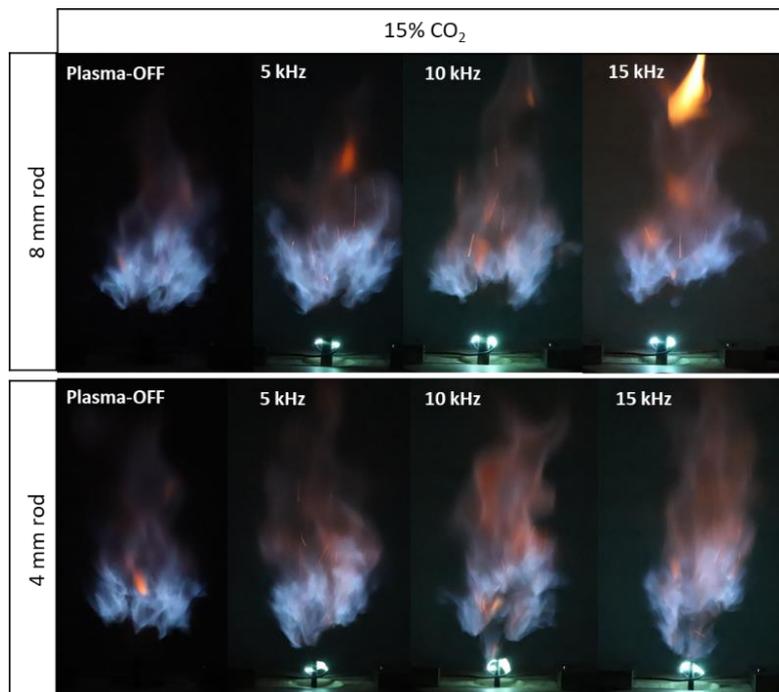
Les Figures IV.37, IV.38 et IV.39 montrent les photographies de la flamme avec 0%, 15% et 30% de CO<sub>2</sub> dans le combustible, respectivement, sans et avec activation du plasma à différentes fréquences de répétition d'impulsions. Le temps d'exposition de l'appareil photo était de 1/250 s et la tension électrique appliquée était fixée à 14 kV.

Pour les trois cas de flammes étudiées (0, 15 et 30% de CO<sub>2</sub>), les images montrent la flamme semble être plus longue, plus proche du brûleur et présenter une luminosité orange plus prononcée au fur et à mesure que la fréquence d'impulsion augmente. Cependant, lors de l'activation du plasma à différentes fréquences d'impulsions, un effet significatif sur la stabilité des flammes est observé. Il est constaté que l'activation du plasma réduit la hauteur d'accrochage de la flamme. Cet effet est particulièrement marqué lorsque la fréquence de répétition des impulsions est augmentée.

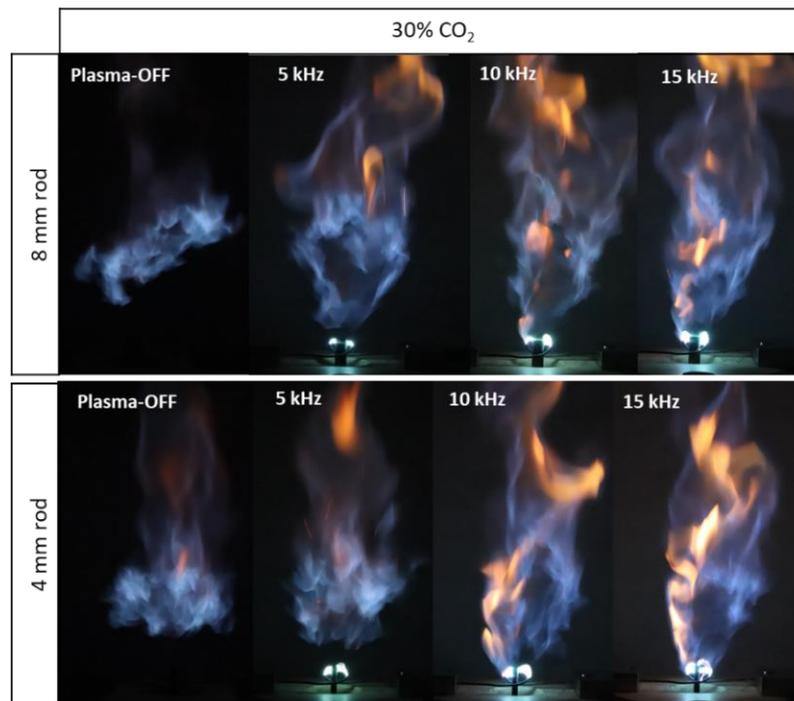
Il a été constaté également que le plasma améliorait la stabilité de la flamme à des vitesses d'injection de combustible plus faibles à différentes concentrations de CO<sub>2</sub> dans le combustible. Cela pourrait être lié à l'interaction entre le plasma et le combustible. Lorsque le combustible est injecté à des vitesses plus faibles, il peut se répandre sur une plus grande surface ou un plus grand volume, ce qui signifie que le plasma peut interagir avec un volume de combustible plus important.



**Figure IV.35.** Photographies (temps d'exposition de 1/250 s) de la flamme de méthane (0% CO<sub>2</sub>) sans plasma (plasma-OFF) et avec plasma à différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).



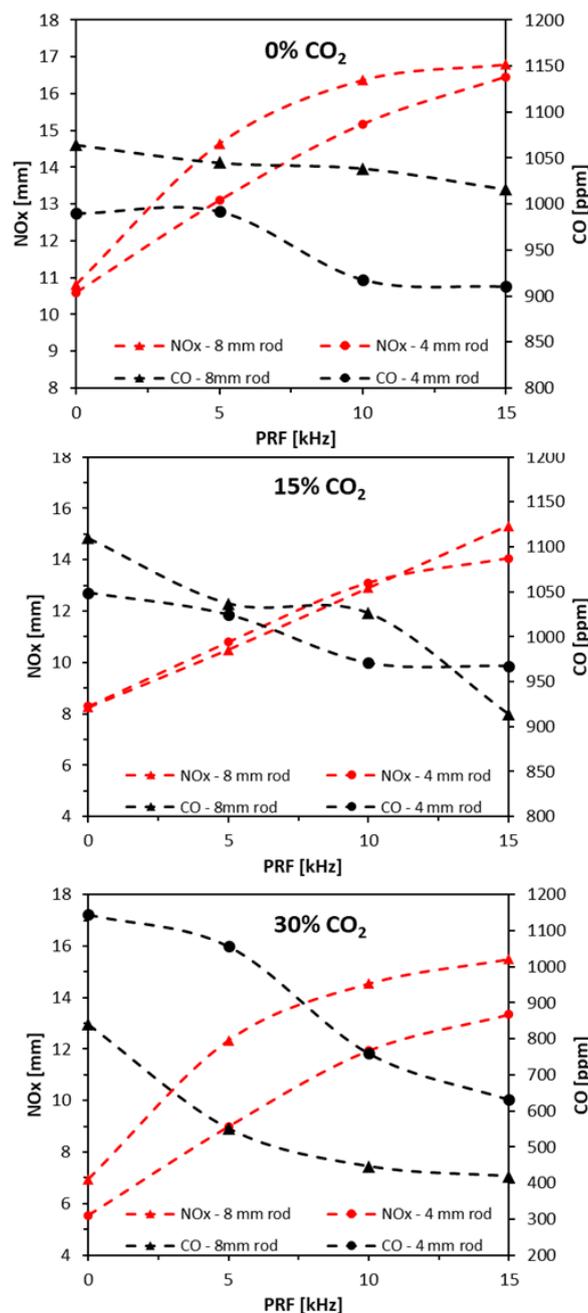
**Figure IV.36.** Photographies (temps d'exposition de 1/250 s) de la flamme du biogaz (15% CO<sub>2</sub>) sans plasma (plasma-OFF) et avec plasma à différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).



**Figure IV.37.** Photographies (temps d'exposition de 1/250 s) de la flamme du biogaz (30% CO<sub>2</sub>) sans plasma (plasma-OFF) et avec plasma à différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).

La Figure IV.38 présente les émissions des NO<sub>x</sub> et CO en fonction de la fréquence du plasma pour les cas de flamme méthane pur (a), 15% de CO<sub>2</sub> (b) et 30% de CO<sub>2</sub> (b), pour deux configurations de tiges centrales dans le brûleur (4 mm et 8 mm). Les résultats indiquent une tendance similaire dans la relation entre PRF et les concentrations de NO<sub>x</sub> et de CO, à savoir une croissance des concentrations de NO<sub>x</sub> et une décroissance des émissions de CO avec la fréquence d'impulsions du plasma. Comme vu précédemment, la formation des NO<sub>x</sub> est favorisée par l'augmentation de température causée par le plasma, d'une part, et la génération de certains radicaux (comme N\* et O\*) responsables de formation de NO, d'autre part. En revanche, la présence du plasma contribue à la conversion de CO en CO<sub>2</sub> tendant vers une combustion complète du mélange réactif.

La comparaison des résultats obtenus pour les deux configurations de tiges centrales indique que les émissions de NO<sub>x</sub> sont légèrement plus faibles pour la tige 4 mm dans le cas de la flamme CH<sub>4</sub>. Pour 15% de CO<sub>2</sub>, les résultats des NO<sub>x</sub> sont pratiquement similaires entre 4 et 8 mm de diamètre de tige. À forte concentration de CO<sub>2</sub> (30%), on retrouve les mêmes résultats de NO<sub>x</sub> que la flamme de méthane pur, en comparant les deux tiges, à savoir moins de NO<sub>x</sub> pour la tige 4 mm. Les mesures de CO donnent des résultats très variables selon le pourcentage de CO<sub>2</sub> et le diamètre de la tige centrale. En effet, à 0% et à 15% de CO<sub>2</sub>, les émissions de CO sont plus faibles pour la tige centrale de 4 mm, et donc une vitesse d'injection plus faible, comparant à la tige centrale de 8 mm. En revanche, pour 30% de CO<sub>2</sub>, les résultats de CO sont inversés, moins de CO pour le cas de tige 8 mm que celle de 4 mm.



**Figure IV.38.** Les émissions de NO<sub>x</sub> et de CO des flammes de biogaz avec des différentes PRFs, en utilisant deux diamètres de tige (4 et 8 mm), pour les cas (a) 0%, (b) 15% et (c) 30% de CO<sub>2</sub>.

#### IV.4.2.2. Spectroscopie d'émission optique

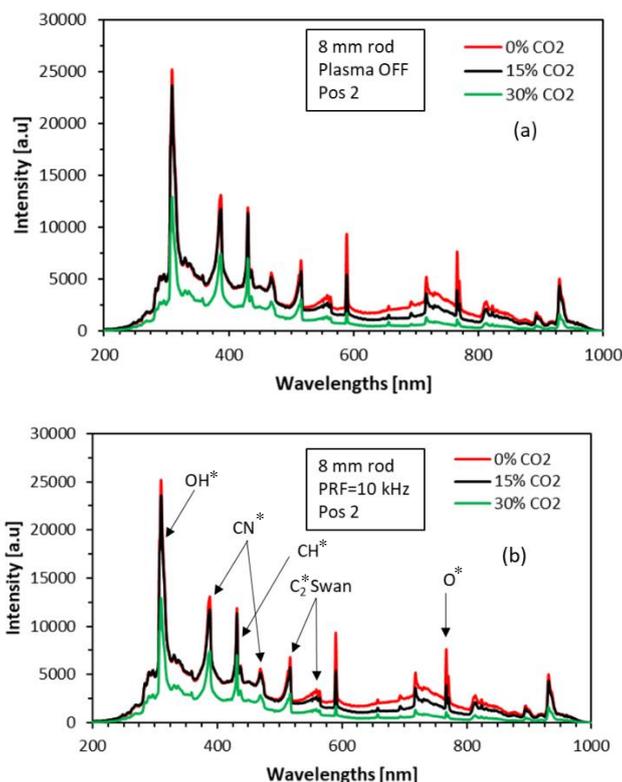
Dans cette partie, la spectroscopie d'émission optique a été utilisée pour caractériser les émissions optiques pour différentes conditions opératoires dans deux positions distinctes : au niveau du plasma généré (Pos 1) et au sein de la flamme (Pos 2), comme illustré dans la Figure IV.39.



**Figure IV.39.** Positions d'acquisition pour la spectroscopie d'émission.

#### IV.4.2.2.a. Effet de l'ajout de CO<sub>2</sub> sur les spectres d'émissions dans la flamme

Avant d'explorer l'effet du plasma dans différentes conditions de fonctionnement, une étude a été menée pour évaluer l'impact du CO<sub>2</sub> présent dans le combustible sur les espèces émises par les flammes. La Figure IV.40 présente la spectroscopie d'émission optique (SEO) des flammes de biogaz avec différentes concentrations de CO<sub>2</sub> (0%, 15% et 30%) dans le combustible, à la fois sans et avec plasma à une fréquence d'impulsion plasma de 10 kHz. Les mesures ont été effectuées à la position d'observation Pos 2 (Figure IV.39) en utilisant une tige métallique centrale de 8 mm.



**Figure IV.40.** Spectroscopie d'émission des flammes de biogaz à différentes concentrations de CO<sub>2</sub> (0%, 15% et 30%) dans le combustible, (a) sans plasma et (b) avec plasma à une PRF de 10 kHz, à la position d'observation Pos 2 en utilisant une tige centrale de 8 mm.

L'analyse de l'SEO sans plasma (Figure IV.40.a) a révélé la présence de bandes spectrales caractéristiques dans les flammes d'hydrocarbures, telles que  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CN}^*$ ,  $\text{CH}^*$  et la bande de Swan  $\text{C}_2$ . L'observation principale était que l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans le combustible entraînait une diminution de l'intensité des bandes spectrales pour différentes espèces.

La diminution de l'intensité des espèces émises avec l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  peut s'expliquer par les modifications induites dans la composition chimique de la flamme et sa température. En introduisant du  $\text{CO}_2$  dans le combustible, les processus d'ionisation et d'excitation sont affectés [130]. Le plasma à PRF=10 kHz (Figure IV.40.b) semble amplifier cet effet dans le cas de 30% de  $\text{CO}_2$ , renforçant ainsi l'influence de la concentration de  $\text{CO}_2$  sur les espèces émises, comme on l'a vu dans les configurations de brûleurs précédentes.

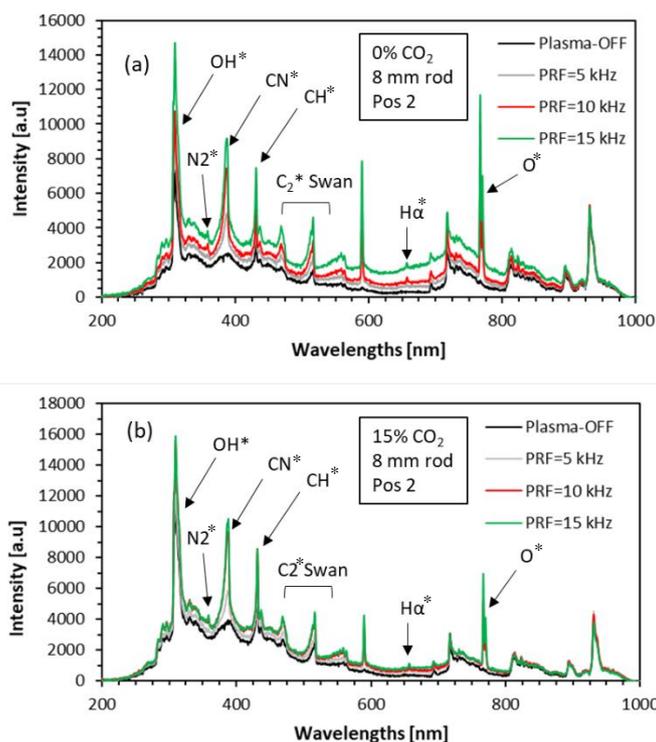
L'effet du diamètre de la tige centrale du brûleur sur les spectres d'émission optique a été également étudié, et les résultats de cette analyse sont présentés dans l'annexe D.

#### IV.4.2.2.b. Effet du plasma sur les spectres d'émissions optiques

La Figure IV.41 présente les spectres des flammes de biogaz avec 0% (a) et 15% (b) de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, à la position Pos 2 dans la flamme, avec et sans plasma, pour différentes fréquences.

Les résultats montrent que l'augmentation de la PRF entraîne une augmentation des intensités des espèces excitées dans la flamme. Les graphes illustrent les intensités relatives de plusieurs espèces en fonction de la PRF du plasma. Les intensités des espèces préexistantes dans la flamme, telles que  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$ , la bande de Swan  $\text{C}_2^*$  et  $\text{CN}^*$ , augmentent de plus en plus avec l'augmentation de la PRF. Cette augmentation en intensité est due la génération des espèces excitées avec la croissance de la fréquence PRF capables d'interagir avec les molécules de gaz environnantes et de transférer de l'énergie et aussi à une augmentation de la température.

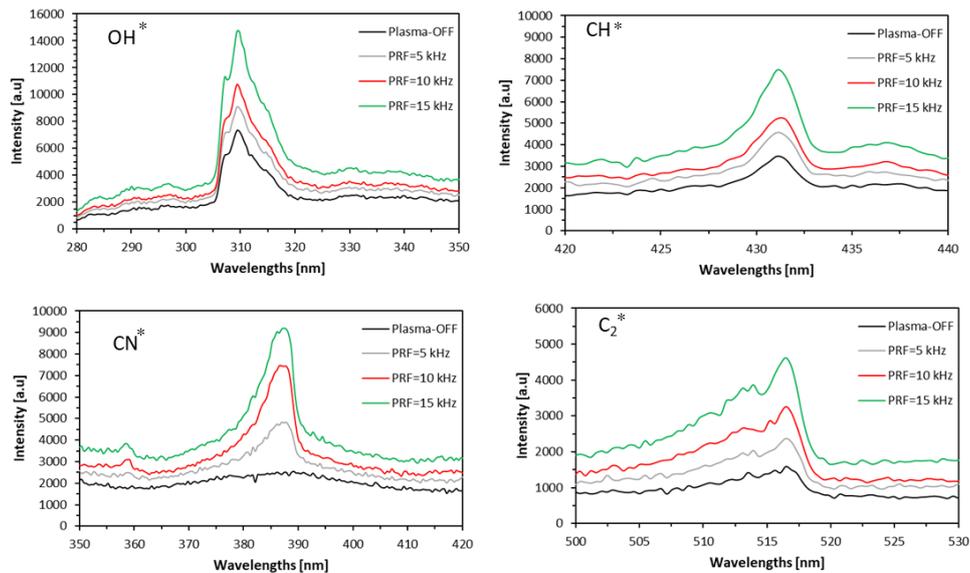
En plus des espèces préexistantes, plusieurs nouvelles espèces excitées sont apparues dans la flamme grâce à l'activation du plasma, notamment  $\text{O}^*$ , le  $\text{H}_\alpha^*$  et le  $\text{N}_2^*$ . Ces espèces montrent une augmentation plus marquée de leur intensité avec l'augmentation de la PRF, en raison de l'accumulation de plus d'impulsions plasma avec l'augmentation de PRF à temps d'acquisition de spectres identique. Toutes ces espèces jouent un rôle important dans l'amélioration de la combustion, en particulier  $\text{O}^*$  et  $\text{OH}^*$ , qui sont connus pour leur rôle dans l'initiation de la combustion dans la littérature [109]. Le comportement observé suggère que l'utilisation d'un plasma à PRF élevée peut efficacement améliorer l'excitation et l'ionisation des molécules de gaz dans la flamme, ce qui entraîne une augmentation du nombre d'espèces excitées et une amélioration potentielle des systèmes de combustion. Notons que cet effet s'est révélé plus prononcé dans les flammes de méthane avec 0% de  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Pour 15% de  $\text{CO}_2$ , les effets de l'augmentation de la PRF sur les intensités des espèces excitées sont réduits. Cela peut être dû à des changements dans la chimie de la flamme et aux caractéristiques de l'interaction plasma-gaz en présence de  $\text{CO}_2$  [64].



**Figure IV.41.** SEO de la flamme (a) de méthane (0%  $\text{CO}_2$ ) et (b) de biogaz (85%  $\text{CH}_4$ -15%  $\text{CO}_2$ ), à la position de vision Pos 2, avec et sans plasma pour différentes PRFs en utilisant une tige centrale de 8 mm.

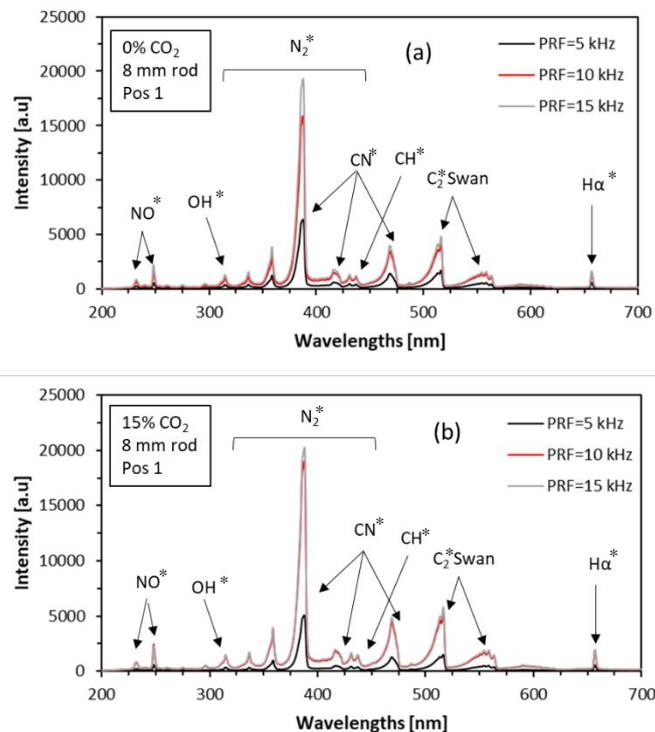
La Figure IV.42 montre les plages de longueur d'onde étudiées de 280 à 350 nm, 350 à 420 nm, 420 à 440 nm et 500 à 530 nm correspondant aux espèces les plus présentes détectées dans la flamme avant et après l'activation du plasma, à savoir  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CN}^*$ ,  $\text{CH}^*$  et  $\text{C}_2^*$ . Les spectres de ces espèces dans une flamme sans  $\text{CO}_2$  à Pos 2 ont été analysés, dans le cas sans plasma et avec plasma à différentes fréquences PRF. L'analyse a révélé que l'intensité des raies spectrales correspondant à ces espèces variait beaucoup avec les fréquences plasma.

Les raies spectrales de  $\text{OH}^*$  à 308 nm et  $\text{CH}^*$  à 431 nm s'intensifient significativement avec l'augmentation de la PRF, indiquant une concentration plus élevée d'espèces réactives causée par la puissance accrue du système plasma. La raie spectrale de  $\text{CN}^*$  autour de 385 nm est apparue uniquement dans le cas du plasma activé, avec une intensité croissante avec la PRF.  $\text{CN}^*$  est également une espèce hautement réactive qui joue un rôle important dans les processus de combustion, et son apparition peut être expliquée par l'augmentation de l'ionisation des molécules d'azote par le plasma, comme le montre la Figure IV.43. L'intensité de la raie spectrale de  $\text{C}_2^*$  augmente également avec la fréquence PRF, en raison de la dissociation accrue des molécules d'hydrocarbures par le plasma.



**Figure IV.42.** Plages de longueurs d’onde (280-350 nm, 350-420 nm, 420-440 nm, 500-530 nm) pour les SEO d’une flamme de méthane à la position de vision Pos 2, sans et avec plasma, en utilisant une tige centrale de 8 mm et 3 différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).

La Figure IV.43 montre les spectres d’émission optique dans le milieu plasma (Pos 1) proche de la sortie du brûleur pour deux cas de flammes (0% CO<sub>2</sub> et 15% CO<sub>2</sub>).



**Figure IV.43.** SEO à la position de vision Pos 1 de la flamme de méthane ((a) 0% CO<sub>2</sub>) et biogaz ((b) 15% CO<sub>2</sub>), pour 3 différentes PRFs (5, 10 et 15 kHz).

On observe un fort signal de  $N_2^*$  dans le plasma comparant à celui émis dans la flamme (Pos2) qui était très faible. La présence de  $NO^*$  est peut-être due à la réaction de  $N_2^*$  et  $O^*$  dans le plasma, et peut être la cause de l'augmentation des  $NO_x$  notamment avec l'augmentation de la fréquence PRF. La chimie du plasma devient plus active et efficace à des PRFs plus élevées. En d'autres termes, les espèces du plasma sont excitées à un rythme plus rapide, ce qui entraîne une excitation plus efficace des espèces du plasma, et par conséquent, plus d'espèces excitées sont présentes dans le plasma. L'apport d'énergie plus élevé entraîne également une excitation accrue du plasma, ce qui se traduit par des raies spectrales plus intenses. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que des PRFs relativement plus élevées conduisent à une excitation plus efficace du plasma et à une chimie du plasma plus active.

#### IV.4.2.3. Effets du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif

Cette étude a été menée pour évaluer l'effet du plasma sur le champ de vitesses de l'écoulement réactif pour les deux cas de flammes sans  $CO_2$  et avec 30% de  $CO_2$  dans le combustible. Les deux cas de flammes ont été étudiés avec  $\Phi=0.7$ , une tige centrale de 8 mm de diamètre et un nombre de swirl  $Sn$  de 0.5, sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à une fréquence (PRF) de 10 kHz et une tension (IEV) de 10.5 kV.

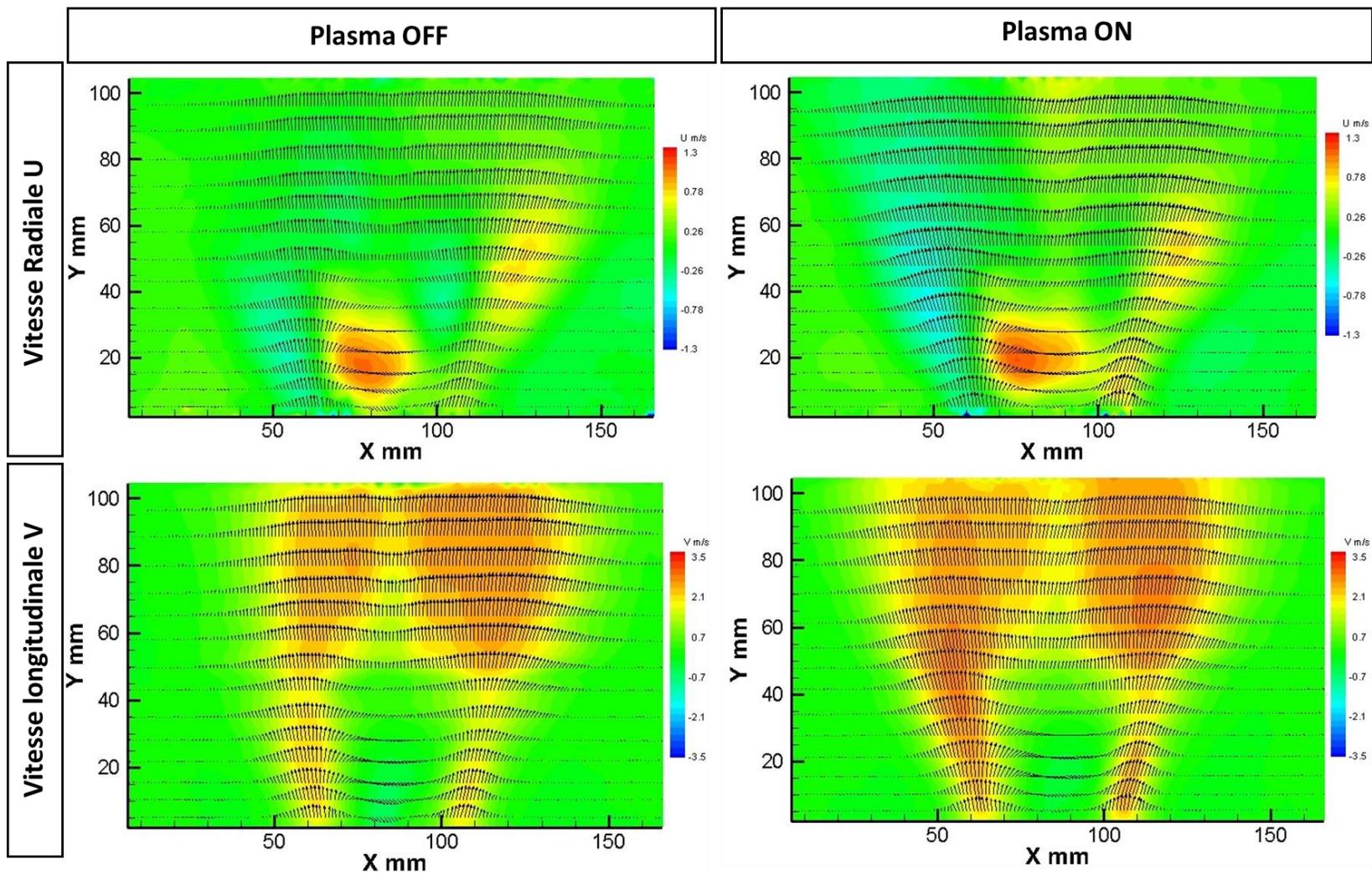
La Figure IV.44 présente les champs moyens de vitesse radiale  $U$  et longitudinale  $V$  (en échelle de couleur) ainsi que les vecteurs résultant des deux composantes de vitesse pour le cas sans  $CO_2$  dans le mélange de combustible. La comparaison entre plasma OFF et plasma ON montre clairement l'effet du plasma sur les champs dynamiques, en termes de valeurs des vitesses et comportement de l'écoulement. En effet, on note des valeurs de vitesses relativement élevées notamment pour  $V$  et une expansion radiale plus importante avec la présence du plasma. Ceci est dû certainement à l'effet thermique causé par les décharges plasma qui contribuent à l'expansion des gaz et son accélération.

Afin de mieux quantifier les vitesses de l'écoulement avec et sans plasma, des profils horizontaux de vitesses ( $U$  et  $V$ ) à différentes hauteurs sont regroupés dans la Figure IV.45. Le cas étudié ici concerne la flamme du  $CH_4$  pur (0%  $CO_2$ ). Les profils montrent qu'il n'a pas d'influence significative du plasma sur les profils de vitesse radiale  $U$ . Par contre, ces profils confirment la tendance observée précédemment, qui indique une certaine augmentation de la vitesse  $V$  en présence du plasma et qui accentue le long de l'écoulement.

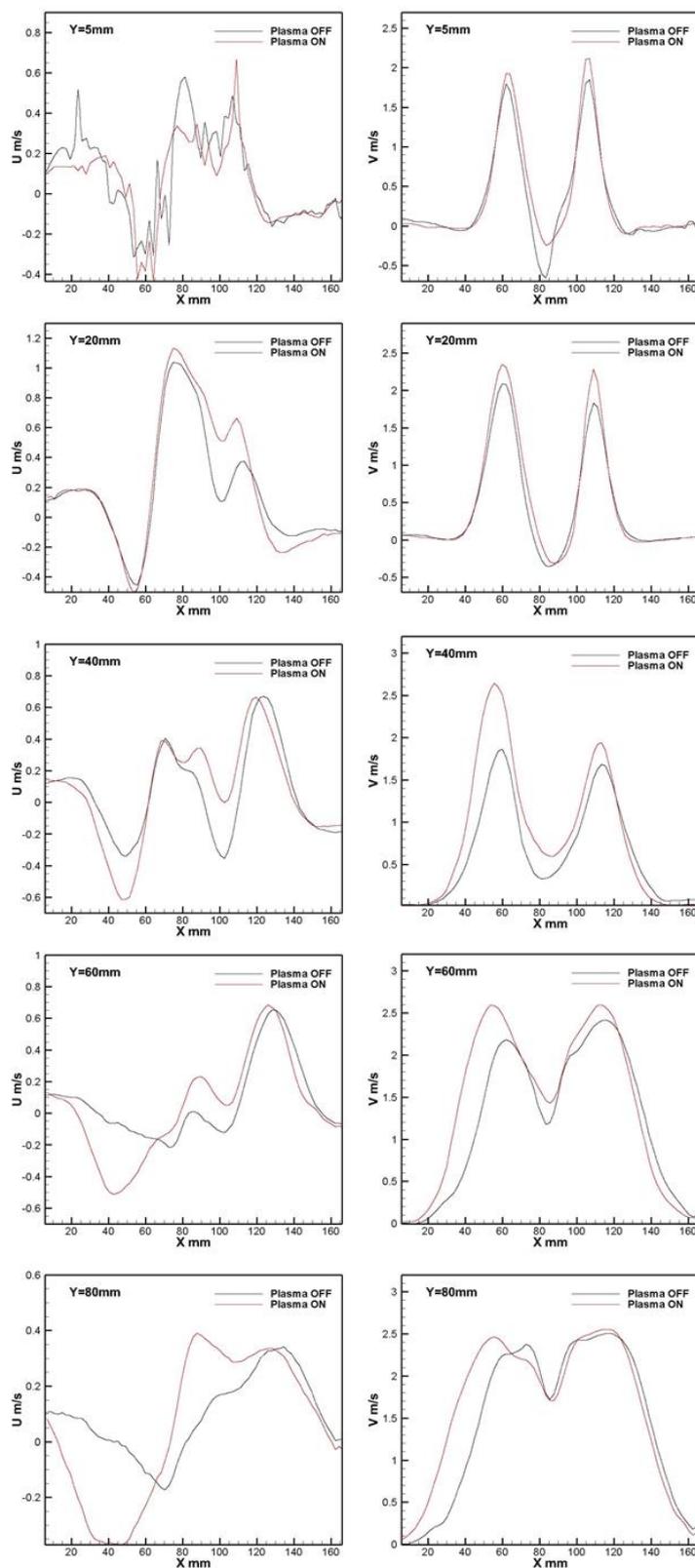
La Figure IV.46 illustre les profils horizontaux des fluctuations RMS de vitesse longitudinale  $V'$  à différentes hauteurs ( $Y = 5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas où la teneur en  $CO_2$  est de 0% dans le mélange de combustible. Les résultats montrent que la présence du plasma n'a pas eu un effet marqué sur les fluctuations de vitesse  $V'$ .

Les fluctuations de la vitesse radiale  $U'$  à ces conditions de mélange ont été également examinées pour les deux cas Plasma ON et Plasma OFF. Les profils correspondants sont présentés dans l'annexe E.



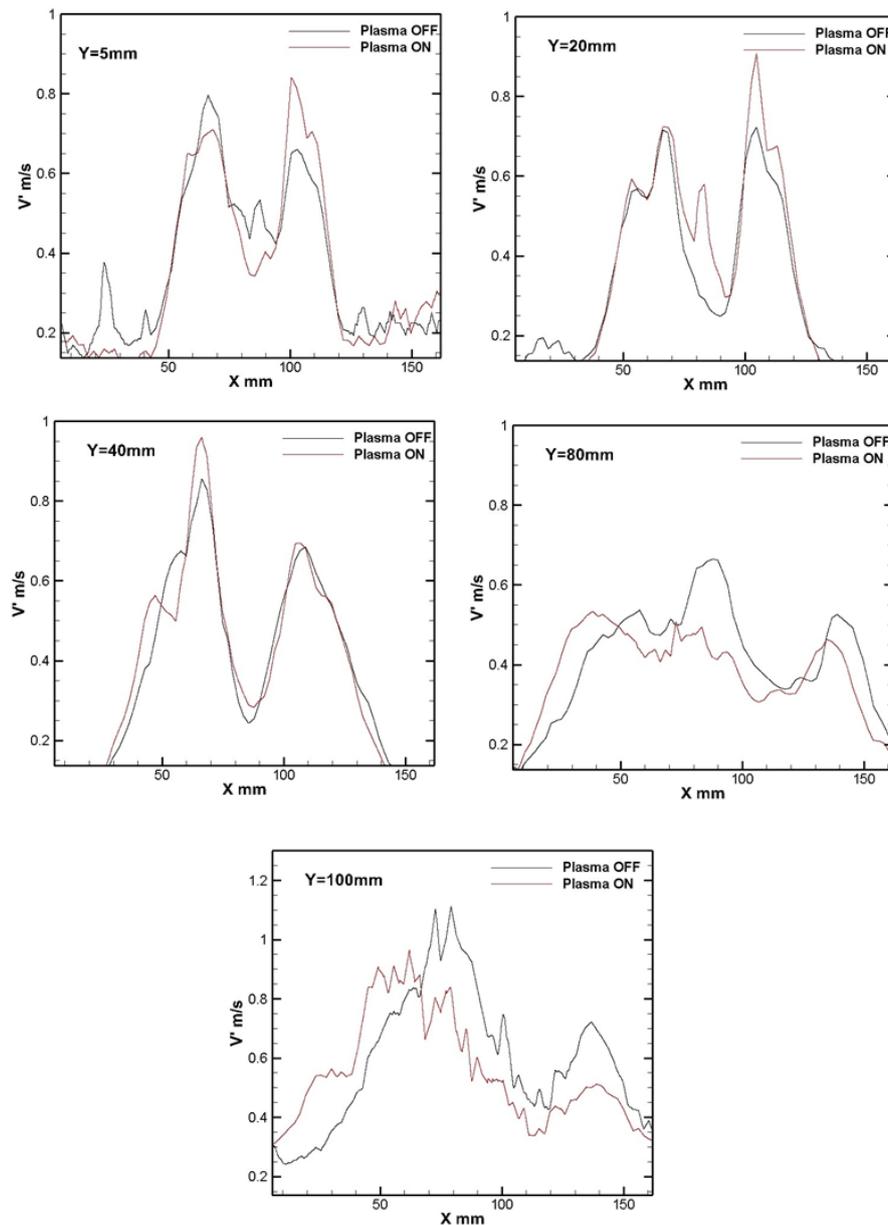


**Figure IV.44.** Champs moyens de la vitesse radiale  $U$  (en haut) et vitesse longitudinale  $V$  (en bas) (en échelle de couleur) et les vecteurs issus des deux composantes de vitesses pour le cas 0%  $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 8 mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}= 10.5$  kV.



**Figure IV.45.** Profils horizontaux de vitesse radiale  $U$  (à gauche) et vitesse longitudinale  $V$  (à droite) à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $0\%$   $\text{CO}_2$  dans le mélange,

$\Phi=0.7$ , Tige centrale de 8 mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $IEV= 10.5$  kV.



**Figure IV.46.** Profils horizontaux de fluctuations (RMS) de vitesse longitudinale  $V'$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 80$  et  $100$  mm) pour le cas 0%  $CO_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , tige centrale de 8 mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $IEV= 10.5$  kV.

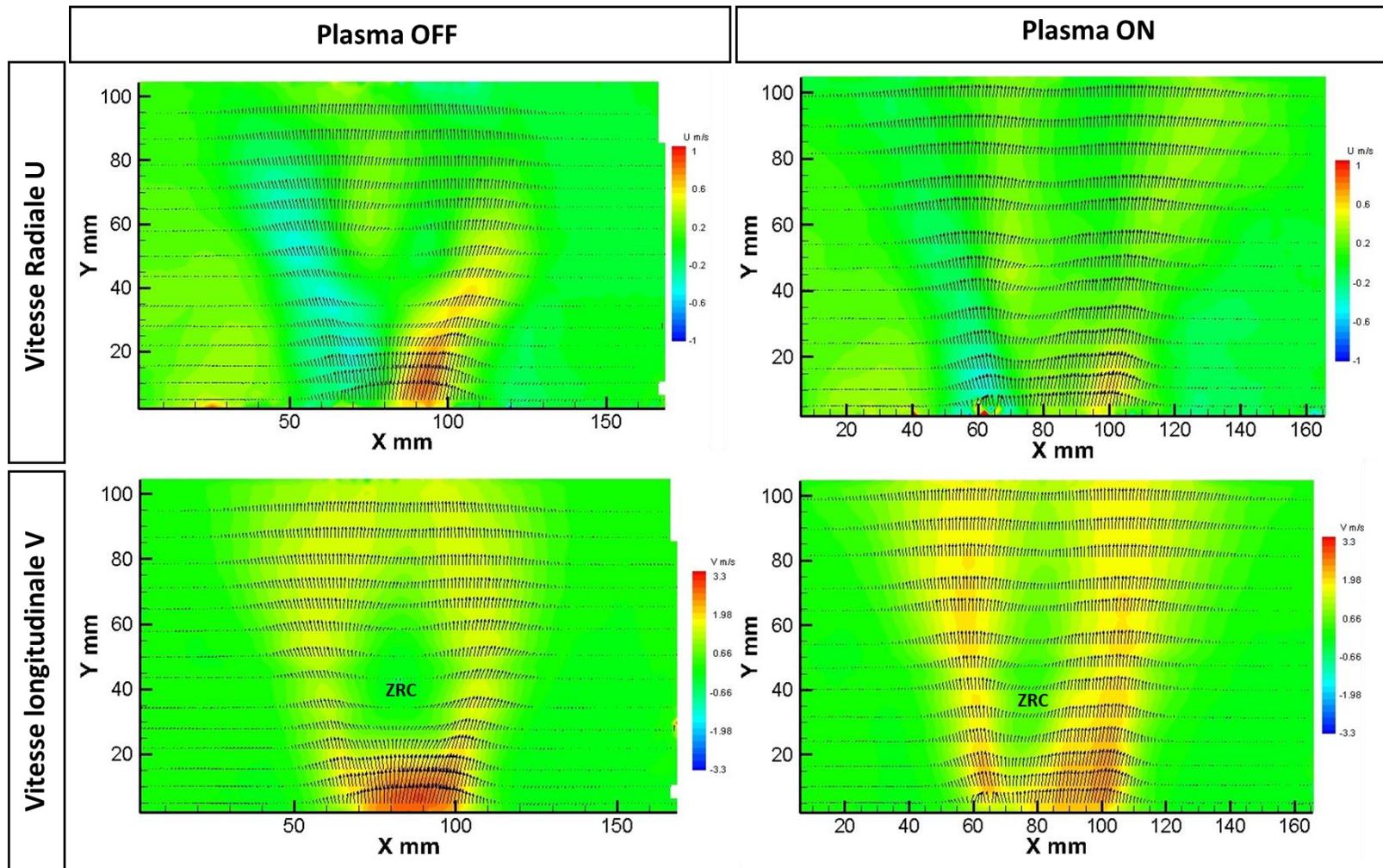
Nous avons également étudié le champ de vitesses de l'écoulement avec 30 % de  $CO_2$  dans le mélange de combustible. La Figure IV.47 présente les champs moyens des vitesses radiale  $U$  et longitudinale  $V$  ainsi que les champs de vecteurs résultant de la combinaison des deux vitesses.

Ces cartographies de vitesses montrent un effet du plasma sur la distribution des vitesses spatialement. Quelques légères différences dans le maximum de vitesses  $U$  et  $V$  et surtout une

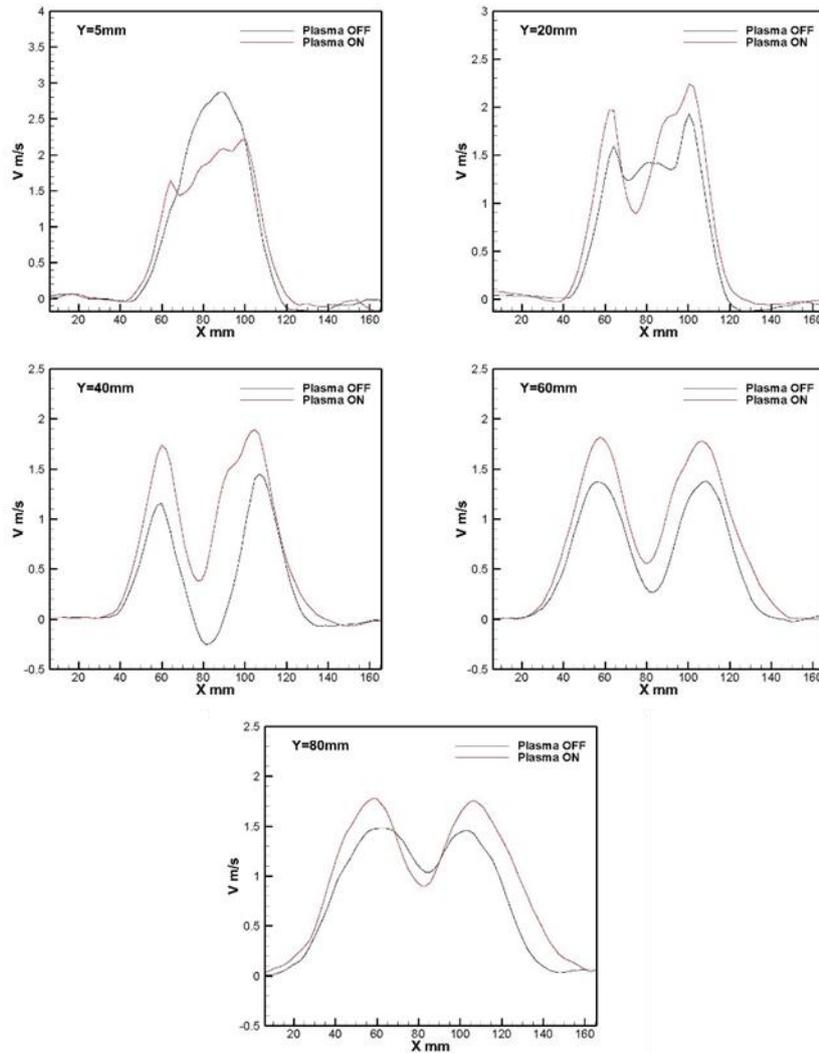
expansion radiale forte de l'écoulement sont observées avec l'activation du plasma. Ce changement est plus prononcé en bas des champs de vitesses  $U$  et  $V$  proche la position du plasma.

La Figure IV.48 montre les profils radiaux des vitesses le long de l'écoulement avec et sans plasma. Globalement la vitesse  $V$  augmente avec la présence du plasma notamment dans la partie annulaire de l'écoulement sous l'effet thermique provoqué par le plasma. Cependant, dans la zone centrale proche de la tige centrale ( $Y=5$  mm), on observe un comportement différent où la vitesse est plus faible dans le cas avec plasma. Il est probable que la décharge plasma crée un sillage ou un tourbillon (non visible sur notre plan de vue) qui décélère l'écoulement dans la partie centrale proche de la tige centrale.

Les profils de vitesse radiale  $U$  et les fluctuations RMS de vitesse longitudinale  $V'$  pour ce cas de flamme (30%  $\text{CO}_2$ ) sont disponibles en annexe E. Nous avons également mené les mêmes études pour les mêmes cas de flammes : 0 % de  $\text{CO}_2$  et 30 % de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de combustible, tout en maintenant un rapport de mélange  $\Phi$  de 0.7 et un nombre de swirl  $Sn$  de 0.5, mais en utilisant une tige centrale de 4 mm au lieu de 8 mm. Les résultats des profils de vitesse pour ces cas sont également inclus en annexe E.



**Figure IV.47.** Champs moyens de vitesses radiale  $U$  (à gauche) et longitudinale  $V$  (à droite) (en échelle de couleur) avec le champ des vecteurs vitesses pour le cas 30%  $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 8 mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à PRF=10 kHz et IEV= 10.5 kV.



**Figure IV.48.** Profils horizontaux de la vitesse longitudinale  $V$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $30\% \text{ CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de  $8$  mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.

## IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, trois configurations différentes du plasma (Pointe-Tige-Pointe, Arc Glissant autour d'une tige fixe longue et Arc Glissant autour d'une tige amovible courte), ont été étudiées pour leurs effets sur la combustion du biogaz. Chaque configuration possède ses propres avantages et défauts, et leurs impacts sur la stabilisation de la flamme, les émissions polluantes, la dynamique et la chimie du plasma ont été étudiés.

La configuration Pointe-Tige-Pointe a été identifiée comme la plus simple en termes de couplage avec le brûleur, car elle ne présentait pas d'obstacles à l'écoulement. Cette configuration a montré des résultats encourageants en termes de réduction de la hauteur

d'accrochage et de réduction des émissions de CO. La présence du plasma impulsif microseconde PTP s'est révélée intéressante pour la stabilisation de la flamme, comme en témoigne une réduction significative de la hauteur d'accrochage des flammes de biogaz. De plus, des espèces actives telles que  $N_2^*$ ,  $NO^*$ ,  $O^*$  et  $H^*$  ont été générées par le plasma PTP, et leur intensité a augmenté avec l'augmentation de la fréquence de répétition des impulsions (PRF) et de l'amplitude de tension (IEV).

La configuration d'Arc glissant autour d'une tige fixe longue a présenté des inconvénients liés à la longueur de la tige et à la nécessité d'électrodes HV longues pour assurer le glissement du plasma. Cela a affecté la flamme en termes de chauffage de la tige et de problèmes de centrage. Malgré ces défauts, des résultats intéressants ont été obtenus en termes de réduction de la hauteur d'accrochage, bien que moins significatifs que dans les autres configurations. L'ajout de  $CO_2$  dans le combustible a également affecté la forme et le comportement de la flamme, entraînant une stabilité réduite et une hauteur d'accrochage plus élevée. De plus, l'activation du plasma a conduit à une diminution des émissions de CO, mais à une augmentation des émissions de  $NO_x$ .

La configuration d'Arc Glissant autour d'une tige amovible courte a montré des résultats prometteurs, en particulier avec des tiges de diamètre plus petit, offrant plus d'espace d'injection de combustible et une interaction accrue entre le combustible et le plasma. Cette configuration a également montré une diminution des émissions de CO avec l'activation du plasma, mais une légère augmentation des émissions de  $NO_x$ , attribuée à l'excitation des espèces  $N_2^*$  et  $O^*$  par les décharges plasma. Cette configuration a également révélé des effets du plasma sur la dynamique de l'écoulement tels que l'augmentation des vitesses et l'expansion radiale d'écoulement causés par un effet thermique des décharges plasma.

Dans les trois configurations, les mêmes espèces du plasma se manifestent lors de l'activation du plasma, mais à des degrés différents en raison des différences de géométries du plasma et configuration de flamme. En conclusion, les résultats de cette comparaison mettent en évidence l'importance de la configuration des électrodes dans le couplage avec le brûleur et l'amélioration de la combustion assistée par plasma.

---

## Conclusion générale et perspectives

---

Ce travail de thèse a été mené au sein du laboratoire ICARE (Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement) en collaboration étroite avec le laboratoire GREMI (Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés). L'étude est financièrement supportée par le Labex CAPRYSES (Cinétique chimique et Aérothermodynamique pour des Propulsions et des Systèmes Energétiques Propres et Sûrs) et le projet APR IR CAPRI (Combustion assistée par plasmas pour stabiliser les flammes et contrôler les émissions polluantes). L'objectif global de cette étude était d'approfondir notre compréhension des phénomènes inhérents aux flammes non-prémélangées turbulentes swirlées de biogaz/air assistées par plasma impulsif microseconde. Nous nous sommes intéressés particulièrement à caractériser expérimentalement la structure et les caractéristiques des flammes de biogaz dans des conditions variables, telles que le nombre de swirl, la richesse globale et le pourcentage de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz. Il s'agissait aussi d'examiner les effets du plasma impulsif sous différentes conditions opératoires, à la fois sur la structure et la stabilité de la flamme, l'évolution des émissions polluantes ( $\text{NO}_x$  et  $\text{CO}$ ), ainsi que le comportement dynamique de l'écoulement réactif.

Compte tenu de la variété et de la complexité des phénomènes inhérents à la combustion assistée par plasma, il a été impératif de mener une étude bibliographique approfondie afin de comprendre les aspects fondamentaux de la phénoménologie des flammes en présence de plasmas. Cette revue de la littérature a également révélé le nombre limité d'études consacrées aux effets du plasma impulsif microseconde, en particulier dans le contexte des flammes turbulentes non-prémélangées swirlées. L'importance de ce travail réside dans sa contribution à l'enrichissement de cette base de connaissances, en mettant l'accent sur les aspects chimiques et dynamiques de la combustion assistée par plasma.

Afin de mener à bien cette étude, nous avons utilisé une installation de combustion spécialement conçue pour l'étude des flammes turbulentes à pression atmosphérique. La chambre de combustion a été développée au sein du laboratoire ICARE au cours de la thèse de N. Merlo [131] et puis modifiée lors de ma thèse, notamment au niveau du brûleur pour faciliter le couplage avec les différentes configurations plasma. Nous avons utilisé deux versions de brûleurs au cours de cette étude : un brûleur à injection axiale, développé spécifiquement pour cette thèse, équipé d'une tige centrale amovible pour servir de cathode pour le plasma et un brûleur à injection radiale modifié pour l'associer à un plasma. Ce brûleur à injection radiale de combustible est équipé d'un injecteur avec une tige allongée à sa sortie. Ces améliorations et les équipements spécifiques ont permis de réaliser différentes expériences pour étudier la combustion assistée par plasma.

La première étape de l'étude a concerné les effets de l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Cet effet a été étudié expérimentalement en utilisant plusieurs techniques de mesure dans le cadre de cette thèse, notamment la chimiluminescence  $\text{OH}^*$  en mesurant les hauteurs d'accrochage et longueurs de flammes, les émissions polluantes, ainsi que l'utilisation de la spectroscopie d'émission optique pour évaluer l'impact sur les espèces émises par la flamme

du biogaz. Les résultats obtenus à partir de la chimiluminescence et de l'observation directe des flammes ont révélé que dans le cas du brûleur coaxial à injection axiale de combustible, l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible a pour effet d'augmenter significativement la hauteur d'accrochage de la flamme ainsi que sa longueur, ce phénomène persistant jusqu'au soufflage de la flamme (comme discuté dans le chapitre IV) et qui est attribuée à l'effet de dilution du  $\text{CO}_2$ , qui réduit la température, la vitesse de la flamme et modifie la dynamique de l'écoulement des gaz. Cependant, un comportement différent a été mesuré avec le brûleur à injection radiale (chapitre III), où l'ajout de  $\text{CO}_2$  a entraîné une diminution de la hauteur d'accrochage, en raison de l'injection radiale (effet de cross-flow) avec des vitesses d'injection plus élevées avec l'ajout du  $\text{CO}_2$ . En ce qui concerne les émissions polluantes, l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible a eu un impact fort. Dans les deux configurations de brûleurs étudiées et pour toutes les conditions de flammes examinées au cours de cette thèse, nous avons constaté une réduction des émissions de  $\text{NO}_x$ , résultant de l'effet thermique de l'addition de  $\text{CO}_2$ , lequel abaisse la température de la flamme, réduisant ainsi la formation de  $\text{NO}_x$  thermique. Parallèlement, nous avons observé une augmentation du CO dans les gaz brûlés, due à la dissociation thermique du  $\text{CO}_2$  dans les régions de haute température de la flamme. Une observation supplémentaire importante a été faite lors de l'analyse des spectres d'émission optique des espèces réactives émises par la flamme, en particulier celle du radical hydroxyle ( $\text{OH}^*$ ). L'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le combustible a eu pour effet de réduire l'intensité de ces spectres d'émission optique, ce qui confirme la dilution des réactifs en présence de  $\text{CO}_2$  dans le combustible.

Nous avons ensuite réalisé une étude sur l'effet des plasmas impulsions microsecondes en utilisant différentes configurations de réacteurs plasma (Arc Glissant, Pointe-Tige-Pointe et Tige-Anneau) avec deux types différents de brûleurs (injection axiale et radiale) sur la stabilité et la structure de la flamme, les émissions polluantes, ainsi que sur les espèces émises dans différentes conditions opératoires. Nos résultats ont révélé que toutes les configurations du plasma utilisées ont joué un rôle significatif dans la stabilisation des flammes, réduisant chacune la hauteur d'accrochage des flammes en présence des impulsions plasma, bien que à des niveaux différents. Cela est dû principalement à l'effet thermique (changement de température locale) et chimique (espèces réactives émises par le plasma).

Avec le brûleur à injection axiale, la configuration la plus facile à intégrer était la Pointe-Tige-pointe. Cette configuration perturbe peu l'écoulement et a démontré des résultats notables en termes de stabilisation de la flamme. Nos observations à partir des résultats de la chimiluminescence  $\text{OH}^*$  et de la visualisation directe des flammes ont montré que la hauteur d'accrochage diminuait de manière significative en présence du plasma impulsif lorsque cette configuration des électrodes était utilisée. De plus, cette diminution de hauteur d'accrochage était d'autant plus marquée avec l'augmentation de la fréquence de répétition de l'impulsion (PRF) du plasma. En particulier, en utilisant une PRF de 10 kHz, la hauteur d'accrochage a diminué d'environ 75% par rapport au cas sans plasma. Avec le même brûleur à injection axiale, nous avons également étudié la configuration d'Arc Glissant, en utilisant deux types de tiges : l'une avec une tige longue intégrée dans le brûleur à une position fixe et l'autre avec deux tiges amovibles courtes de diamètres différents. Dans le cas de la configuration avec la tige fixe longue, le principal problème résidait dans le fait que la tige était

relativement très longue, ce qui a eu un impact sur l'écoulement et par conséquent la flamme, ce qui a rendu difficile de quantifier l'effet du plasma en termes de stabilisation de flamme. En revanche, la configuration d'Arc Glissant avec une tige amovible courte a montré des résultats prometteurs, en particulier avec des tiges de petit diamètre et donc avec une vitesse d'injection plus faible. Cette configuration a favorisé une meilleure interaction entre le combustible et le plasma. Cependant, il convient de noter qu'avec ce type de brûleur, la configuration Pointe-Tige-pointe reste la plus efficace en termes de réduction de hauteur d'accrochage et de stabilisation de flamme. La même configuration des électrodes (Arc Glissant) a aussi été appliquée avec un brûleur à injection radiale, et l'impact sur la stabilisation de la flamme s'est révélé extrêmement significatif. La flamme s'est maintenue dans la zone du plasma même à des fréquences du plasma faibles (2 kHz). D'autre part, avec le même brûleur, nous avons également étudié la configuration des électrodes Tige-Anneau, qui a un effet sur la hauteur d'accrochage, mais seulement à un niveau local. Dans cette configuration, l'arc électrique se déplace de manière erratique entre les deux électrodes, ce qui provoque une perturbation locale de la flamme, la forçant à suivre le déplacement du plasma plutôt que de maintenir une stabilité constante.

L'analyse par spectroscopie d'émission optique pour toutes les configurations d'électrodes du plasma a mis en évidence que le plasma impulsif microseconde engendre un grand nombre d'espèces excitées, notamment  $N_2^*$ ,  $NO^*$ ,  $O^*$ , et  $H^*$ . Leurs intensités augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence de répétition des impulsions et de la tension de génération des décharges plasma. De plus, les espèces excitées déjà présentes dans la flamme avant l'activation du plasma, telles que  $OH^*$ ,  $C_2^*$ ,  $CN^*$ ,  $CH^*$ , sont augmentées par le plasma d'autant plus que la tension des décharges plasmas et que la PRF augmentent. Ces espèces excitées jouent un rôle fondamental dans la stabilisation de la flamme et son maintien sur le brûleur. Cet effet est l'une des raisons qui ont contribué à stabiliser les flammes lors de l'application du plasma dans toutes les configurations étudiées.

Dans le but de mieux appréhender l'influence du plasma sur la dynamique de l'écoulement, nous avons utilisé la vélocimétrie par image de particules en deux dimensions (PIV 2D) pour examiner les effets du plasma impulsif sur les vitesses radiales et longitudinales de l'écoulement. Cette analyse a été réalisée en utilisant la configuration d'arc glissant pour les deux types de brûleurs, à injection radiale et axiale. Nos observations ont révélé que la présence du plasma exerce une influence non négligeable sur la dynamique de l'écoulement, notamment au sein de la Zone de Recirculation Centrale (ZRC) proche des décharges plasma. En effet, l'activation du plasma a entraîné une expansion radiale plus forte de l'écoulement et une augmentation de la vitesse longitudinale d'écoulement. De plus, cette augmentation est plus marquée à proximité du brûleur, mais elle diminue progressivement à mesure que l'on s'éloigne de la source de décharge. Ces changements dynamiques sont susceptibles de contribuer de manière significative à la stabilisation de la flamme en présence du plasma.

Les configurations du plasma étudiées avec les deux types de brûleurs ont montré un effet similaire sur les émissions polluantes. Plus précisément, l'utilisation du plasma a entraîné une augmentation de la concentration de  $NO_x$ , résultant de l'élévation de la température due au

plasma d'une part, et de la génération de certains radicaux (tels que  $N^*$  et  $O^*$ ) responsables de la formation de  $NO$ , d'autre part. En parallèle, la concentration de  $CO$  a diminué grâce à l'application du plasma, en raison de la conversion du  $CO$  en  $CO_2$  induite par le plasma. Ces deux effets se renforcent avec l'augmentation de la PRF. Malgré ces variations, la concentration de  $NO_x$  produite est restée conforme aux normes environnementales en vigueur.

Parmi les points abordés dans cette thèse, certains méritent une exploration plus approfondie. L'étude de la dynamique de l'écoulement à l'aide la PIV rapide que nous avons entreprise au cours de cette thèse était une exploration préliminaire, entreprise en fin de dernière année, pour compléter les analyses des flammes. Les résultats que nous avons obtenus offrent un aperçu prometteur des interactions entre le plasma et l'écoulement, mais ils ne représentent qu'une première étape dans la compréhension complète de ces phénomènes complexes. Il serait bénéfique de poursuivre des études plus détaillées afin de quantifier au mieux l'effet du plasma sur les champs dynamiques.

De plus, il serait essentiel de mesurer la température de la flamme avec et sans plasma, afin de mieux comprendre l'impact thermique du plasma et la raison de l'augmentation des émissions  $NO_x$ .

Il serait également intéressant de mener une étude sur les effets de la flamme sur le plasma. Il a effectivement été noté qu'il y avait des modifications dans le comportement du plasma lorsqu'il interagissait avec la flamme.

De plus, la conception d'un système du plasma intégré dans le brûleur, plutôt que des électrodes à la sortie du brûleur, mériterait également d'être explorée. Cette approche pourrait permettre de minimiser les perturbations de l'écoulement tout en profitant des avantages du plasma pour la stabilisation de la flamme.

Dans l'ensemble, les diverses études expérimentales menées au cours de ce travail de thèse nous ont permis d'acquérir une meilleure compréhension des nombreux phénomènes qui interviennent dans la combustion des flammes de biogaz swirlées non prémélanges assistées par plasma impulsif microseconde. Ces études ont été réalisées en prenant en compte une gamme de paramètres liés à la combustion, tels que le taux de  $CO_2$  dans le combustible, la richesse globale et le nombre de swirl, ainsi que des paramètres associés au plasma, tels que la configuration géométrique, la fréquence de répétition des impulsions et l'amplitude de la tension électrique appliquée aux électrodes du réacteur plasma. Ces investigations ont contribué à approfondir notre compréhension des effets de ces paramètres sur la stabilité de la flamme, les émissions polluantes, les espèces impliquées à la fois dans le plasma et dans la flamme, ainsi que la dynamique globale de l'écoulement réactif.

---

## Références bibliographiques

---

- [1] "Traitement du biogaz: nettoyage, séchage et valorisation du biogaz," Condorchem Envitech. Accessed: Oct. 19, 2022. [Online]. Available: <https://condorchem.com/fr/blog/traitement-du-biogaz/>
- [2] "IFPEN | Biogaz en Europe : quelles perspectives ?," IFPEN. Accessed: Jun. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/biogaz-en-europe-quelles-perspectives>
- [3] "Optimal use of biogas from waste streams. An assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020." Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/publications/optimal-use-biogas-waste-streams-assessment-potential-biogaz-digestion-eu-beyond-2020\\_en](https://energy.ec.europa.eu/publications/optimal-use-biogas-waste-streams-assessment-potential-biogaz-digestion-eu-beyond-2020_en)
- [4] "The outlook for biogas and biomethane to 2040 – Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth – Analysis," IEA. Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/the-outlook-for-biogas-and-biomethane-to-2040>
- [5] Y. Ju and W. Sun, "Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 48, pp. 21–83, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.pecs.2014.12.002.
- [6] N. Q. Minesi, V. P. Blanchard, E. Pannier, G. D. Stancu, and C. O. Laux, "Plasma-assisted combustion with nanosecond discharges. I: Discharge effects characterization in the burnt gases of a lean flame," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 31, no. 4, p. 045029, Apr. 2022, doi: 10.1088/1361-6595/ac5cd4.
- [7] E. S. Stockman, S. H. Zaidi, R. B. Miles, C. D. Carter, and M. D. Ryan, "Measurements of combustion properties in a microwave enhanced flame," *Combustion and Flame*, vol. 156, no. 7, pp. 1453–1461, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.combustflame.2009.02.006.
- [8] H. Zhang, L. He, J. Yu, W. Qi, and G. Chen, "Investigation of flame structure in plasma-assisted turbulent premixed methane-air flame," *Plasma Science and Technology*, vol. 20, Feb. 2018, doi: 10.1088/2058-6272/aa9850.
- [9] J. Sun, Y. Tang, and S. Li, "Plasma-assisted stabilization of premixed swirl flames by gliding arc discharges," *Proceedings of the Combustion Institute*, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.proci.2020.06.223.
- [10] Q. Zhang, Z. Liu, D. Lin, Y. Hu, B. Zheng, and T. Zhao, "Analysis of discharge characteristics of pulsed plasma power source in the microsecond scale," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2313, no. 1, p. 012023, Jul. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2313/1/012023.
- [11] A. Ghabi, T. Boushaki, P. Escot Bocanegra, and E. Robert, "Laminar Burning Velocity, Adiabatic Flame Temperature, and Pollutants of Biogas/Air Mixture at Various CO<sub>2</sub> Concentrations and Plasma Assist," *Combustion Science and Technology*, vol. 0, no. 0, pp. 1–23, Feb. 2023, doi: 10.1080/00102202.2023.2182202.
- [12] A. Ghabi *et al.*, "Effects of pulsed gliding arc plasma on non-premixed CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>- air flame stability," *Thermal Science and Engineering Progress*, p. 101764, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.101764.
- [13] A. Ghabi, P. Escot Bocanegra, B. Sarh, S. Dozias, E. Robert, and T. Boushaki, "Experimental study of stability and pollutant emissions of turbulent biogas flames under microsecond pulsed plasma," *Fuel*, vol. 353, p. 129180, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129180.
- [14] C. Lacour, "STABILITE DE FLAMMES LAMINAIRES PARTIELLEMENT PREMELANGEES-APPLICATION AUX BRULEURS DOMESTIQUES".
- [15] S. P. Burke and T. E. W. Schumann, "Diffusion Flames," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 20, no. 10, pp. 998–1004, Oct. 1928, doi: 10.1021/ie50226a005.
- [16] G. T., "Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air," *Combustion Science and Technology*, vol. 41, no. 1–2, pp. 17–29, Sep. 1984, doi: 10.1080/00102208408923819.

- [17] D. Demare, "Stabilisation d'une flamme suspendue non-prémélangée, influence d'un champ acoustique," These de doctorat, Rouen, 2003. Accessed: May 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/2003ROUES024>
- [18] F. Takahashi and W. J. Schmoll, "Lifting criteria of jet diffusion flames," *Symposium (International) on Combustion*, vol. 23, no. 1, pp. 677–683, Jan. 1991, doi: 10.1016/S0082-0784(06)80316-4.
- [19] A. Wyzgolik and F. Baillot, "Response of the non-premixed lifted flame to coaxial jet mixing layers," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, no. 1, pp. 1583–1590, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.proci.2006.07.214.
- [20] D. Demare and F. Baillot, "The role of secondary instabilities in the stabilization of a nonpremixed lifted jet flame," *Physics of Fluids*, vol. 13, no. 9, pp. 2662–2670, Sep. 2001, doi: 10.1063/1.1386935.
- [21] N. A. Chigier and J. M. Bee'r, "Velocity and Static-Pressure Distributions in Swirling Air Jets Issuing From Annular and Divergent Nozzles," *Journal of Basic Engineering*, vol. 86, no. 4, pp. 788–796, Dec. 1964, doi: 10.1115/1.3655954.
- [22] K. Truffin, "Simulation aux grandes échelles et identification acoustique des turbines à gaz en régime partiellement prémélangé," phd, 2005. Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000663/>
- [23] X. Zhu *et al.*, "Experimental investigation of the stability and emission characteristics of premixed formic acid-methane-air flames in a swirl combustor," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 15, pp. 6120–6129, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.193.
- [24] R. Jarpala, N. V. S. Aditya Burle, M. Voleti, and R. Sadanandan, "Effect of Swirl on the Flame Dynamics and Pollutant Emissions in an Ultra-Lean Non-Premixed Model Gas Turbine Burner," *Combustion Science and Technology*, vol. 189, no. 10, pp. 1832–1848, Oct. 2017, doi: 10.1080/00102202.2017.1333500.
- [25] J. Zhang, C. Sui, B. Zhang, and J. Li, "Effects of swirl intensity on flame stability and NO emission in swirl-stabilized ammonia/methane combustion," *Applications in Energy and Combustion Science*, vol. 14, p. 100138, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jaecs.2023.100138.
- [26] A. Degenève, C. Mirat, J. Caudal, R. Vicquelin, and T. Schuller, "Effects of swirl on the stabilization of non-premixed oxygen-enriched flames above coaxial injectors," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 141, no. 12, p. 121018, Dec. 2019, doi: 10.1115/1.4045024.
- [27] T. Boushaki, J.-C. Sautet, and B. Labegorre, "Control of flames by tangential jet actuators in oxy-fuel burners," *Combustion and Flame*, vol. 156, no. 11, pp. 2043–2055, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.combustflame.2009.06.013.
- [28] S. Chakchak, A. Hidouri, A. Ghabi, A. F. Ghoniem, and T. Boushaki, "Experimental investigation on the stability of turbulent swirling methane/air-O<sub>2</sub> flames," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 141, p. 110772, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2022.110772.
- [29] N. Bellomo, F. Barato, M. Faenza, M. Lazzarin, A. Bettella, and D. Pavarin, "Numerical and Experimental Investigation of Unidirectional Vortex Injection in Hybrid Rocket Engines," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 29, no. 5, pp. 1097–1113, Sep. 2013, doi: 10.2514/1.B34506.
- [30] A. E. E. Khalil and A. K. Gupta, "Towards distributed combustion for ultra low emission using swirling and non-swirling flowfields," *Applied Energy*, vol. 121, pp. 132–139, May 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.01.081.
- [31] D. Lim, J. Lee, H. Shin, K. Kim, S. Moon, and K. Min, "Effect of Swirl Motion on Combustion and Emissions Characteristics with Dual-Fuel Combustion in Compression Ignition Engine," *Int.J Automot. Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 379–388, Apr. 2022, doi: 10.1007/s12239-022-0035-9.
- [32] N. Merlo, T. Boushaki, and C. Chauveau, "Effets de l'enrichissement en oxygène sur une flamme turbulente non-prémélangée, méthane-air, stabilisée par un swirl," 2013.

- [33] S. McAllister, J.-Y. Chen, and A. C. Fernandez-Pello, *Fundamentals of Combustion Processes*. in Mechanical Engineering Series. New York, NY: Springer, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-7943-8.
- [34] A. H. L. Ballal Dilip R., *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, Third Edition*, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. doi: 10.1201/9781420086058.
- [35] U. E. N. C. for E. Assessment, "The oxidation of nitrogen in combustion and explosions." Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: [https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference\\_id/34215](https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/34215)
- [36] "Équilibre de Boudouard," *Wikipédia*. Mar. 03, 2021. Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quilibre\\_de\\_Boudouard&oldid=180503010](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quilibre_de_Boudouard&oldid=180503010)
- [37] F. Pischinger, H. Schulte, and J. Jansen, "Grundlagen und Entwicklungslinien der diesel-motorischen Brennverfahren," *VDI-Berichte*, vol. 714, pp. 61–93, 1988.
- [38] Y. L. Chan, M. M. Zhu, Z. Z. Zhang, P. F. Liu, and D. K. Zhang, "The Effect of CO<sub>2</sub> Dilution on the Laminar Burning Velocity of Premixed Methane/Air Flames," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 3048–3053, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.621.
- [39] Y. Liu, Q. Xue, H. Zuo, F. Yang, X. Peng, and J. Wang, "Effects of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> Dilution on the Combustion Characteristics of H<sub>2</sub>/CO Mixture in a Turbulent, Partially Premixed Burner," *ACS Omega*, vol. 6, no. 24, pp. 15651–15662, Jun. 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c00534.
- [40] F. Khan, A. M. Elbaz, S. Saxena, O. Mannaa, and W. L. Roberts, "Effect of CO<sub>2</sub> Dilution on Methane/Air Flames at Elevated Pressures: An Experimental and Modeling Study," *Energy Fuels*, vol. 35, no. 3, pp. 2639–2653, Feb. 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c03568.
- [41] A. Vandael, J. P. Chica Cano, S. de Persis, and G. Cabot, "Study of the influence of water vapour and carbon dioxide dilution on flame structure of swirled methane/oxygen-enriched air flames," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 113, p. 110010, May 2020, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.110010.
- [42] J. I. Erete, K. J. Hughes, L. Ma, M. Fairweather, M. Pourkashanian, and A. Williams, "Effect of CO<sub>2</sub> dilution on the structure and emissions from turbulent, non-premixed methane–air jet flames," *Journal of the Energy Institute*, vol. 90, no. 2, pp. 191–200, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.joei.2016.02.004.
- [43] J. Park, D.-J. Hwang, J.-G. Choi, K.-M. Lee, S.-I. Keel, and S.-H. Shim, "Chemical effects of CO<sub>2</sub> addition to oxidizer and fuel streams on flame structure in H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> counterflow diffusion flames," *Int. J. Energy Res.*, vol. 27, no. 13, pp. 1205–1220, Oct. 2003, doi: 10.1002/er.946.
- [44] H. Guo and G. J. Smallwood, "A Numerical Study on the Influence of CO<sub>2</sub> Addition on Soot Formation in an Ethylene/Air Diffusion Flame," *Combustion Science and Technology*, vol. 180, no. 10–11, pp. 1695–1708, Sep. 2008, doi: 10.1080/00102200802258072.
- [45] A. Matynia, J.-L. Delfau, L. Pillier, and C. Vovelle, "Comparative study of the influence of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O on the chemical structure of lean and rich methane-air flames at atmospheric pressure," *Combust Explos Shock Waves*, vol. 45, no. 6, pp. 635–645, Nov. 2009, doi: 10.1007/s10573-009-0078-5.
- [46] A. Samanta, R. Ganguly, and A. Datta, "Effect of CO<sub>2</sub> Dilution on Flame Structure and Soot and NO Formations in CH<sub>4</sub>-Air Nonpremixed Flames," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 132, no. 12, Aug. 2010, doi: 10.1115/1.4001809.
- [47] A. Briones, S. Aggarwal, and V. Katt, "A Numerical Investigation Of Flame LiftOff And Stabilization," *Physics of Fluids*, vol. 18, Apr. 2006, doi: 10.1063/1.2191851.
- [48] H. Zaidaoui, T. Boushaki, J. Sautet, C. Chauveau, B. Sarh, and I. Gökalp, "Effects of CO<sub>2</sub> dilution and O<sub>2</sub> enrichment on non- premixed turbulent CH<sub>4</sub>-air flames in a swirl burner," p. 30.
- [49] Y. Chen, J. Wang, X. Zhang, and C. Li, "The Effects of CO<sub>2</sub> Additional on Flame Characteristics in the CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Counterflow Diffusion Flame," *Molecules*, vol. 26, p. 2905, May 2021, doi: 10.3390/molecules26102905.

- [50] X. Li, S. Xie, J. Zhang, T. Li, and X. Wang, "Combustion characteristics of non-premixed CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> jet flames in coflow air at normal and elevated temperatures," *Energy*, vol. 214, p. 118981, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118981.
- [51] H. Mortazavi, Y. Wang, Z. Ma, and Y. Zhang, "The investigation of CO<sub>2</sub> effect on the characteristics of a methane diffusion flame," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 92, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.11.005.
- [52] B. Browning, *Basic Plasma Physics*. Lulu Press, Incorporated, 2008.
- [53] K. Jüttner, U. Galla, and H. Schmieder, "Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry," *Electrochimica Acta*, vol. 45, no. 15, pp. 2575–2594, May 2000, doi: 10.1016/S0013-4686(00)00339-X.
- [54] S.-Z. Li, Y.-L. Niu, S.-L. Cao, J. Zhang, J. Zhang, and X. Li, "The effect of plasma discharge on methane diffusion combustion in air assisted by an atmospheric pressure microwave plasma torch," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 55, no. 23, p. 235203, Jun. 2022, doi: 10.1088/1361-6463/ac50cb.
- [55] E. Veldhuizen and W. Rutgers, "Corona discharges: fundamentals and diagnostics," Jan. 2001.
- [56] "The corona discharge, its properties and specific uses." Accessed: Jul. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1351/pac198557091353/html>
- [57] Mariano, "Traitement corona | Technologie des plastiques," Traitement corona | Technologie des plastiques. Accessed: Jul. 17, 2023. [Online]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/05/tratamiento-corona.html>
- [58] H. Wafa, M. ONDARTS, J. Outin, E. Gonze, and T. Bejat, "Développement d'un procédé pour l'épuration de l'air intérieur par couplage de la décharge couronne et de l'adsorption," *Pollution atmosphérique*, Nov. 2016, doi: 10.4267/pollution-atmospherique.5998.
- [59] "Electrical Discharges - How The Spark, Glow and Arc Work | PDF | Electric Arc | Electric Current," Scribd. Accessed: Jan. 06, 2022. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/219597935/Electrical-Discharges-How-the-Spark-Glow-and-Arc-Work>
- [60] "Electric glow discharge | Plasma-Universe.com." Accessed: Jul. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.plasma-universe.com/electric-glow-discharge/>
- [61] "Electric Arc - body, used, process, Earth, chemical, form, energy, gas, carbon." Accessed: Jul. 17, 2023. [Online]. Available: <http://www.scienceclarified.com/Di-El/Electric-Arc.html>
- [62] D. V. Roupasov, A. A. Nikipelov, M. M. Nudnova, and A. Yu. Starikovskii, "Flow Separation Control by Plasma Actuator with Nanosecond Pulsed-Periodic Discharge," *AIAA Journal*, vol. 47, no. 1, pp. 168–185, Jan. 2009, doi: 10.2514/1.38113.
- [63] "PPS®5000, Propulseur à Effet Hall," Safran. Accessed: Jul. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.safran-group.com/fr/produits-services/ppsr5000-propulseur-plasma-stationnaire>
- [64] C. Bai, S. Li, T. Chen, X. Chen, W. Meng, and J. Pan, "Methane–Air Plasma-Assisted Ignition Excited by Nanosecond Repetitively Pulsed Discharge: Numerical Modeling and Effect of Inert Gas," *ACS Omega*, vol. 6, no. 37, pp. 24156–24165, Sep. 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c03696.
- [65] J. Deng, P. Wang, Y. Sun, J. Zhou, Y. Luo, and D. He, "Design and experimental investigation of a dual swirl combined DBD plasma combustor head actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 344, p. 113707, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.sna.2022.113707.
- [66] V. P. Blanchard, N. Minesi, Y. Bechane, B. Fiorina, and C. O. Laux, "Experimental and numerical characterization of a lean premixed flame stabilized by nanosecond discharges," in *AIAA SCITECH 2022 Forum*, San Diego, CA & Virtual: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jan. 2022. doi: 10.2514/6.2022-2255.
- [67] R. A. Varella, "Effects of plasma assisted combustion on pollutant emissions of a premixed flame of natural gas and air," p. 8, 2016.
- [68] Y. Ju and W. Sun, "Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 48, pp. 21–83, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.pecs.2014.12.002.

- [69] T. L. Brown and H. E. LeMay Bursten, Bruce Edward, *Chemistry: the central science*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991. Accessed: Jan. 07, 2022. [Online]. Available: <https://archive.org/details/chemistrycentral00brow>
- [70] J. Warnatz, U. Maas, and R. Dibble, *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. 2006. doi: 10.1007/978-3-540-45363-5.
- [71] T. Sreethawong, P. Thakonpatthanakun, and S. Chavadej, "Partial oxidation of methane with air for synthesis gas production in a multistage gliding arc discharge system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 1067–1079, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.07.013.
- [72] D. Lee, K.-T. Kim, M. S. Cha, and Y.-H. Song, "Effect of excess oxygen in plasma reforming of diesel fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 4668–4675, May 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.091.
- [73] M. J. Gallagher, R. Geiger, A. Plevich, A. Rabinovich, A. Gutsol, and A. Fridman, "On-board plasma-assisted conversion of heavy hydrocarbons into synthesis gas," *Fuel*, vol. 89, no. 6, pp. 1187–1192, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2009.11.039.
- [74] K. Sundmacher, *Advances in chemical engineering. Volume 41, Fuel cell engineering*. in *Advances in chemical engineering ; v. 41*. Amsterdam, San Diego: Elsevier, Academic Press ;, 2012.
- [75] "Fuel Cell Handbook," p. 352.
- [76] J. J. (1856-1940) Thomson and J. C. (1831-1879) Maxwell, "Notes on recent researches in electricity and magnetism," *Lilliad - Université de Lille - Sciences et technologies*, Mar. 2015, Accessed: Jul. 20, 2023. [Online]. Available: <https://iris.univ-lille.fr/handle/1908/3463>
- [77] A. Starikovskiy and N. Aleksandrov, "Plasma-assisted ignition and combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, no. 1, pp. 61–110, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.pecs.2012.05.003.
- [78] V. P. Blanchard, P. Scoufflaire, C. O. Laux, and S. Ducruix, "Combustion performance of plasma-stabilized lean flames in a gas turbine model combustor," *Applications in Energy and Combustion Science*, vol. 15, p. 100158, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jaecs.2023.100158.
- [79] J. Lambert, S. Coulombe, G. Bourque, and J. M. Bergthorson, "Investigation of the hydrodynamic effect of nanosecond repetitively pulsed discharges on a laminar stagnation flame," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, no. 4, pp. 6567–6574, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.proci.2020.06.166.
- [80] F. D. Sabatino and D. A. Lacoste, "Enhancement of the lean stability and blow-off limits of methane-air swirl flames at elevated pressures by nanosecond repetitively pulsed discharges," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 53, no. 35, p. 355201, Jun. 2020, doi: 10.1088/1361-6463/ab8f54.
- [81] N. Barléon, L. Cheng, B. Cuenot, and O. Vermorel, "A phenomenological model for plasma-assisted combustion with NRP discharges in methane-air mixtures: PACMIND," *Combustion and Flame*, vol. 253, p. 112794, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.combustflame.2023.112794.
- [82] D. A. Lacoste, "Flames with plasmas," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 4, pp. 5405–5428, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.proci.2022.06.025.
- [83] A. Fridman, S. Nester, L. A. Kennedy, A. Saveliev, and O. Mutaf-Yardimci, "Gliding arc gas discharge," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 25, no. 2, pp. 211–231, Apr. 1999, doi: 10.1016/S0360-1285(98)00021-5.
- [84] D. Moussa, H. Vitrac, J. L. Brisset, B. G. Cheron, C. Hnatiuc, and A. Addou, *Acidity control of the oxidation reactions induced by non-thermal plasma treatment of aqueous effluents in pollutant abatement processes*. Estonia: Univ of Tartu, 2002.
- [85] D. Moussa and J.-L. Brisset, "Disposal of spent tributylphosphate by gliding arc plasma," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 102, no. 2, pp. 189–200, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0304-3894(03)00069-4.
- [86] Jinguo Sun, Qian Huang, Yong Tang, and Shuiqing Li, "Stabilization and Emission Characteristics of Gliding Arc-Assisted NH<sub>3</sub>/CH<sub>4</sub>/Air Premixed Flames in a Swirl Combustor," *Energy & fuels*, vol. 36, no. 15, pp. 8520–8527, 2022, doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c01217.

- [87] Y. Tang, D. Xie, C. Wei, B. Huang, B. Shi, and N. Wang, "Effect of microsecond repetitively pulsed discharges on lean blow-off limit and emission of rapidly-mixed ammonia/air swirling flames," *Applications in Energy and Combustion Science*, vol. 14, p. 100140, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jaecs.2023.100140.
- [88] W. Cui, Y. Ren, and S. Li, "Stabilization of Premixed Swirl Flames Under Flow Pulsations Using Microsecond Pulsed Plasmas," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 35, no. 1, pp. 190–200, Jan. 2019, doi: 10.2514/1.B37219.
- [89] G. M. Faeth, "Swirl flows," *Combustion and Flame*, vol. 63, no. 1–2, p. 311, Jan. 1986, doi: 10.1016/0010-2180(86)90133-1.
- [90] T. Boushaki, A. Koched, Z. Mansouri, and F. Lespinasse, "Volumetric velocity measurements (V3V) on turbulent swirling flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 54, pp. 46–55, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.12.003.
- [91] Y. Ikeda and J. L. Beduneau, "Attachment structure of a non-premixed laminar methane flame," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 30, no. 1, pp. 391–398, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.proci.2004.08.165.
- [92] M. Slack and A. Grillo, "High temperature rate coefficient measurements of CO + O chemiluminescence," *Combustion and Flame*, vol. 59, no. 2, pp. 189–196, Feb. 1985, doi: 10.1016/0010-2180(85)90024-0.
- [93] C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas, and A. M. K. P. Taylor, "Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH\* and CH\* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane–air flames," *Combustion and Flame*, vol. 156, no. 2, pp. 273–291, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.combustflame.2008.11.008.
- [94] G. P. Smith, C. Park, J. Schneiderman, and J. Luque, "C2 Swan band laser-induced fluorescence and chemiluminescence in low-pressure hydrocarbon flames," *Combustion and Flame*, vol. 141, no. 1, pp. 66–77, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.combustflame.2004.12.010.
- [95] Jorge Luque and David R. Crosley, "LIFBASE: Database and spectral simulation program." t SRI Internation Report MP99-009, 1999.
- [96] M. Raffel, C. E. Willert, F. Scarano, C. J. Kähler, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-68852-7.
- [97] G. Li, M. Zhou, Z. Zhang, J. Liang, and H. Ding, "Experimental and kinetic studies of the effect of CO<sub>2</sub> dilution on laminar premixed n-heptane/air flames," *Fuel*, vol. 227, pp. 355–366, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.04.116.
- [98] S. Vakilipour, Y. Tohidi, J. Al-Zaili, and R. Riazi, "A numerical investigation of CO<sub>2</sub> dilution on the thermochemical characteristics of a swirl stabilized diffusion flame," *Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.*, vol. 41, no. 2, pp. 327–348, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10483-020-2571-6.
- [99] Y. Chen, J. Wang, X. Zhang, and C. Li, "The Effects of CO<sub>2</sub> Additional on Flame Characteristics in the CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Counterflow Diffusion Flame," *Molecules*, vol. 26, p. 2905, May 2021, doi: 10.3390/molecules26102905.
- [100] T. H. New and W. L. Tay, "Effects of cross-stream radial injections on a round jet," *Journal of Turbulence*, vol. 7, p. N57, Jan. 2006, doi: 10.1080/14685240600847466.
- [101] S. Aravind, R. K. Gohiya, R. S. Prakash, and R. Sadanandan, "Effects of CO<sub>2</sub> dilution on partially premixed CH<sub>4</sub>-air flames in swirl and bluff body stabilized combustor," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, no. 4, pp. 5209–5217, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.proci.2020.06.153.
- [102] T. Boushaki, *Swirling Flows and Flames*. 2019. doi: 10.5772/intechopen.75295.
- [103] A. A. El-Mallah, S. Ibrahim, A. Farrag, and M. Gad, *Experimental Investigations on the Combustion of Gaseous Fuels*. 2009.
- [104] R. Zhang, S. Yang, X. Zhou, and D. Liu, "Study of Diffusion Cool Flames of Dimethyl Ether in a Counterflow Burner under a Wide Range of Pressures," *ACS Omega*, vol. 7, no. 29, pp. 25087–25093, Jul. 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c01362.

- [105] A. Rousso, X. Mao, Q. Chen, and Y. Ju, "Kinetic studies and mechanism development of plasma assisted pentane combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 4, pp. 5595–5603, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.proci.2018.05.100.
- [106] G. Vignat *et al.*, "Improvement of lean blow out performance of spray and premixed swirled flames using nanosecond repetitively pulsed discharges," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, no. 4, pp. 6559–6566, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.proci.2020.06.136.
- [107] Y. Meng, H. Gu, and F. Chen, "Influence of Plasma on the Combustion Mode in a Scramjet," *Aerospace*, vol. 9, p. 73, Jan. 2022, doi: 10.3390/aerospace9020073.
- [108] S. Skeen, "Oxygen-Enhanced Combustion: Theory and Applications," Jan. 2009.
- [109] A. M. Starik, B. I. Loukhovitski, A. S. Sharipov, and N. S. Titova, "Physics and chemistry of the influence of excited molecules on combustion enhancement," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 373, no. 2048, p. 20140341, Aug. 2015, doi: 10.1098/rsta.2014.0341.
- [110] N. Hwang, J. Lee, D. Lee, and Y.-H. Song, "Interactive Phenomena of a Rotating Arc and a Premixed CH<sub>4</sub> Flame," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 32, Apr. 2012, doi: 10.1007/s11090-012-9349-0.
- [111] A. J. Pinto, M. E. Sbampato, J. C. Sagás, and P. T. Lacava, "Gliding Arc Discharge for Emission Control in Swirl Fuel-lean Non-premixed Combustion," *Combustion Science and Technology*, vol. 0, no. 0, pp. 1–16, Oct. 2021, doi: 10.1080/00102202.2021.1990896.
- [112] P. Attri *et al.*, "Generation mechanism of hydroxyl radical species and its lifetime prediction during the plasma-initiated ultraviolet (UV) photolysis," *Sci Rep*, vol. 5, p. 9332, Mar. 2015, doi: 10.1038/srep09332.
- [113] N. Chintala *et al.*, "Nonthermal Ignition of Premixed Hydrocarbon-Air Flows by Nonequilibrium Radio Frequency Plasma," *Journal of Propulsion and Power - J PROPUL POWER*, vol. 21, pp. 583–590, Jul. 2005, doi: 10.2514/1.10865.
- [114] I. Adamovich *et al.*, "Plasma assisted ignition and high-speed flow control: Non-thermal and thermal effects," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 18, p. 034018, Jul. 2009, doi: 10.1088/0963-0252/18/3/034018.
- [115] N. Spyrou and C. Manassis, "Spectroscopic study of a positive streamer in a point-to-plane discharge in air: evaluation of the electric field distribution," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 22, no. 1, pp. 120–128, Jan. 1989, doi: 10.1088/0022-3727/22/1/017.
- [116] S. Zhou, Y. Tong, Z. Zheng, W. Nie, Y. Yang, and X. Liu, "Plasma-assisted flame stabilization by AC dielectric barrier discharge in burst mode," *Journal of Applied Physics*, vol. 130, no. 17, p. 173305, Nov. 2021, doi: 10.1063/5.0059369.
- [117] A. Starikovskiy, "Physics and chemistry of plasma-assisted combustion," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 373, no. 2048, p. 20150074, Aug. 2015, doi: 10.1098/rsta.2015.0074.
- [118] H.-M. Li, G.-X. Li, Z.-Y. Sun, Z.-H. Zhou, Y. Li, and Y. Yuan, "Effect of dilution on laminar burning characteristics of H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub>/air premixed flames with various hydrogen fractions," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 74, pp. 160–168, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2015.11.026.
- [119] N. Gascoin, Q. YANG, and K. Chetehouna, "Thermal Effects of CO<sub>2</sub> on the NO<sub>x</sub> Formation Behavior in the CH<sub>4</sub> Diffusion Combustion System," *Applied Thermal Engineering*, vol. 110, pp. 144–149, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.133.
- [120] R. Slefarski, "Study on the Combustion Process of Premixed Methane Flames with CO<sub>2</sub> Dilution at Elevated Pressures," *Energies*, vol. 12, p. 348, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12030348.
- [121] M. C. Lee, S. B. Seo, J. Yoon, M. Kim, and Y. Yoon, "Experimental study on the effect of N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and steam dilution on the combustion performance of H<sub>2</sub> and CO synthetic gas in an industrial gas turbine," *Fuel*, vol. 102, pp. 431–438, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2012.05.028.
- [122] H. Zaidaoui, T. Boushaki, A. Koched, J.C. Sautet, B. Sarh, and I. Gökalp, "Experimental Study of EGR Dilution and O<sub>2</sub> Enrichment Effects on Turbulent Non-Premixed Swirling Flames,"

- Combustion Science and Technology*, vol. 193, no. 2, pp. 280–289, Jan. 2021, doi: 10.1080/00102202.2020.1786375.
- [123] J. X. Zhou, B. Moreau, C. Mounaïm-Rousselle, and F. Foucher, “Combustion, Performance and Emission Analysis of an Oxygen-Controlling Downsized SI Engine,” *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. IFP Energies nouvelles*, vol. 71, no. 4, p. 49, Jul. 2016, doi: 10.2516/ogst/2015035.
- [124] T. Boushaki, P. Escot bocanegra, H. Zaidaoui, S. Dozias, and M. Wartel, “Pulsed Gliding Arc plasma effects on a CH<sub>4</sub>-air turbulent swirling flame,” *INFUB*, vol. 4 pages.
- [125] T. Hiejima and K. Nishimura, “Effects of fuel injection speed on supersonic combustion using separation-resistant struts,” *AIP Advances*, vol. 11, no. 6, p. 065123, Jun. 2021, doi: 10.1063/5.0055104.
- [126] M. Huang *et al.*, “Effect of fuel injection velocity on MILD combustion of syngas in axially-staged combustor,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1–2, pp. 485–492, May 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.033.
- [127] A. Ghabi, T. Boushaki, P. Escot Bocanegra, and E. Robert, “Laminar Burning Velocity, Adiabatic Flame Temperature, and Pollutants of Biogas/Air Mixture at Various CO<sub>2</sub> Concentrations and Plasma Assist,” *Combustion Science and Technology*, vol. 195, no. 7, pp. 1599–1621, May 2023, doi: 10.1080/00102202.2023.2182202.
- [128] H. Zaidaoui, T. Boushaki, J. C. Sautet, C. Chauveau, B. Sarh, and I. Gökalp, “Effects of CO<sub>2</sub> Dilution and O<sub>2</sub> Enrichment on Non-premixed Turbulent CH<sub>4</sub>-Air Flames in a Swirl Burner,” *Combustion Science and Technology*, vol. 190, no. 5, pp. 784–802, May 2018, doi: 10.1080/00102202.2017.1409217.
- [129] I. Hraïech, J. C. Sautet, S. Yon, and A. Mhimid, “Combustion of hythane diluted with CO<sub>2</sub>,” *Thermal Science*, vol. 19, pp. 100–100, Jan. 2013, doi: 10.2298/TSCI120119100H.
- [130] Y. Song, C. Zou, Y. He, and C. Zheng, “The chemical mechanism of the effect of CO<sub>2</sub> on the temperature in methane oxy-fuel combustion,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 86, pp. 622–628, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.008.
- [131] N. Merlo, “Caractérisation expérimentale d’une flamme turbulente non prémélangée swirlée : effet de l’enrichissement en oxygène,” These de doctorat, Orléans, 2014. Accessed: Jul. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/2014ORLE2058>
- [132] “Cantera.” Accessed: Mar. 05, 2023. [Online]. Available: <https://cantera.org/>
- [133] R. J. Kee, M. E. Coltrin, P. Glarborg, and H. Zhu, *Chemically Reacting Flow: Theory, Modeling, and Simulation*. John Wiley & Sons, 2017.
- [134] P. Zahedi and K. Yousefi, “Effects of pressure and carbon dioxide, hydrogen and nitrogen concentration on laminar burning velocities and NO formation of methane-air mixtures,” *J Mech Sci Technol*, vol. 28, no. 1, pp. 377–386, Jan. 2014, doi: 10.1007/s12206-013-0970-5.
- [135] “GRI-Mech 3.0.” Accessed: Mar. 23, 2022. [Online]. Available: <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>
- [136] G. Blanquart, P. Pepiot-Desjardins, and H. Pitsch, “Chemical mechanism for high temperature combustion of engine relevant fuels with emphasis on soot precursors,” *Combustion and Flame*, vol. 156, no. 3, pp. 588–607, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.combustflame.2008.12.007.
- [137] W. K. Metcalfe, S. M. Burke, S. S. Ahmed, and H. J. Curran, “A Hierarchical and Comparative Kinetic Modeling Study of C<sub>1</sub> – C<sub>2</sub> Hydrocarbon and Oxygenated Fuels,” *International Journal of Chemical Kinetics*, vol. 45, no. 10, pp. 638–675, 2013, doi: 10.1002/kin.20802.
- [138] “Chemical Mechanism: Combustion Research Group at UC San Diego.” Accessed: Jul. 26, 2022. [Online]. Available: <http://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion/mechanism.html>
- [139] Z. Bai, Z. Wang, G. Yu, Y. Yang, and H. Metghalchi, “Experimental Study of Laminar Burning Speed for Premixed Biomass/Air Flame,” *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 141, no. 2, p. 022206, Feb. 2019, doi: 10.1115/1.4041412.
- [140] H. O. B. Nonaka and F. M. Pereira, “Experimental and numerical study of CO<sub>2</sub> content effects on the laminar burning velocity of biogas,” *Fuel*, vol. 182, pp. 382–390, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.05.098.

- [141] T. Boushaki, Y. Dhué, L. Selle, B. Ferret, and T. Poinso, "Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: Experimental and numerical analysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 11, pp. 9412–9422, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.037.
- [142] C. M. Vagelopoulos and F. N. Egolfopoulos, "Direct experimental determination of laminar flame speeds," *Symposium (International) on Combustion*, vol. 27, no. 1, pp. 513–519, Jan. 1998, doi: 10.1016/S0082-0784(98)80441-4.
- [143] X. J. Gu, M. Z. Haq, M. Lawes, and R. Woolley, "Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane–air mixtures," *Combustion and Flame*, vol. 121, no. 1, pp. 41–58, Apr. 2000, doi: 10.1016/S0010-2180(99)00142-X.
- [144] N. Hinton and R. Stone, "Laminar burning velocity measurements of methane and carbon dioxide mixtures (biogas) over wide ranging temperatures and pressures," *Fuel*, vol. 116, pp. 743–750, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.08.069.
- [145] P. Glarborg and L. L. B. Bentzen, "Chemical Effects of a High CO<sub>2</sub> Concentration in Oxy-Fuel Combustion of Methane," *Energy Fuels*, vol. 22, no. 1, pp. 291–296, Jan. 2008, doi: 10.1021/ef7005854.
- [146] P. Glarborg, J. A. Miller, and R. J. Kee, "Kinetic modeling and sensitivity analysis of nitrogen oxide formation in well-stirred reactors," *Combustion and Flame*, vol. 65, no. 2, pp. 177–202, Aug. 1986, doi: 10.1016/0010-2180(86)90018-0.
- [147] V. Ratna Kishore, N. Duhan, M. R. Ravi, and A. Ray, "Measurement of adiabatic burning velocity in natural gas-like mixtures," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 33, no. 1, pp. 10–16, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2008.06.001.
- [148] W. Qin, F. N. Egolfopoulos, and T. T. Tsotsis, "Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 82, no. 1–3, pp. 157–172, Mar. 2001, doi: 10.1016/S1385-8947(00)00366-1.
- [149] R. Borghi, M. Destriau, and G. D. Soete, *Combustion and Flames*. Editions OPHRYS.
- [150] J.-Y. Ren, W. Qin, F. N. Egolfopoulos, and T. T. Tsotsis, "Strain-rate effects on hydrogen-enhanced lean premixed combustion," *Combustion and Flame*, vol. 124, no. 4, pp. 717–720, Mar. 2001, doi: 10.1016/S0010-2180(00)00205-4.

---

## Annexe A. Calculs des propriétés des flammes de biogaz

---

Cette annexe se concentre sur une étude numérique monodimensionnelle du comportement du mélange de biogaz, en mettant particulièrement en lumière le calcul des vitesses des flammes laminaires et les températures adiabatiques. L'objectif principal de cette étude est de mieux comprendre les enjeux liés à l'utilisation du biogaz comme combustible et d'analyser les propriétés intrinsèques des flammes de biogaz dans différentes conditions spécifiques.

Le biogaz est une source d'énergie renouvelable qui offre de nombreux avantages économiques et environnementaux, notamment en ce qui concerne la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, son utilisation en tant que combustible peut s'avérer complexe en raison de sa composition variable et de ses propriétés de combustion différentes de celles du gaz naturel. Afin de mieux comprendre le comportement du mélange de biogaz, nous avons effectué des simulations numériques préliminaires en utilisant le logiciel CANTERA. Nous avons testé plusieurs mécanismes de réaction chimique, notamment GRI-MECH3.0, Blanquart et al., San Diego et Aramco1.3, les résultats ont été comparés avec des données expérimentales de la littérature.

L'objectif de ces calculs est l'évaluation des priorités de la combustion de biogaz en s'intéressant à la vitesse de flamme laminaire, à la température adiabatique et aux émissions polluantes. Les simulations numériques ont permis d'obtenir des informations sur le comportement du mélange de biogaz dans différentes conditions, telles que des conditions initiales et des mécanismes de combustion différents.

### A.1. Méthode numérique

CANTERA est un code de calcul contenant une bibliothèque de données physico-chimiques largement utilisé pour la simulation de la combustion et des processus chimiques. Dans cette section, nous allons examiner le mode de fonctionnement de CANTERA et la description des différents mécanismes chimiques utilisés pour les simulations.

#### A.1.1. Mode de fonctionnement de CANTERA

CANTERA est un logiciel open source permettant de résoudre les équations de cinétique chimique et de transport pour la phase gazeuse, ainsi que de déterminer les propriétés thermodynamiques et les taux de réaction du mélange de gaz. Le code de calcul utilisé pour déterminer les vitesses de flamme et les températures adiabatiques a été développé à partir du code de flamme prémélangée existant dans CANTERA [132]. Ce code a été adapté pour inclure des mécanismes chimiques spécifiques au biogaz, ainsi que pour utiliser une méthode de maillage adaptatif pour optimiser la résolution des équations.

Pour calculer les vitesses de flamme et les températures adiabatiques, nous avons utilisé une approche de propagation libre de la flamme « freely propagating one-dimensional flame model », dans laquelle la flamme se propage sans limitation de vitesse de combustion. Cette approche est couramment utilisée pour les flammes de prémélange, et elle permet de calculer

les vitesses de combustion laminaire et les profils de température adiabatique pour une large gamme de richesse. Un modèle de flamme laminaire unidimensionnelle, prémélangée, a été utilisé pour déterminer la vitesse de propagation de flamme laminaire, la température adiabatique et les émissions de polluants. Les calculs ont été effectués en utilisant des conditions initiales de pression et de température de 1 bar et 300 K, et en utilisant des mécanismes chimiques spécifiques au biogaz pour une gamme richesse 0.4 – 1.6.

Un maillage efficace doit offrir un bon compromis entre le nombre de points utilisés pour le calcul et la précision de celui-ci. Dans le cadre de la simulation de flamme 1D, il est nécessaire, pour assurer une bonne précision de calcul, de résoudre à la fois de forts gradients, qui représentent les changements brusques des propriétés physiques comme la température, par exemple, et de fortes courbures, qui décrivent les variations locales de la concentration des espèces chimiques, telles qu'observées au niveau des points critiques où certaines espèces atteignent leur concentration maximale ou minimale. CANTERA propose 4 paramètres de maillage :

- RATIO permet de limiter le ratio des distances séparant deux couples de points successifs.
- SLOPE permet de contrôler le nombre de points dans les régions de fort gradient.
- CURVE permet de contrôler le nombre de points dans les régions de courbure importante.
- PRUNE permet de supprimer des points de calculs rendus inutiles.

En effet, dans certaines configurations, les zones de fort gradient ou de forte courbure peuvent se déplacer au cours du calcul. Ainsi, une zone de forte densité en points de maillage peut ne plus correspondre à une zone de fort gradient ou de forte courbure. La suppression de certains de ces points allégera le calcul sans nuire à sa précision. L'algorithme de maillage adaptatif utilisé pour affiner le maillage de notre étude a été développé à partir de l'algorithme existant dans CANTERA, Il a été ajusté pour être utilisé avec le code unidimensionnel de flamme laminaire, prémélangée que nous avons adapté. Le critère de raffinement de maillage a été défini en fonction de trois paramètres : RATIO, SLOPE et CURVE, avec des valeurs de 3, 0.06 et 0.12 respectivement. Le maillage initial a été défini sur l'intervalle [0. 0.01 m], avec des points internes déterminés automatiquement par le solveur. CANTERA est un logiciel basé sur la résolution des équations de conservation de masse, d'énergie et de quantité de mouvement. La configuration d'une flamme laminaire prémélangée à propagation libre est simulée en utilisant un ensemble commun d'équations régissant le domaine d'écoulement unidimensionnel. L'équation de continuité est écrite comme suit [133] :

$$\frac{\partial \rho u}{\partial z} + 2\rho V = 0 \quad (\text{A.1})$$

Où  $\rho$  est la masse volumique,  $u$  est la vitesse axiale,  $v$  est la vitesse radiale et  $V=v/r$  est la vitesse radiale normalisée. L'équation de conservation de la quantité de mouvement est exprimée par :

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial z} + \rho V^2 = -\Lambda + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (\text{A.2})$$

Où  $\Lambda$  est la valeur propre de pression (indépendante de  $z$ ) et  $\mu$  est la viscosité dynamique. L'équation décrivant la conservation de l'énergie est écrite comme suit [134] :

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \sum_i j_i c_{p,i} \frac{\partial T}{\partial z} - \sum_i h_i W_i \dot{\omega}_i \quad (\text{A.3})$$

Où  $c_p$  est la capacité calorifique à pression constante,  $T$  est la température et  $\lambda$  est la conductivité thermique. L'équation de conservation pour les fractions massiques  $Y_i$  des espèces est utilisée, lorsque les réactions chimiques doivent être considérées. Les fractions massiques  $Y_i$  sont définies par  $Y_i = \rho_i / \rho$ , où  $\rho_i$  représente la densité de chaque espèce  $i$ . La masse volumique du mélange  $\rho$  est liée à la masse volumique des différentes espèces par :

$$\rho = \sum_{i=1}^{N_s} \rho_i \quad (\text{A.4})$$

Avec  $N_s$  est le nombre des espèces. Cela conduit à une équation de conservation pour la fraction massique de chaque espèce dans le mélange :

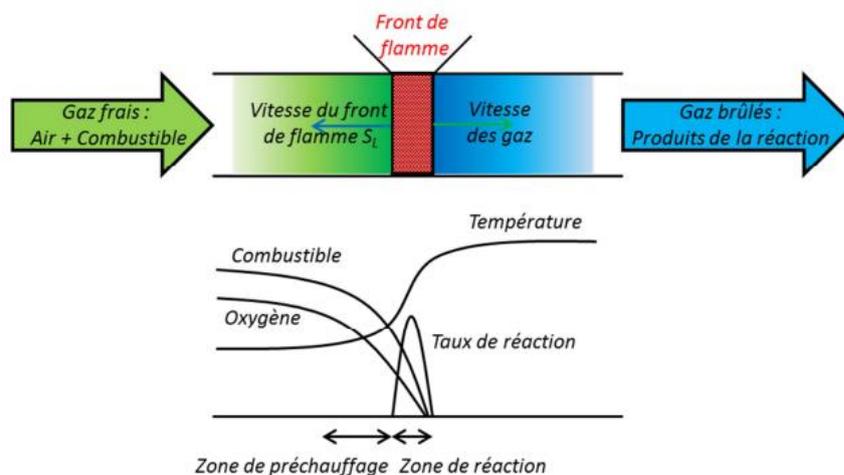
$$\rho u \frac{\partial Y_i}{\partial z} = -\frac{\partial J_i}{\partial z} + W_i \dot{\omega}_i \quad (\text{A.5})$$

Où  $Y_i$  est la fraction massique de l'espèce  $i$ ,  $J_i$  est le flux massique diffusif de l'espèce  $i$ .  $W_i$  est la masse moléculaire de l'espèce  $i$ , et  $\dot{\omega}_i$  est le taux de production molaire de l'espèce  $i$ .

### A.1.2. Propriétés intrinsèques d'un mélange

La combustion est un processus complexe qui implique des interactions entre la chimie, la thermodynamique et la dynamique des fluides. Pour comprendre et modéliser ce processus, il est essentiel de caractériser les propriétés clés de la combustion, telles que la vitesse de flamme laminaire et la température adiabatique.

La vitesse de flamme laminaire ( $S_L$ ), schématisée sur la Figure A.1, est définie comme la vitesse à laquelle les gaz frais se déplacent vers le front de flamme.



**Figure A.1.** Schéma de la structure d'une flamme laminaire.

$S_L$  est une propriété importante pour la modélisation des systèmes de combustion (moteurs à combustion interne, turbine à gaz, ...) et l'analyse de la combustion, notamment la stabilité et la structure des flammes prémélangées, le soufflage et l'extinction de la flamme, et la validation des mécanismes de réaction. Il est important de noter aussi qu'il s'agit d'une propriété dont la variation dépend beaucoup de l'hydrocarbure considéré, de la richesse, de la pression, de la température et de la dilution du mélange. Elle contient des informations significatives sur la réactivité, la diffusivité et l'exothermicité des combustibles, ce qui est crucial pour comprendre la cinétique des réactions de combustion et la formation des produits de combustion.

D'autre part, la température adiabatique est la température maximale atteinte par un mélange réactif adiabatique, sans échange de chaleur avec l'environnement. La température adiabatique est une propriété importante pour évaluer les performances des systèmes de combustion. Elle est également cruciale pour la durée de vie des moteurs à combustion interne et la performance des turbines à gaz. La température adiabatique peut influencer la formation de polluants atmosphériques et doit être maîtrisée pour minimiser les émissions polluantes.

En résumé, la compréhension des propriétés clés de la combustion, telles que la vitesse de flamme laminaire et la température adiabatique, est essentielle pour améliorer la compréhension de la cinétique des réactions de combustion, la formation des produits de combustion et l'optimisation des performances des systèmes de combustion. Ces propriétés sont également importantes pour garantir la sécurité des installations industrielles.

### A.1.3. Description des mécanismes chimiques utilisés

CANTERA est un logiciel de simulation de combustion basé sur la résolution des équations de conservation de masse, d'énergie et de quantité de mouvement. Pour effectuer ces simulations, il est nécessaire de définir un mécanisme chimique approprié, qui décrit les réactions chimiques impliquées dans la combustion des espèces chimiques présentes dans le système. Dans cette étude, nous avons examiné quatre mécanismes différents : GRI-MECH3.0 [135], Blanquart et al. [136], Aramco1.3 [137] et San Diego [138]. Ces mécanismes ont été utilisés et comparés aux résultats expérimentaux de la littérature. Celui GRI-MECH 3.0 comprend 325 réactions et 53 espèces, le mécanisme de réaction détaillé d'Aramco 1.3 contient 766 réactions et 124 espèces, et celui de San Diego comprend 57 réactions et 268 substances. Le mécanisme de réaction approprié, qui peut représenter les voies de réaction fondamentales utilisées par la réaction globale, est l'un des composants nécessaires pour la simulation. Le mécanisme qui présente la meilleure concordance avec les résultats expérimentaux de la littérature dans les calculs ci-dessous est la version 2.3 de Blanquart et al. [136]. Les détails de ces résultats seront discutés dans la section suivante. Ce mécanisme est composé de 1156 réactions chimiques élémentaires avec des expressions de coefficients de vitesse associés et des paramètres thermochimiques pour 193 espèces. Les gammes de températures pour le mécanisme sont de 300 à 3000 K. Ce modèle chimique est basé sur différents mécanismes

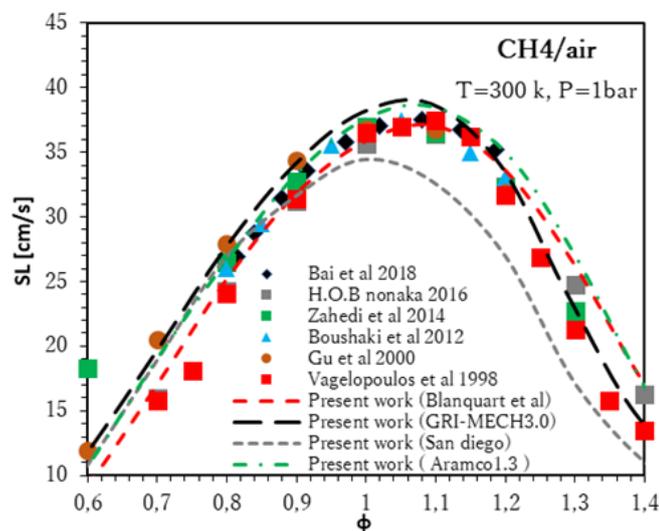
cinétiques, chacun validé pour une certaine gamme d'espèces. La chimie des espèces d'hydrocarbures dépend fortement de la chimie des molécules d'hydrocarbures plus petites mais faiblement des espèces plus grandes. Sur la base de cette observation, le mécanisme de Blanquart et al. a été construit en plusieurs étapes, chacune correspondant à une certaine taille et à un certain type d'hydrocarbure [136].

## A.2. Calculs des vitesses de flammes laminaires

La vitesse de flamme laminaire est une donnée importante pour la combustion des mélanges de gaz, car elle détermine la vitesse à laquelle la flamme se propage dans le mélange. Dans cette section, nous allons examiner le calcul des vitesses de flammes laminaires pour les mélanges de biogaz et d'air. Nous allons également discuter de la validation des mécanismes réactionnels chimiques utilisés pour calculer les vitesses de flammes laminaires, en comparant les résultats des calculs avec des données expérimentales pour différents mélanges de gaz.

### A.2.1. Validation des mécanismes réactionnels chimiques avec le mélange CH<sub>4</sub>-Air

En amont des calculs de la combustion de biogaz, nous avons testé les mécanismes chimiques GRI-MECH 3.0 [135], Blanquart et al. [136], Aramco1.3 [137] et San Diego [138], avec le mélange CH<sub>4</sub>-air, comme il est montré dans la Figure A.2. La vitesse de flamme laminaire est présentée en fonction de la richesse du mélange (0.6-1.4), à une pression de 1 bar et à une température de 300 K. Nous avons comparé les résultats numériques à des valeurs expérimentales de la littérature [134], [139]–[143].



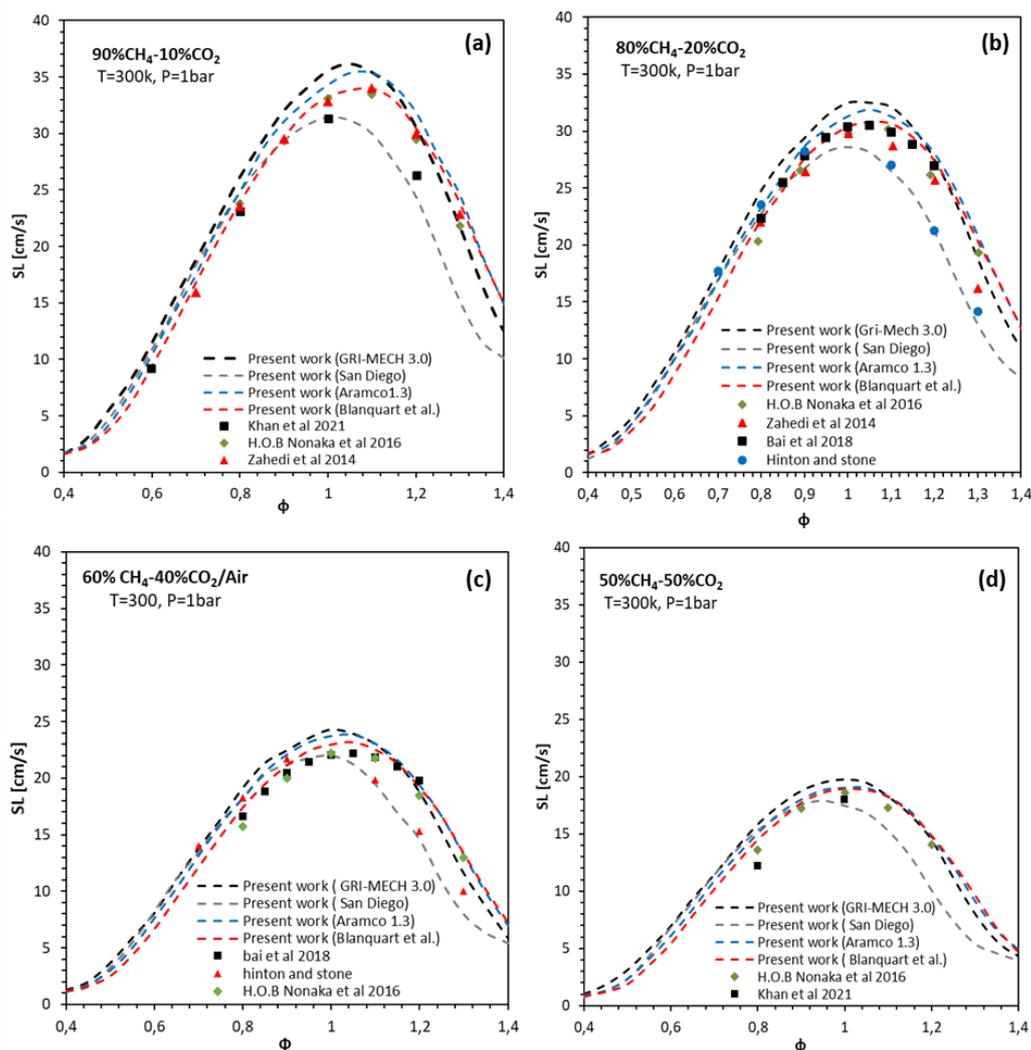
**Figure A.2.** Vitesse de flammes laminaires ( $S_L$ ) du mélange CH<sub>4</sub>-air en fonction de la richesse, à 1 bar et 300 K. Les résultats de calcul avec différents mécanismes chimiques sont comparés aux résultats expérimentaux de la littérature.

Les résultats numériques obtenus avec les différents mécanismes chimiques ont montré une légère variation, mais presque tous étaient en bon accord avec les données expérimentales.

A l'exception des résultats du mécanisme San Diego qui étaient légèrement en désaccord avec les résultats expérimentaux pour des richesses supérieures à 1. Cette divergence pourrait être due à des limitations dans le mécanisme chimique utilisé pour simuler la combustion dans le régime riche. Cependant, les autres mécanismes chimiques ont montré une bonne concordance avec les données expérimentales pour l'ensemble de la plage de richesse. En général, la vitesse de flamme laminaire augmentait avec l'augmentation de la richesse du mélange jusqu'aux alentours de  $\Phi=1$ , ensuite elle décroît dans le régime riche du mélange. Ceci correspond à la bonne proportion combustible/oxydant proche de la stœchiométrie, qui donne des températures de flamme relativement plus élevées par rapport aux régimes pauvres et riches du mélange.

### **A.2.2. Validation des mécanismes réactionnels chimiques avec le mélange Biogaz-Air**

Après avoir validé les calculs numériques actuels avec des mélanges CH<sub>4</sub>-air purs, cette étude présente l'effet de la fraction de CO<sub>2</sub> dans le mélange sur la vitesse de flamme laminaire. Les résultats numériques des vitesses de combustion laminaire en fonction de la richesse pour différents mélanges (90% CH<sub>4</sub>-10%CO<sub>2</sub>/air, 80% CH<sub>4</sub>-20%CO<sub>2</sub>/air, 60% CH<sub>4</sub>-40%CO<sub>2</sub>/air, 50% CH<sub>4</sub>-50%CO<sub>2</sub>/air) à une température de 300 K et une pression atmosphérique sont représentés dans la Figure III. 3. Les calculs sont comparés aux données expérimentales issues d'études antérieures (Bai et al., 2019 [139] ; Hinton & Stone, 2014 [144] ; Khan et al., 2021 [40]; Nonaka & Pereira, 2016 [140]; Zahedi & Yousefi, 2014 [134]) réalisées avec différentes techniques de mesure des vitesses de flamme laminaire.



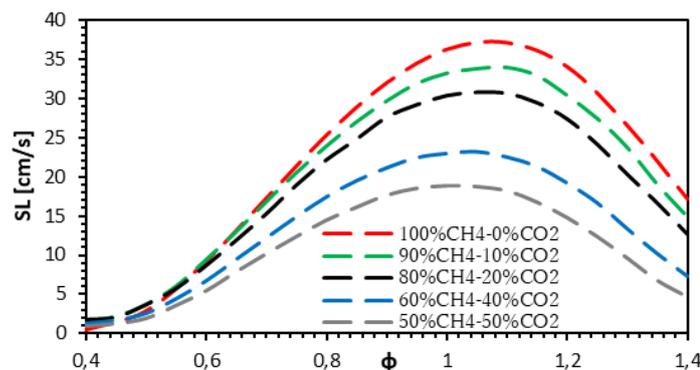
**Figure A.3.** Vitesses des flammes laminares ( $S_L$ ) en fonction de la richesse ( $\Phi$ ) à 1 bar et 300 K de : a) 90%  $\text{CH}_4$ -10%  $\text{CO}_2$ /air ; b) 80%  $\text{CH}_4$ -20%  $\text{CO}_2$ /air ; c) 60%  $\text{CH}_4$ -40%  $\text{CO}_2$ /air ; d) 50%  $\text{CH}_4$ -50%  $\text{CO}_2$ /air. Comparaison des calculs numériques avec différents mécanismes chimiques aux résultats expérimentaux de la littérature.

Nous observons une bonne concordance entre les différentes données de la littérature, indépendamment de la technique de mesure utilisée. Les mesures de Khan et al. [40] et Hinton et Stone [144] ont été réalisées à partir de flammes sphériques en propagation. Nonaka et Pereira [140] et Zahedi et Yousefi [134] ont utilisé la méthode du flux de chaleur dans des conditions atmosphériques. Les expériences de Bai et al. [139] ont été menées dans une enceinte de combustion cylindrique en utilisant un modèle thermodynamique multicoque pour calculer la vitesse de flamme laminaire. D'après la Figure A.3, on observe que les résultats numériques obtenus avec CANTERA en utilisant les différents mécanismes cités montrent une meilleure concordance avec les données de la littérature avec des richesses pauvres plutôt que riches. D'autre part, on constate que les prédictions du mécanisme de Blanquart et al. [136] présentent une meilleure concordance avec les mesures quelle que soit la richesse, en particulier au niveau de la stœchiométrie. Les résultats présentés dans la Figure A.3 montrent une diminution des

vitesse de combustion laminaire en fonction de la fraction de  $\text{CO}_2$  dans le combustible. Cette diminution est due au fait que le  $\text{CO}_2$  présent dans le mélange agit comme un diluant, ce qui réduit la concentration de  $\text{CH}_4$  dans le combustible, et donc le taux de réaction ainsi que la vitesse de combustion laminaire. De plus, l'augmentation de la chaleur spécifique du mélange entraîne une baisse de la température de flamme qui réduit également la vitesse de combustion laminaire [12].

### A.2.3. Effet de l'ajout de $\text{CO}_2$ dans le mélange de biogaz sur la vitesse de flamme laminaire

La Figure A.4 montre l'influence du  $\text{CO}_2$  sur la vitesse de flamme laminaire pour une température de gaz initiale de 300 K et une pression de 1 bar. Les résultats numériques ont été obtenus à l'aide du mécanisme de Blanquart et al. [136].



**Figure A.4.** Evolution de la vitesse de flamme laminaire ( $S_L$ ) en fonction de la richesse pour des mélanges de 100%  $\text{CH}_4$ -0%  $\text{CO}_2$  ; 90%  $\text{CH}_4$ -10%  $\text{CO}_2$ /air ; 80%  $\text{CH}_4$ -20%  $\text{CO}_2$ /air ; 60%  $\text{CH}_4$ -40%  $\text{CO}_2$ /air et 50%  $\text{CH}_4$ -50%  $\text{CO}_2$ /air à 1 bar et 298 K.

L'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz a un effet significatif sur la vitesse de flamme laminaire. Comme le montre la Figure A.4, une diminution de la vitesse de combustion laminaire est observée avec une augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  dans le mélange. La vitesse de flamme laminaire à  $\phi = 1$  varie de 36 à 19 cm/s lorsque la fraction de  $\text{CO}_2$  augmente jusqu'à 50 %, soit une réduction de 47 % de  $S_L$ .

Cet effet négatif de l'ajout de  $\text{CO}_2$  sur la vitesse de flamme laminaire est dû à des effets thermiques et chimiques : le  $\text{CO}_2$  a une influence sur la vitesse de propagation de la flamme par des effets thermiques (en diminuant la température de combustion) et cinétiques (en favorisant la dissociation du  $\text{CO}_2$ ).



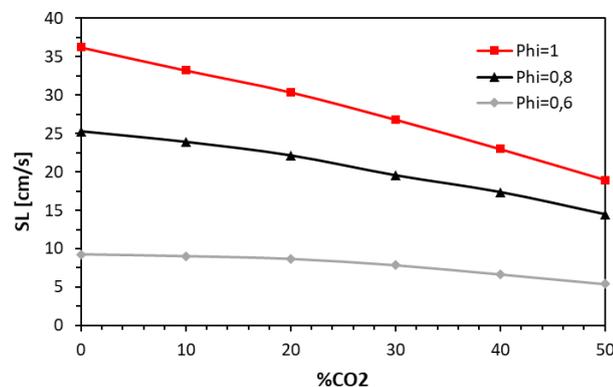
La dissociation thermique de  $\text{CO}_2$  n'est présente qu'à des températures élevées, généralement supérieures à 2000 K, et elle est fortement endothermique. Les réactions du  $\text{CO}_2$

avec les radicaux libres peuvent se produire à des températures plus basses, comme la réaction avec l'hydrogène atomique [145]:



Cette réaction est rapide même à des températures modérées (600-900 K). La décomposition du  $\text{CO}_2$  peut potentiellement inclure des interactions avec des radicaux hydrocarbonés. En raison de leur grande réactivité, les radicaux hydrocarbonés tels que CH et C peuvent entrer en jeu y compris pour rompre la triple liaison de l'azote moléculaire [146]. Ces effets chimiques complexes sont pris en compte dans les mécanismes cinétiques utilisés pour modéliser les processus de combustion, tels que le mécanisme de Blanquart et al. [136] qui a montré une meilleure concordance avec les mesures expérimentales de la vitesse de combustion laminaire pour différentes conditions de mélange.

La Figure III. 5 montre la variation de la vitesse de flamme laminaire en fonction de la teneur en  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz pour trois richesses différentes, 0.6 ; 0.8 et 1, en utilisant le mécanisme de Blanquart et al. [136]. La Figure A.5 met en évidence la décroissance linéaire de la vitesse de flamme laminaire en fonction de la fraction de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz pour les trois richesses. L'effet de la richesse est significatif puisque la vitesse de flamme décroît fortement au fur et à mesure que la richesse s'éloigne de la stœchiométrie. Il est très important de prendre en compte ces effets sur la flamme lors de la conception et l'optimisation des systèmes de combustion.

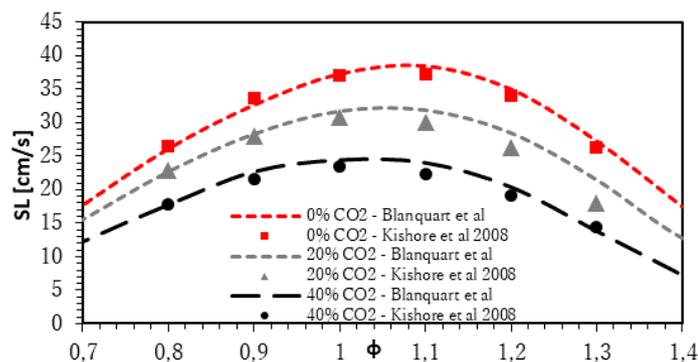


**Figure A.5.** Vitesse de flamme laminaire ( $S_L$ ) en fonction du pourcentage de  $\text{CO}_2$  dans le combustible pour les richesses 0.6 - 1.

#### A.2.4. Validation du mécanisme de Blanquart et al. avec différentes conditions initiales de combustion

Pour étudier plus en détail la variation de la vitesse de flamme laminaire en fonction de la richesse à différents teneurs en  $\text{CO}_2$  dans le mélange, un autre ensemble de données provenant de l'étude de Kishore et al. [147] a été collecté et comparé avec les résultats numériques obtenus avec le mécanisme Blanquart et al. [136]. Afin de mieux valider les résultats du mécanisme Blanquart et al. [136] et de les comparer avec l'étude de Kishore et al. [147], nous avons effectué des calculs supplémentaires à une température de 307 K,

correspondant aux conditions expérimentales de l'étude de Kishore et al. [147]. Ces nouveaux calculs ont été réalisés sous une pression de 1 bar, identique à celle de nos calculs précédents. La Figure A.6 présente les résultats de cette comparaison, montrant un bon accord entre les données expérimentales et les résultats numériques obtenus dans cette étude. On remarque que le mécanisme cinétique de Blanquart et al. [136] présente une excellente concordance avec les données de la littérature à ces différentes conditions, ce qui renforce sa pertinence pour étudier la combustion du biogaz.

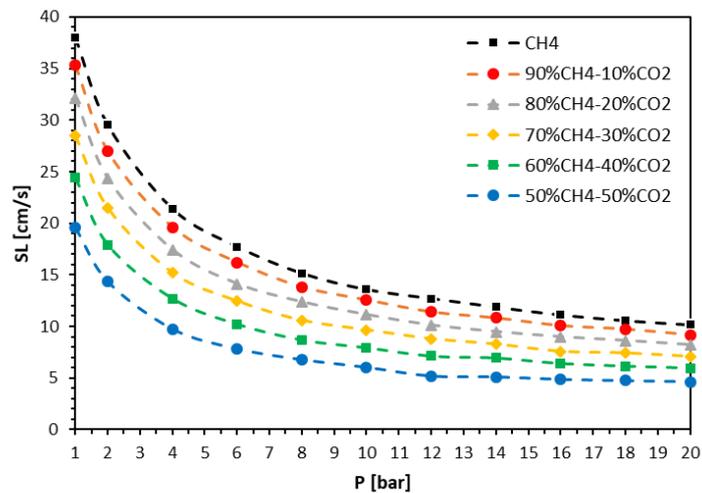


**Figure A.6.** Vitesse de flamme laminaire de biogaz à différentes compositions en fonction de la richesse à  $T = 307$  K et  $P = 1$  bar.

### A.2.5. Effet des conditions initiales sur la vitesse de flamme laminaire de biogaz

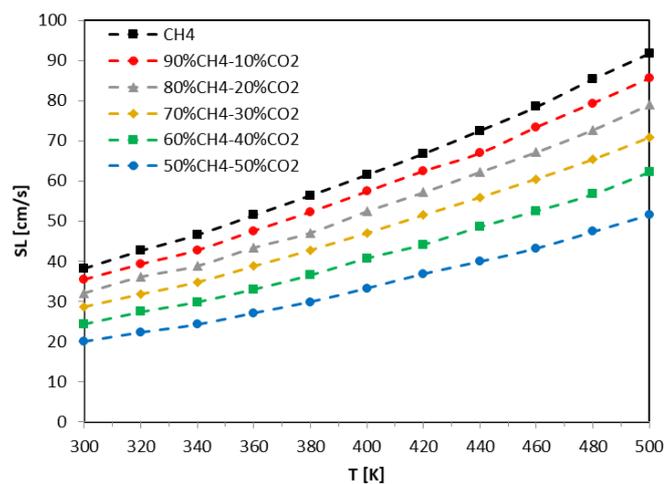
Les conditions initiales de combustion, telles que la pression et la température, jouent un rôle important dans la performance des systèmes de combustion. Dans certains systèmes industriels tels que les turbines à gaz et les moteurs à combustion interne, les gaz frais subissent une compression (augmentation de pression et température) avant la combustion. Dans cette section, nous allons étudier l'effet des conditions initiales (température et pression) sur la vitesse de flamme laminaire de biogaz, qui est une mesure clé de la combustion du biogaz.

La Figure III. 7 présente l'évolution de la vitesse de flamme laminaire en fonction de la pression initiale pour différents mélanges  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ , à  $T_{\text{init}} = 300$  K et richesse de 1. On peut remarquer que pour tous les mélanges  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ , la vitesse de flamme diminue avec l'augmentation de la pression initiale. Cela indique que l'augmentation de la densité du mélange réduit la vitesse de propagation de la flamme. Cela peut être expliqué par l'effet de la pression sur la diffusion de la chaleur. À des pressions plus élevées, la diffusion de la chaleur est plus lente, ce qui peut ralentir la propagation de la flamme. Ensuite, on peut observer que pour chaque pression initiale, la vitesse de flamme diminue avec l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz, comme vu précédemment (Figure A.6).



**Figure A.7.** Évolution de la vitesse de flamme laminaire en fonction de la pression initiale à une température initiale de 300 K et richesse égale à 1.

La Figure A.8 illustre l'évolution de la vitesse de flamme laminaire en fonction de la température initiale de combustion pour différentes compositions de biogaz à pression initiale égale à 1 bar et richesse égale à 1. Les résultats montrent que la vitesse de flamme augmente avec l'augmentation de la température initiale pour tous les cas de flamme. Cela peut s'expliquer par l'augmentation de la vitesse des réactions chimiques à des températures plus élevées. À des températures plus élevées, les molécules de combustible et d'oxygène ont une énergie cinétique plus élevée, ce qui augmente la probabilité de collision et de réaction entre eux. Par conséquent, une augmentation de la température initiale du mélange  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$  augmente la vitesse de réaction et la vitesse de propagation de la flamme. En outre, les résultats montrent que la vitesse de flamme diminue avec l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans le mélange  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$  pour tous les cas de flamme.



**Figure A.8.** Évolution de la vitesse de flamme laminaire en fonction de la température initiale à pression initiale de 1 bar et richesse égale à 1.

### A.2.6. Effets de la compression du mélange sur la vitesse de flamme laminaire de biogaz

Dans cette section, nous étudions l'impact de la compression initiale sur la vitesse de flamme laminaire, comme dans le cas d'un moteur à combustion interne ou une turbine à gaz. Les moteurs à essence compressent un mélange de gaz frais jusqu'à 11 à 13 bars, tandis que les moteurs diesel le compriment jusqu'à 25 à 30 bars. La température de fin de compression peut atteindre 400 °C à 500 °C dans la chambre de combustion.

Nous supposons que la compression est isentropique, et nous utilisons la loi de Laplace pour calculer les états initial et final avant et après la compression, où  $\gamma$  est le coefficient polytropique, égal à 1.4 (exemple d'un Gas parfait) pour l'air :

$$P \cdot V^\gamma = cst \quad (A.6)$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = cst \quad (A.7)$$

$$P^{1-\gamma} \cdot T^\gamma = cst \quad (A.8)$$

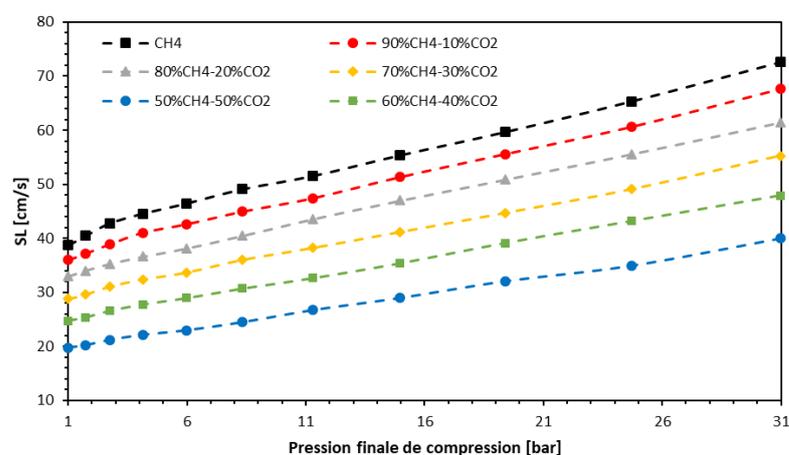
Dans notre cas,  $P_1=1$  bar et  $T_1=300$ K sont la pression et la température à l'état initial avant compression. Nous varions la température de compression ( $T_2$ ) entre 300K et 800K. Dans le Tableau A.1, on donne de la pression de compression ( $P_2$ ) par la relation.

$$P_2 = P_0 \cdot \left[ \frac{T_2}{T_1} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (A.9)$$

**Tableau A.1.** Températures et pressions finales de compression

Température finale de compression [K]	Pression finale de compression [bar]
300	1
350	1.71519603
400	2.73706794
450	4.13351394
500	5.97682615
550	8.34343759
600	11.3137085
650	14.9717428
700	19.4052279
750	24.7052942
800	30.9663888

La Figure A.9 présente la variation de la vitesse de flamme laminaire ( $S_L$ ) en fonction de la pression finale de compression pour différentes compositions du mélange biogaz. Les résultats montrent que la vitesse de flamme laminaire augmente avec la pression finale de compression pour toutes les compositions de mélange étudiées. Cette augmentation de la vitesse de flamme laminaire est due à l'augmentation de la température et de la densité du mélange gazeux lors de la compression, ce qui favorise une combustion plus rapide. Cette observation souligne l'importance de la composition et les conditions initiales du mélange dans la combustion du biogaz, car elle peut influencer la vitesse de combustion et la performance globale du système.

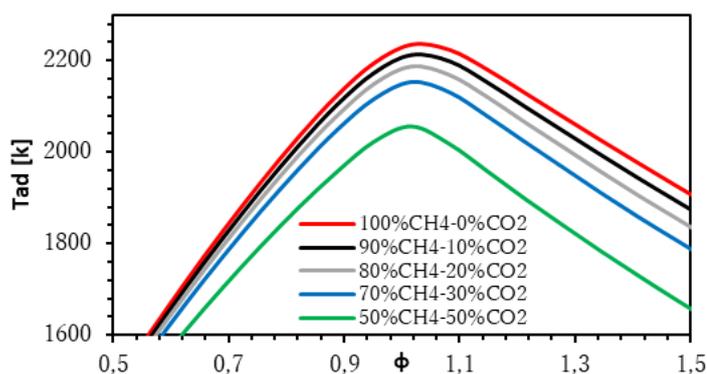


**Figure A.9.** Variation de la vitesse de flamme laminaire ( $S_L$ ) en fonction de la pression finale de compression.

### A.3. Calculs des températures adiabatiques

La température adiabatique est un des paramètres critiques dans la combustion, car elle fournit des informations importantes sur la quantité de chaleur produite et sur la température atteinte lors de la combustion. Ces informations sont essentielles pour la conception et l'optimisation de systèmes de combustion.

La Figure A.10 présente l'évolution de la température de flamme adiabatique ( $T_{ad}$ ) des mélanges  $CH_4-CO_2$ /air en fonction de la fraction de  $CO_2$  à  $T=300$  K et  $P=1$  bar.



**Figure A.10.** Température de flamme adiabatique en fonction de la richesse pour différentes compositions de biogaz, à 1 bar et 300 K.

Les résultats montrent que  $T_{ad}$  diminue avec l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans le biogaz. Par exemple,  $T_{ad}$  diminue de 2213 K à 2056 K en augmentant le teneur en  $\text{CO}_2$  dans le mélange de 10% à 50%. En effet, le  $\text{CO}_2$  augmente la capacité thermique du mélange, ce qui réduit la température à la fin de la combustion en plus de son effet de dilution [148]. Lorsque la fraction de  $\text{CO}_2$  est de 0.3, la température de flamme adiabatique est supérieure à 2100 K. La dissociation thermique du  $\text{CO}_2$  peut se produire à une température aussi élevée [145], ce qui réduit la vitesse de flamme laminaire avec l'addition de  $\text{CO}_2$  dans le mélange, comme expliqué précédemment. Cependant, il est important de noter que la réduction de la température de flamme adiabatique peut également réduire la formation de polluants générés à haute température tels que les  $\text{NO}_x$ , ce qui est bénéfique pour l'environnement.

#### A.4. Calculs des émissions polluantes

Dans cette section, nous allons explorer l'effet de l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz sur la formation de deux polluants courants : le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ). Ces résultats basés sur de nombreuses hypothèses permettent néanmoins d'estimer les tendances des émissions en fonction du pourcentage du  $\text{CO}_2$  et la richesse du mélange.

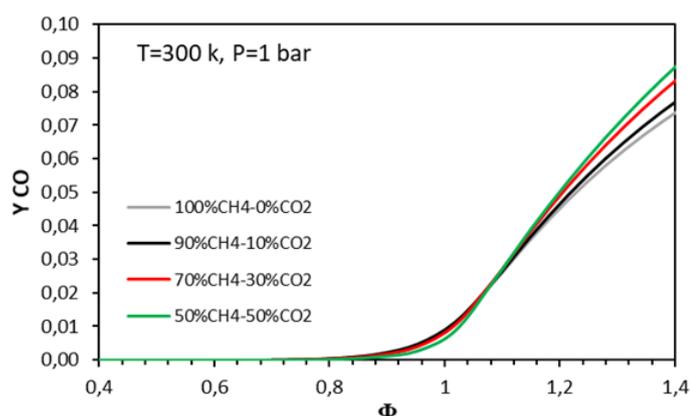
La Figure A.11 présente les fractions massiques de CO en fonction de la richesse pour différents cas de mélange  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ . Les résultats indiquent que la production de CO est fortement influencée par la richesse du mélange. En effet, pour des richesses comprises entre 0.4 et 0.9, la quantité de CO émise est négligeable en raison d'une présence d'oxygène assez élevée pour consommer tout le combustible et convertir le maximum de CO. Lorsque la richesse est supérieure à 0.9, on observe une augmentation de la production de CO à mesure que la richesse augmente. Cette augmentation est due à un excès de combustible présent dans la flamme, ce qui limite la quantité d'oxygène disponible pour la combustion.

Il convient de noter que le CO est généré par une combustion incomplète des composés carbonés présents dans les flammes. Les raisons de cette production peuvent être liées à des richesses locales ou globales trop élevées, à des temps de séjour dans la zone de combustion

trop courts ou encore aux équilibres thermodynamiques tels que la réaction (R.A.3) qui est favorisée par des températures élevées et des pressions basses [149].

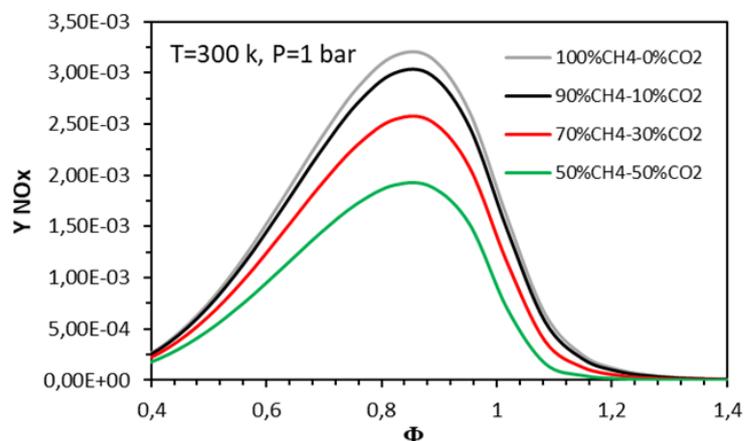


La réaction (R A.4) est également favorisée par des températures élevées, indépendamment de la pression. La production de CO est favorisée dans les régions ayant des concentrations élevées de combustible, des températures basses et des concentrations d'air relativement faibles, ce qui ralentit le taux de réaction pour l'oxydation du CO en CO<sub>2</sub> [103]. Par ailleurs, la Figure III. 11 montre l'impact de l'ajout de CO<sub>2</sub> au mélange sur la production de CO. Les résultats indiquent que la fraction de masse de CO augmente avec l'augmentation de CO<sub>2</sub> dans le mélange de biogaz. L'ajout de CO<sub>2</sub> favorise en effet des températures plus basses, ce qui encourage la formation de CO suite à l'extinction de la réaction d'oxydation. Cette formation accrue de CO entraîne des niveaux plus élevés de CO dans certaines régions de la flamme, comme indiqué dans la Figure A.11.



**Figure A.11.** Fraction massique de CO en fonction de la richesse pour différentes compositions de biogaz, à 1 bar et 300 K.

La Figure A.12 indique que la fraction massique de NO<sub>x</sub> varie sous forme d'une fonction Gaussienne, atteignant son maximum proche des conditions stœchiométriques et diminuant sur les côtés pauvre et riche du mélange réactif. Avec l'augmentation du pourcentage de CO<sub>2</sub>, la formation de NO<sub>x</sub> diminue fortement. En effet, le maximum de NO<sub>x</sub> à 0% du CO<sub>2</sub> est à  $3.25 \times 10^{-3}$ , alors que pour 50% du CO<sub>2</sub>, le taux de production de NO<sub>x</sub> est aux alentours de  $2.10^{-3}$ , soit une réduction d'environ 40%.



**Figure A.12.** Fraction massique de NO<sub>x</sub> en fonction de la richesse pour différentes compositions de biogaz, à 1 bar et 300 K.

Ce résultat n'est pas surprenant car il est bien connu que le CO<sub>2</sub> issus des gaz brûlés (ou EGR « Exhaust Gas Recirculation » : CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O) est réintroduit dans certaines installations industrielles (fours, turbines à gaz, moteurs) pour réduire les émissions de polluantes tels que les NO<sub>x</sub> pendant la combustion. Dans la combustion de combustibles ne contenant pas d'azote, l'oxyde nitrique (NO) est créé par trois processus chimiques différents qui utilisent l'azote de l'air. Ces trois mécanismes sont nommés thermiques ou Zeldovich, Prompt ou Fenimore, et N<sub>2</sub>O-intermédiaires [150]. Le mécanisme thermique ou Zeldovich est le mécanisme principal de formation de NO<sub>x</sub> dans les flammes riches en oxygène, soit le cas des fours industriels. Dans ce mécanisme, l'oxygène réagit avec l'azote de l'air pour former de l'oxyde nitrique (NO) à des températures élevées. Cependant, ce processus est limité par la disponibilité d'oxygène et de l'azote. Lorsque le mélange est pauvre en oxygène, le mécanisme Zeldovich devient moins important et le mécanisme prompt ou Fenimore prend le relais. Dans ce mécanisme, le carbone réagit avec l'azote de l'air pour former du cyanure d'hydrogène (HCN), qui est ensuite converti en NO par réaction avec l'oxygène. Le mécanisme N<sub>2</sub>O-intermédiaire se produit à des températures encore plus élevées et est moins important que les deux autres mécanismes. Dans ce mécanisme, l'oxyde nitrique (NO) réagit avec l'oxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) pour former du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). La production de NO<sub>x</sub> dépend fortement de la température de la flamme et augmente avec l'élévation de la température. Comme mentionné dans la section précédente, l'ajout de CO<sub>2</sub> au mélange et son effet de dilution entraînent une réduction de la température de la flamme (Figure A.10). Par conséquent, cette réduction de température réduit encore davantage les niveaux de NO<sub>x</sub> dans la flamme.

## A.5. Conclusion

La vitesse de flamme laminaire, la température adiabatique de combustion et les émissions polluantes (CO et NO<sub>x</sub>) ont été étudiées numériquement pour différentes conditions de mélange biogaz CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>. Des calculs numériques ont été réalisés avec quatre mécanismes de réaction détaillés disponibles dans la littérature : GRI-MECH 3.0 [135], Blanquart et al.

[136], Aramco1.3 [137] et San Diego [138]. Les calculs ont été comparés et validés par des données expérimentales de la littérature. À partir des résultats obtenus, les principales conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les résultats de calcul de la vitesse de combustion laminaire ont généralement montré un bon accord avec les données expérimentales de la littérature. Cependant, les valeurs du mécanisme de Blanquart et al. [136] ont révélé le meilleur accord dans toute la plage de la richesse et de composition de mélange.
- L'augmentation de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz diminue la vitesse de flamme laminaire et la température adiabatique de combustion  $\text{CH}_4\text{-CO}_2/\text{air}$  et cela est dû aux effets de dilution et de réaction du  $\text{CO}_2$ . Notons un léger décalage des valeurs maximales de  $S_L$  et  $T_{ad}$  en fonction de l'augmentation du  $\text{CO}_2$  dans le mélange.
- L'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz peut réduire de manière significative la production de  $\text{NO}_x$ , et cela est dû à la réduction de la température par l'ajout de  $\text{CO}_2$ . Par contre, on a observé une augmentation du  $\text{CO}$  avec l'ajout du  $\text{CO}_2$  à cause de la baisse de température et probablement de la fin de certaines réactions d'oxydation.

En conclusion, cette étude numérique a permis de connaître les tendances des effets de la composition du mélange sur la combustion du biogaz. Les résultats ont montré que l'ajout de  $\text{CO}_2$  dans le mélange peut avoir un effet négatif sur la vitesse de combustion, mais peut également contribuer à réduire le  $\text{NO}_x$  dans le gaz brûlés.

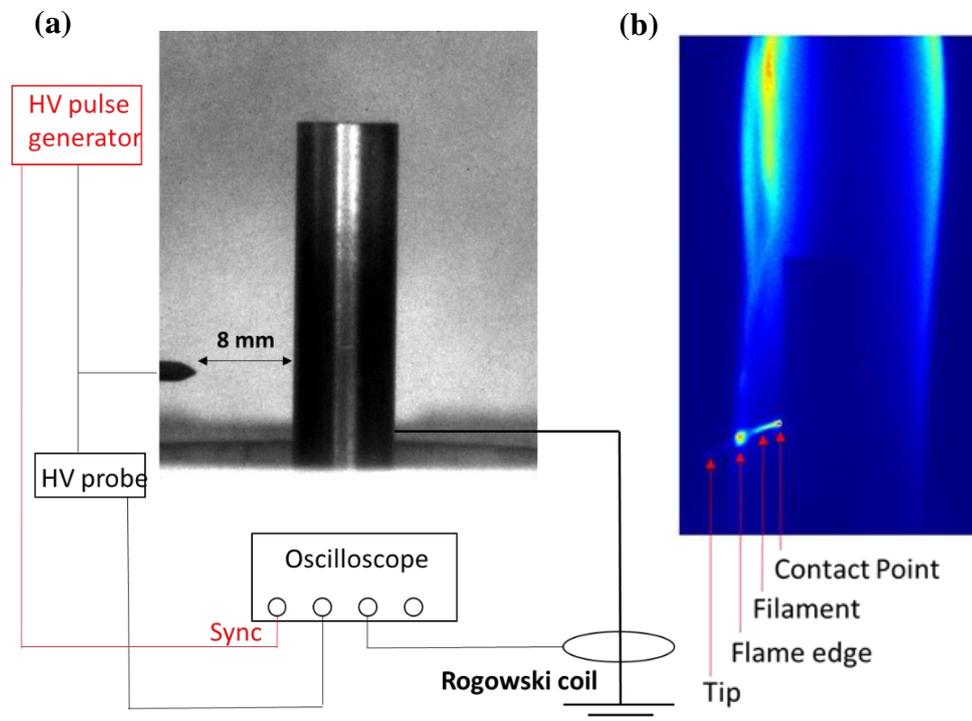
---

## Annexe B. Effet de la flamme sur le plasma

---

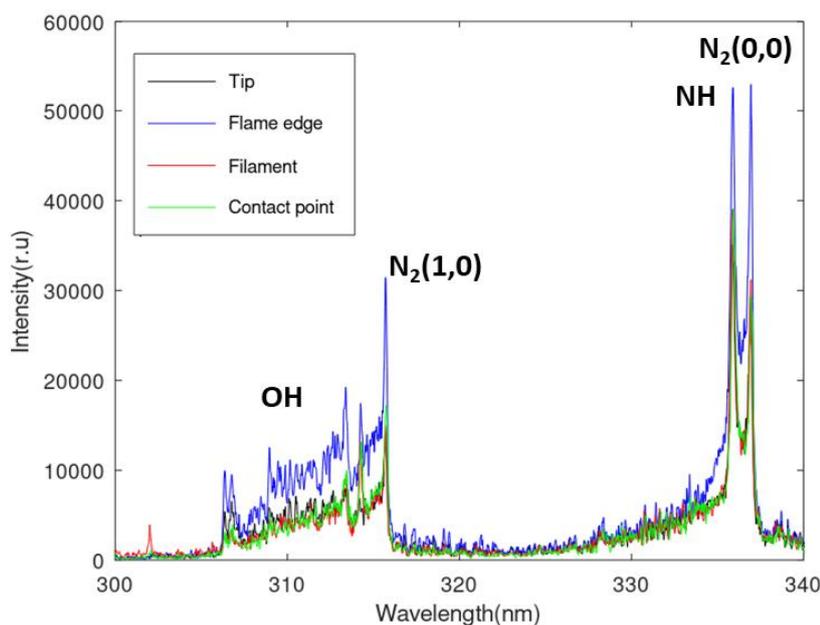
Bien que l'objectif central de cette thèse soit d'étudier l'effet du plasma impulsionnel microseconde sur les flammes, il est également important de noter que la flamme peut également influencer les décharges électriques du plasma. Dans le but d'approfondir notre compréhension de cette interaction complexe, une étude préliminaire a été entreprise. Cette étude s'est spécifiquement concentrée sur l'effet de la flamme de méthane, avec des débits de gaz fixés à 10 NL/min pour l'air et 1 NL/min pour le méthane avec une richesse globale de 1. Elle a été réalisée en générant un arc électrique à une fréquence de répétition des impulsions de 1 kHz et tension électrique appliquée de 10.5 kV. Il a été généré entre la tige centrale d'un brûleur à injection axiale de 8 mm de diamètre et une électrode HT pointe, avec un espacement de 8 mm entre eux. La Figure B.1 illustre la configuration des électrodes utilisée, ainsi que les positions d'acquisition de la spectroscopie. Quatre zones distinctes ont été étudiées au cours de la création du plasma entre les électrodes, notamment au niveau de la pointe de l'électrode HT (Tip), au premier point de contact entre le plasma et la flamme (Flame edge), au niveau le plasma au sein dans la flamme (Filament), et au point de contact avec la tige du brûleur (Contact point).

Les Figures B.2 à B.4 présentent les spectres d'émission du plasma pendant toute la durée de l'impulsion HT avec une largeur de fenêtre (GW) de 10  $\mu$ s, un délai de retard (GD) de 500 ns, et une moyenne de 300 accumulations.



**Figure B.1.** (a) Configuration des électrodes Pointe-Tige, (b) Image chimiluminescence OH\* d'une flamme de méthane et plasma avec PRF=1 kHz et IEV=10.5 kV montrant les positions d'acquisition pour la spectroscopie d'émission optique.

Figure B.2 présente les spectres d'émission de OH et de N<sub>2</sub>\* dans la plage de longueurs d'onde de 300 à 340 nm, observés à différentes positions à l'intérieur de l'arc du plasma, notamment au niveau de la pointe de l'électrode (Tip), à la limite de la flamme (Flame edge), dans le filament du plasma et au point de contact avec la tige du brûleur (Contact point). Il a été observé que les spectres d'émission d'OH et de N<sub>2</sub>\* présentent une intensité presque identique dans la plupart des positions, à l'exception de la région Flame edge, qui correspond au premier point d'interaction entre le plasma et la flamme. Dans cette région particulière, l'intensité des spectres d'émission d'OH et de N<sub>2</sub>\* augmentent significativement, indiquant que le plasma émet davantage d'OH et de N<sub>2</sub> dans cette zone précise. Cette observation suggère une interaction particulièrement intense et dynamique entre le plasma et la flamme à cet endroit spécifique de l'arc.

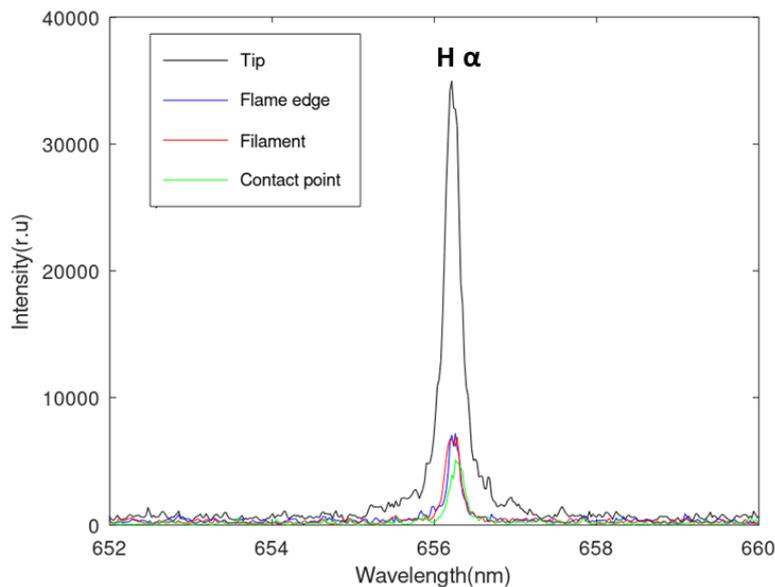


**Figure B.2.** Spectres d'émission de OH et de N<sub>2</sub>\* dans la plage de 300-340 nm à différentes zones dans l'arc du plasma (Tip, Flame edge, Filament et contact point)

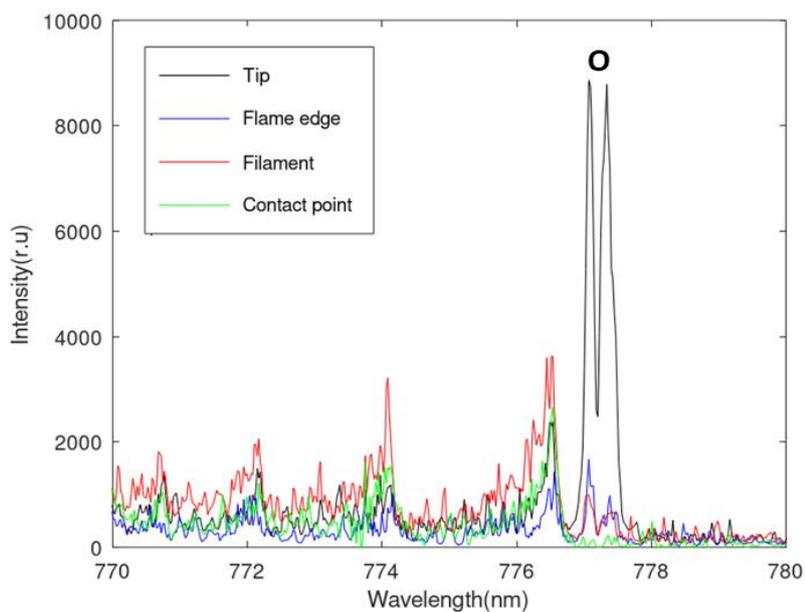
L'émission des raies de Balmer de l'hydrogène (H<sub>α</sub>) induite par le plasma a également été examinée dans toutes les zones mentionnées précédemment. La Figure B.3 présente les spectres d'émission de H<sub>α</sub> dans la plage de longueurs d'onde 652-660 nm. Il a été observé que l'émission de H<sub>α</sub> est plus élevée au niveau de « Tip », c'est-à-dire lorsque le plasma n'interagit pas encore avec la flamme. Autrement dit, la décharge plasma émet davantage de raies de Balmer de l'hydrogène avant de pénétrer dans la région de la flamme.

Nous avons également examiné l'émission des raies de l'oxygène atomique (O) induite par le plasma dans toutes les zones précédemment citées. Figure 4 présente les spectres d'émission de O dans la plage de longueurs d'onde 770-780 nm. Nos mesures ont révélé une observation similaire à celle de H<sub>α</sub> : l'émission d'oxygène est significativement plus élevée lorsque le plasma n'interagit pas encore avec la flamme, c'est-à-dire avant l'introduction du plasma dans

la zone de la flamme. Cette constatation suggère que l'interaction entre le plasma et la flamme influence également l'émission des raies caractéristiques de l'oxygène atomique, avec une émission d'oxygène plus marquée en l'absence d'interaction avec la flamme.

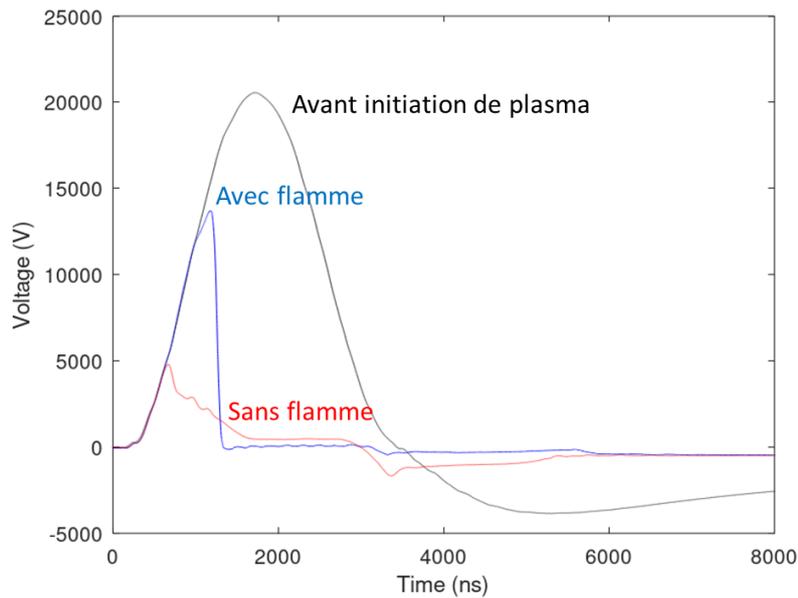


**Figure B.3.** Spectres d'émission de H $\alpha$  la plage de 652-660 nm à différentes zones dans l'arc du plasma (Tip, Flame edge, Filament et contact point)



**Figure B.4.** Spectres d'émission de O dans la plage de 770-780 nm à différentes zones dans l'arc du plasma (Tip, Flame edge, Filament et contact point)

La Figure 5 illustre l'évolution temporelle de l'impulsion HT avant et après l'initiation du plasma (PRF=1 kHz) au niveau des électrodes, dans les deux cas en présence de flamme ( $Q_{air}=1$  NL/min ;  $Q_{air}=10$  NL/min,  $\phi=1$ ) ainsi qu'en l'absence de flamme. Cette figure met en évidence une réduction significative de la tension de rupture en présence de flamme. Cela indique que l'initiation du plasma est facilitée en présence de la flamme, ce qui peut être dû à des conditions de gaz plus favorables. De plus, on peut observer une diminution plus lente de l'amplitude de la tension après la rupture, toujours en présence de flamme. Cela suggère que la flamme a un effet stabilisant sur le plasma, maintenant une amplitude de tension plus élevée après l'initiation.



**Figure B.5.** Évolution temporelle de l'impulsion HT avant et après l'initiation du plasma (PRF=1 kHz) au niveau des électrodes dans les deux cas en présence de flamme ( $Q_{air}=1$  NL/min ;  $Q_{air}=10$  NL/min,  $\phi=1$ ) et sans flamme.

---

## **Annexe C. Etude préliminaire sur l'effet du plasma impulsif microseconde sur la production des suies**

---

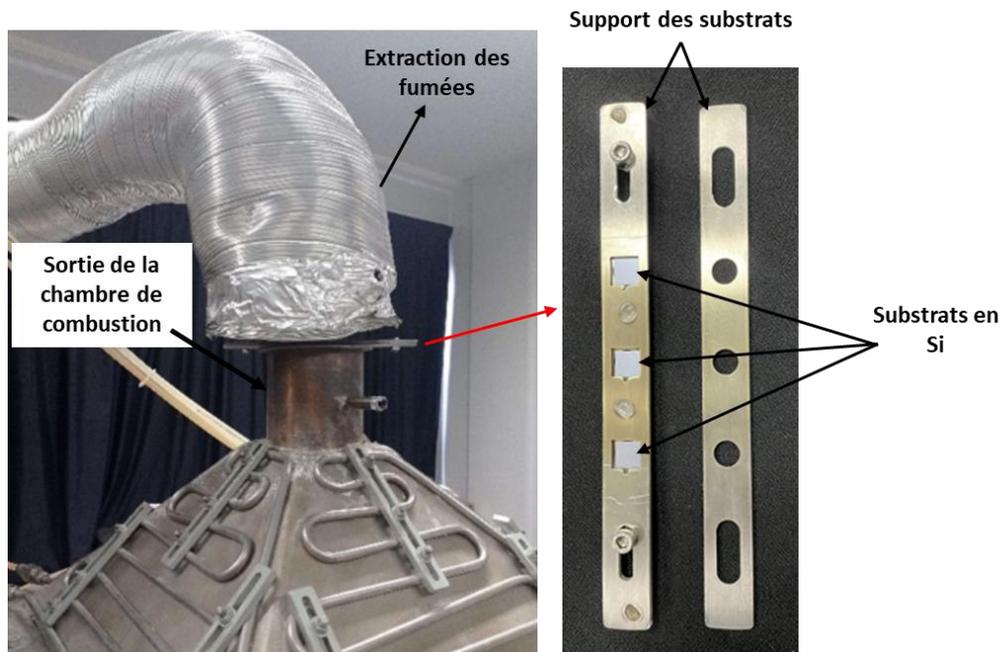
Cette annexe présente quelques résultats d'une étude préliminaire portant sur l'effet du plasma sur la production de suies. Ce travail fait partie du projet CAPRI (AP IR) et il a été réalisé en collaboration avec le laboratoire GREMAN. Le projet CAPRI « Combustion assistée par plasmas pour stabiliser les flammes et contrôler les émissions polluantes » supporté par la région Centre Val e Loire AP IR est mené par trois laboratoires (ICARE, GREMI et GREMAN) et un industriel (BRANDT FRANCE, R&D cuisson). Les expériences avec et sans plasma ont été réalisées à ICARE et l'analyse des résultats au GREMAN à Tours.

Dans cette étude, nous examinerons l'effet du plasma impulsif microseconde en utilisant une configuration d'arc glissant pour produire le plasma couplé avec un brûleur à injection axiale (avec une tige centrale de 8 mm) sur les émissions de particules fines.

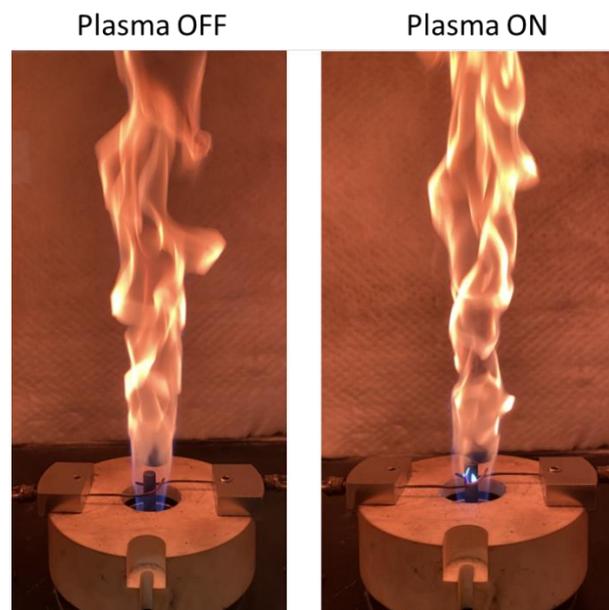
La récupération des suies s'effectue directement à la sortie de la chambre de combustion au moyen d'une barre métallique spécialement conçue à cet effet (Figure C.1). Cette barre est équipée de perforations, ce qui la rend adaptée à son rôle de support pour les substrats Si (substrats en silicium) que nous utilisons dans nos analyses. Les substrats Si sont connus pour leur composition en silicium pur ou monocristallin, offrant une surface plane et uniforme. Cette caractéristique les rend idéaux pour capturer les particules de suie émises lors de la combustion. Les particules de suie se déposent sur la surface lisse de ces substrats pour être analysés ultérieurement.

Ces substrats Si se prêtent à une variété de techniques d'analyse. Parmi les méthodes de caractérisation employées dans cette étude, on compte la microscopie optique (MO) et la spectroscopie Raman. Ces outils nous permettent d'analyser les particules de suie capturées, en examinant leur composition chimique, leur structure moléculaire et leur morphologie. Le positionnement précis de la barre métallique à la sortie de la chambre de combustion garantit une collecte optimale des échantillons de suie pour ces analyses, comme le montre la Figure C.1.

Dans le cadre de cette étude, une flamme jaune a été sélectionnée en raison de sa forte production de suies, facilitant ainsi l'analyse visant à déterminer si le plasma augmente ou non les suies produites. La flamme étudiée est une flamme du biogaz avec des débits de gaz spécifiques : un débit d'air ( $Q_{\text{air}}$ ) de 50 NL/min, un débit de méthane ( $Q_{\text{CH}_4}$ ) de 7 NL/min, et un débit de dioxyde de carbone ( $Q_{\text{CO}_2}$ ) de 2 NL/min, avec une richesse globale de 1.35. La Figure C.2 présente le cas de flamme étudié, avec et sans activation du plasma.



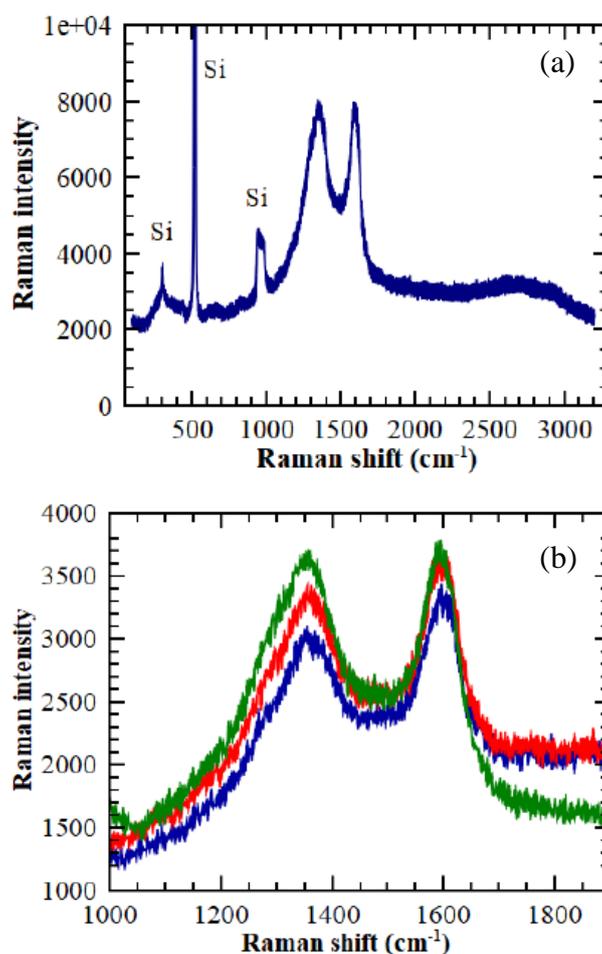
**Figure C.1.** Système de récupération de suies.



**Figure C.2.** Photographies de flamme du biogaz étudiée biogaz ( $Q_{\text{air}}=50$  NL/min ;  $Q_{\text{CH}_4}=7$  NL/min et  $Q_{\text{CO}_2}=2$  NL/min) avec une richesse globale  $\Phi$  de 1.35, dans les deux cas sans plasma (Plasma OFF) et avec plasma (Plasma ON) avec  $f=10$  kHz et  $U=14$  kV.

Pour effectuer les spectres Raman, le spectromètre Raman InVia Reflex de RENISHAW, associé au laser Stellar-RMN 514/50 de Modu-Laser, ainsi qu'un microscope Leica, ont été utilisés. Le logiciel utilisé pour piloter l'instrument est WIRE version 3.4.

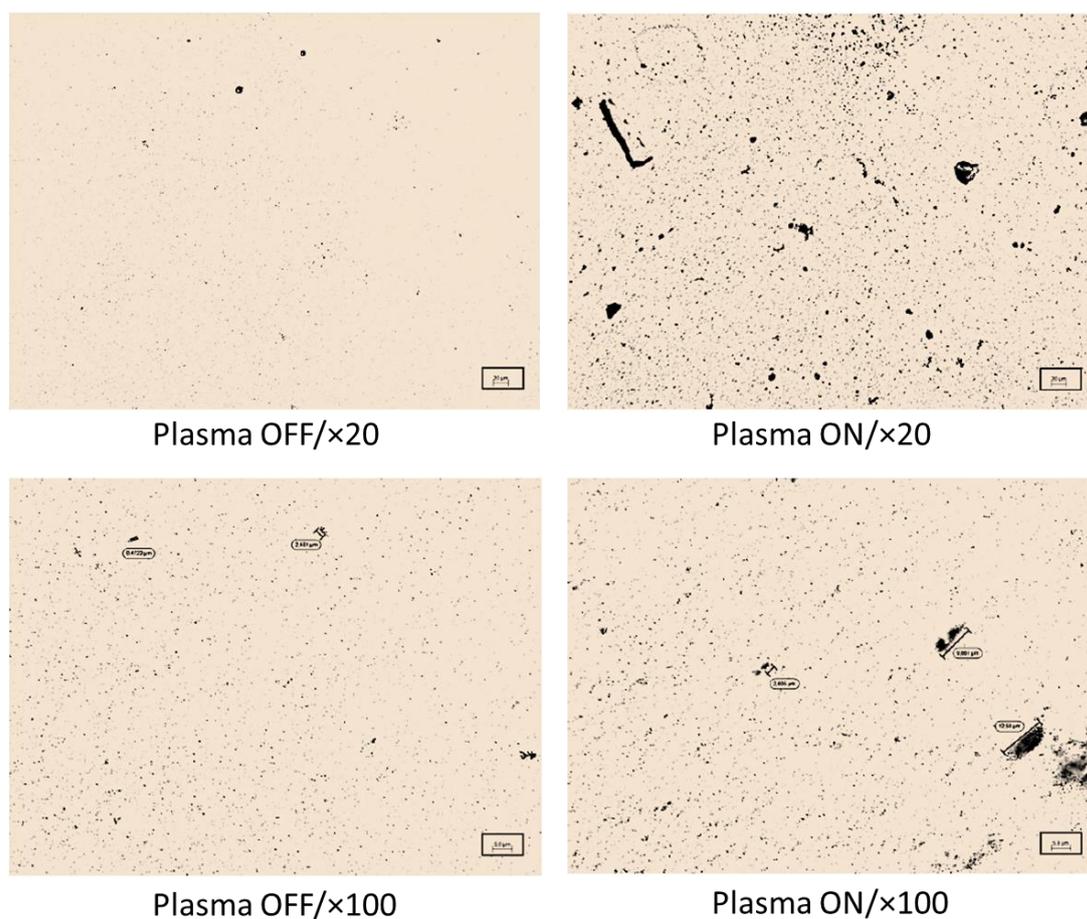
Les analyses ont été réalisées à plusieurs emplacements de l'échantillon (cartographie), pour le cas de flamme, afin de vérifier la composition sur l'ensemble de la surface du substrat. Les résultats de ces analyses sont présentés sur la Figure C.3. Les pics observés à 1300 et 1600  $\text{cm}^{-1}$  correspondent à la présence de carbone amorphe. Cette composition est constatée sur l'ensemble de la surface du substrat (Figure C.3.(b)), ce qui indique une uniformité dans la composition des suies collectées.



**Figure C.3.** (a) Spectres Raman réalisés sur l'échantillon sans plasma. (b), mapping réalisé à différents endroits de l'échantillon.

La Figure C.4 présente les images en microscopie optique (MO) des particules détectées dans les gaz brûlés d'une flamme du biogaz, où les débits de gaz étaient de  $Q_{\text{air}}=50$  NL/min,  $Q_{\text{CH}_4}=7$  NL/min et  $Q_{\text{CO}_2}=2$  NL/min, avec une richesse globale  $\Phi$  de 1.35, sans et avec plasma ( $f=10$  kHz et  $U=14$  kV). Les images MO ont été prises avec un grossissement de  $\times 20$  et de  $\times 100$ .

On peut clairement observer que l'introduction du plasma a un impact sur la quantité de formation d'amas de particules et sur leurs tailles. En comparant les images des deux cas sans et avec plasma (Plasma OFF et Plasma ON). D'après la Figure C.4, on observe clairement que la présence du plasma entraîne une augmentation à la fois de la quantité de particules agglomérées et de leur taille. Cette observation suggère que le plasma exerce une influence marquée sur la formation de suies dans la combustion.



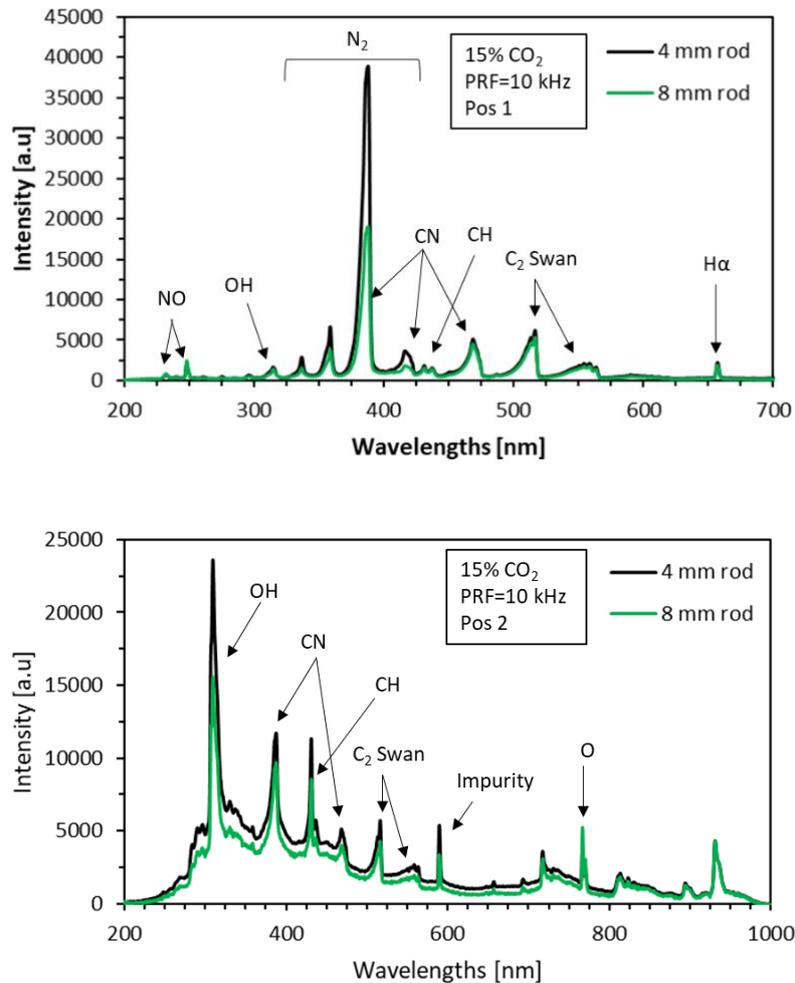
**Figure C.4.** Images MO des particules détectés dans les gaz brûlés d'une flamme du biogaz ( $Q_{\text{air}}=50$  NL/min ;  $Q_{\text{CH}_4}= 7$  NL/min et  $Q_{\text{CO}_2}= 2$  NL/min) avec une richesse globale  $\Phi$  de 1.35, dans les deux cas sans et avec activation du plasma ( $f=10$  kHz ;  $U= 14$  kV). Grossissement  $\times 20$  et  $\times 100$ .

---

## Annexe D. Effet de diamètre de la tige centrale de brûleur sur les spectres d'émission optiques

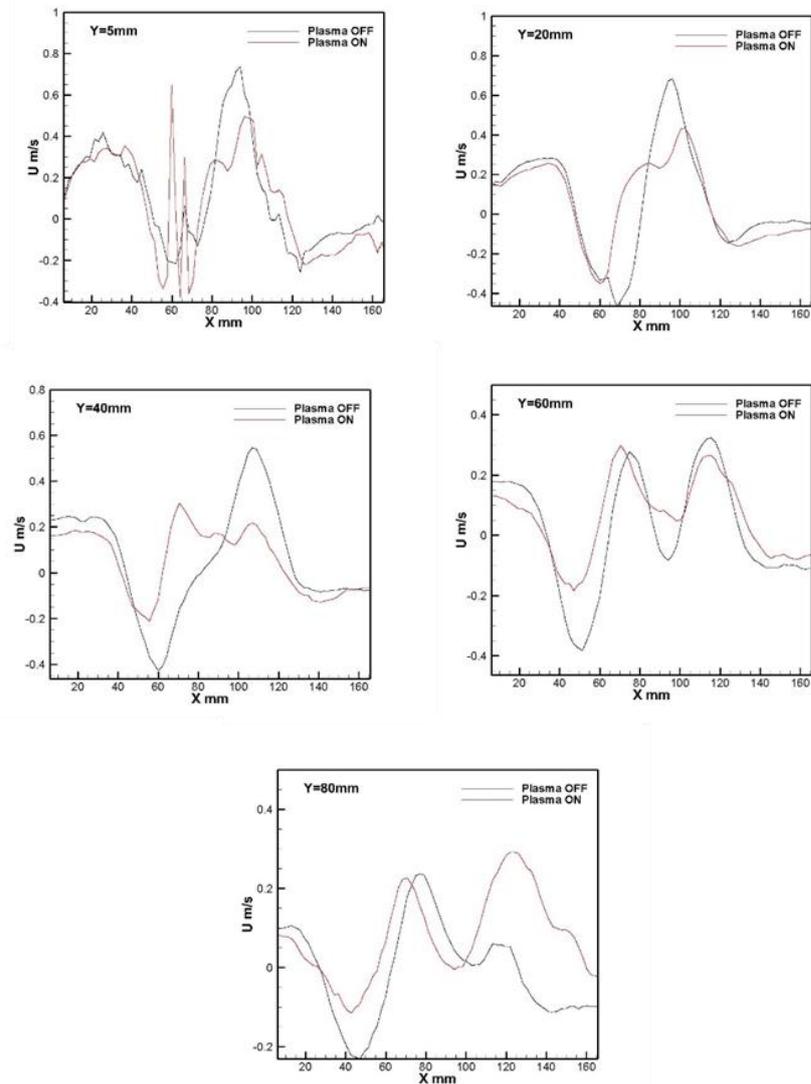
---

Dans la Figure D.1, l'intensité d'une flamme du biogaz contenant 15% de CO<sub>2</sub> dans le combustible et PRF=10 kHz est présentée pour deux positions de vision différentes, Pos 1 (Figure D.1. (a)) et Pos 2 (Figure D.1.(b)).



**Figure D.1.** OES d'une flamme du biogaz contenant 15% de CO<sub>2</sub> dans le combustible avec plasma à PRF=10 kHz, observée à deux positions de vision différentes : (a) Pos 1 et (b) Pos 2, en utilisant des diamètres de tige centrale différents (4 mm et 8 mm).

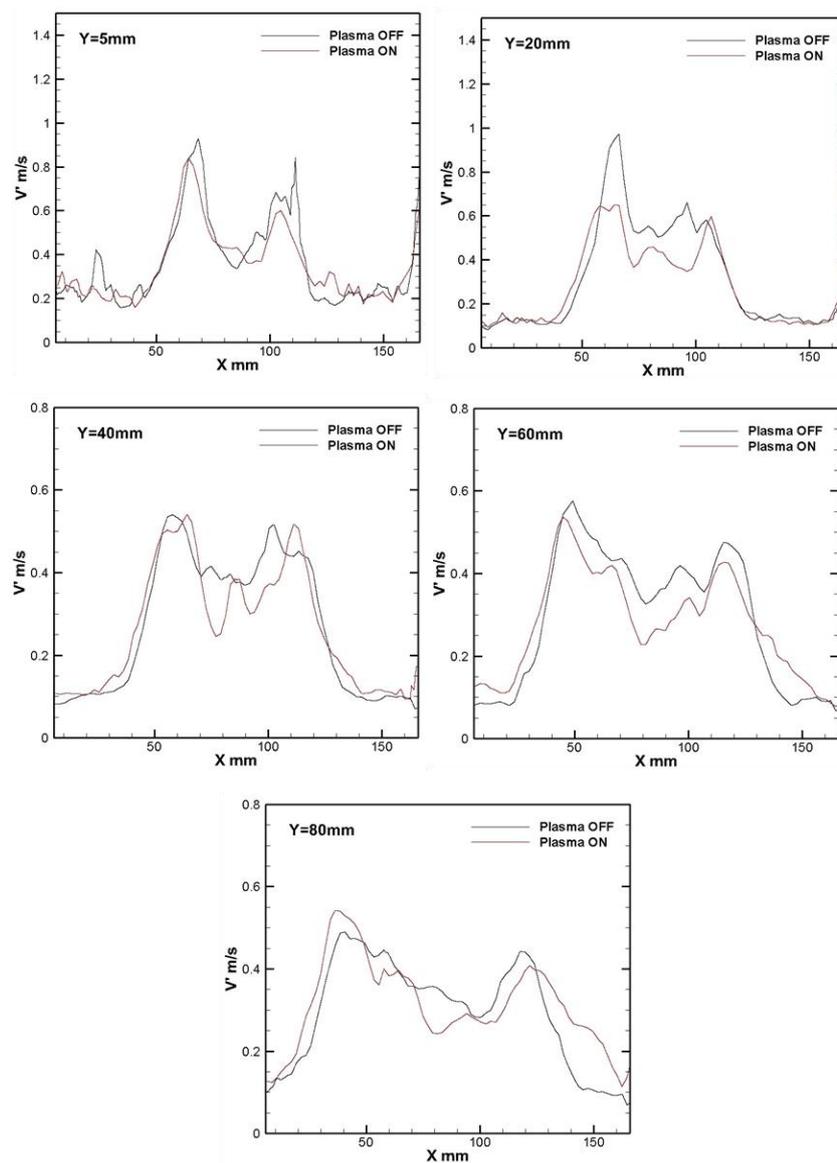
## Annexe E. Résultats PIV - Brûleur à injection axiale



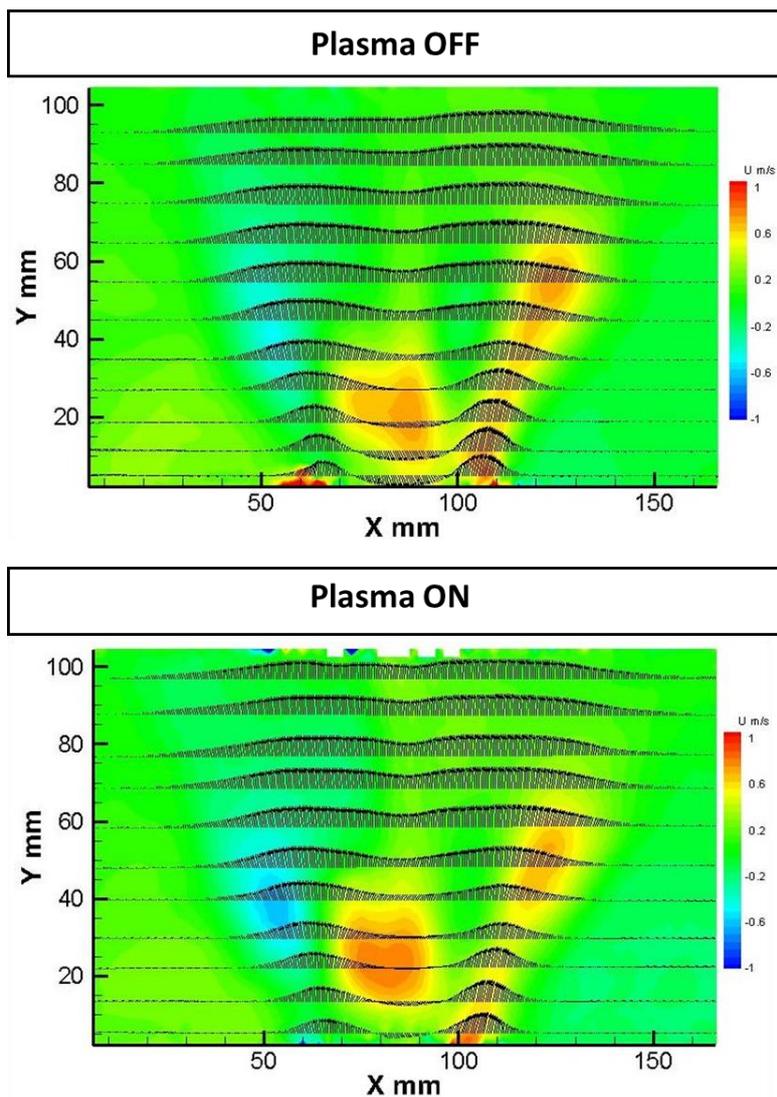
**Figure E.1.** Profils horizontaux de la vitesse radiale  $U$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $30\% \text{ CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de  $8$  mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $IEV=10.5$  kV.

Dans cette section, nous présentons quelques résultats PIV 2D supplémentaires, qui complètent les données sur l'effet du plasma sur les vitesses d'écoulement exposées dans le chapitre IV, section V.4. Il convient de noter que les résultats dans la section V.4 de ce manuscrit ont été obtenus en utilisant une tige centrale de  $8$  mm, tandis que les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus en utilisant une tige centrale de  $4$  mm dans le brûleur à injection axiale.

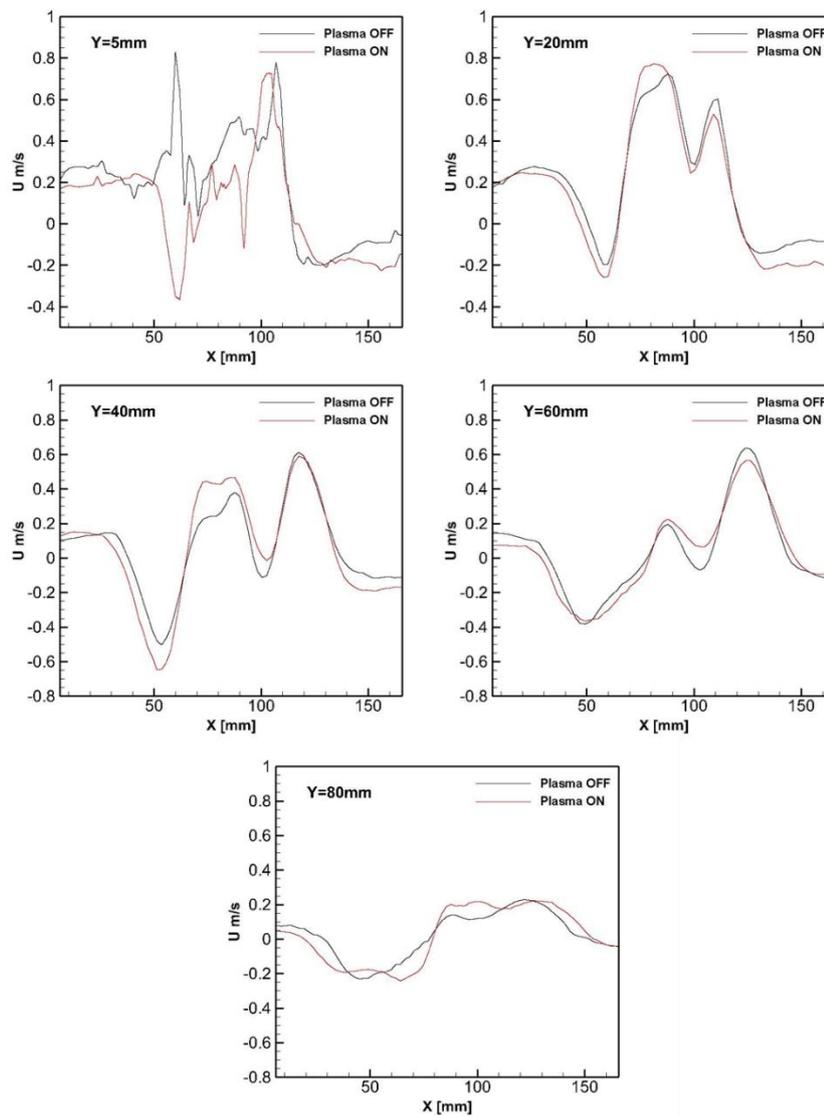
La Figure E.2 illustre les profils de fluctuation (RMS) de la vitesse longitudinale  $V'$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le même cas de flamme avec  $30\% \text{ CO}_2$  dans le combustible, sans et avec plasma. Il est important de noter que, dans l'ensemble, l'activation du plasma n'a pas eu un effet significatif sur les fluctuations de vitesse pour ce cas de flamme.



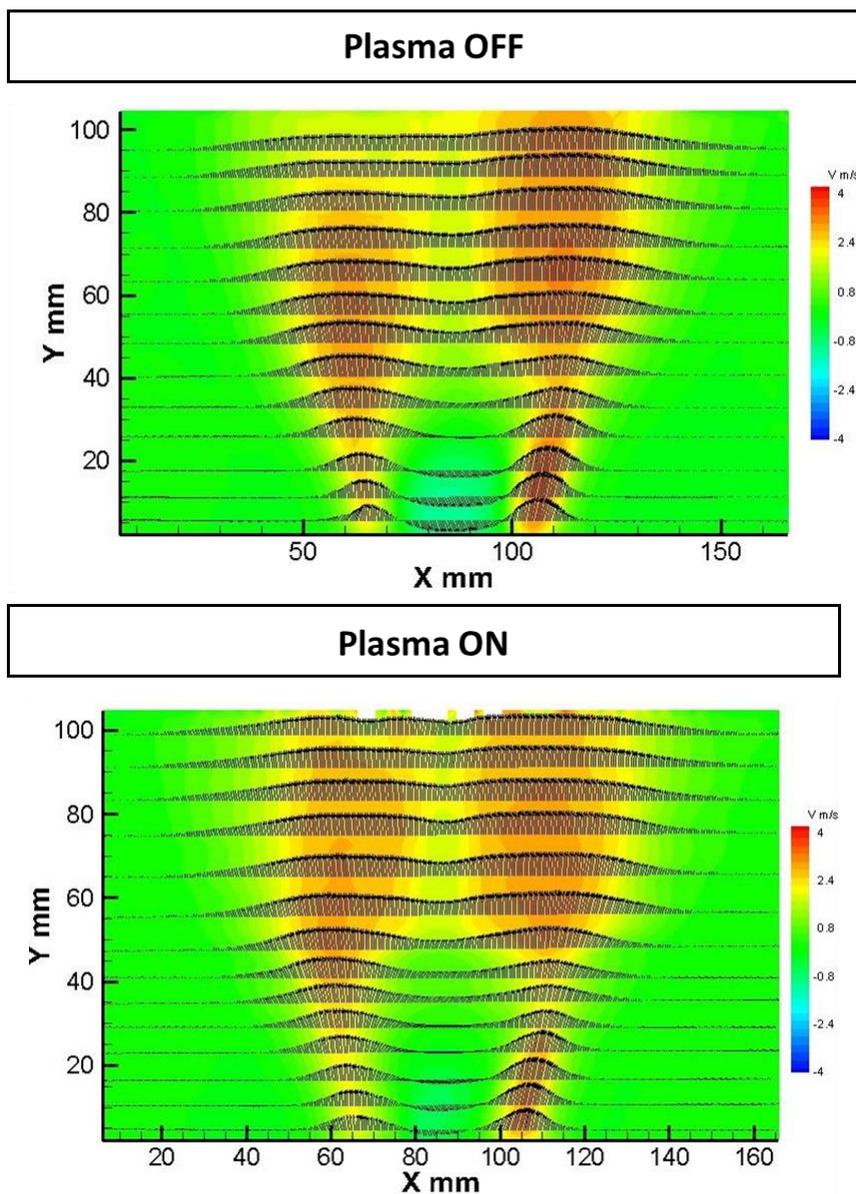
**Figure E.2.** Profils horizontaux de fluctuation (RMS) de vitesse longitudinale  $V'$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas 30%  $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 8 mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}= 10.5$  kV.



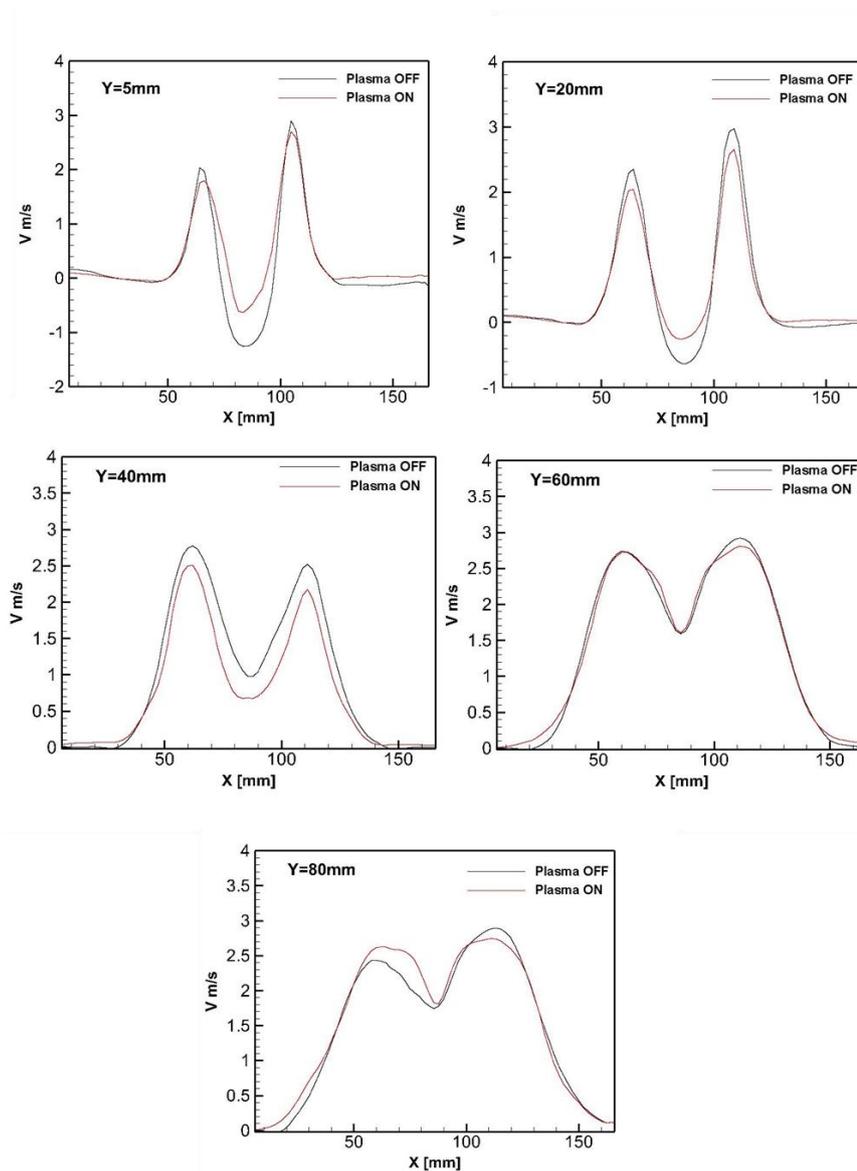
**Figure E.3.** Champs moyens de vitesse radiale  $U$  avec le champ des vecteurs issus des deux vitesses  $U$  et  $V$  pour le cas 0%  $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 4 mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.



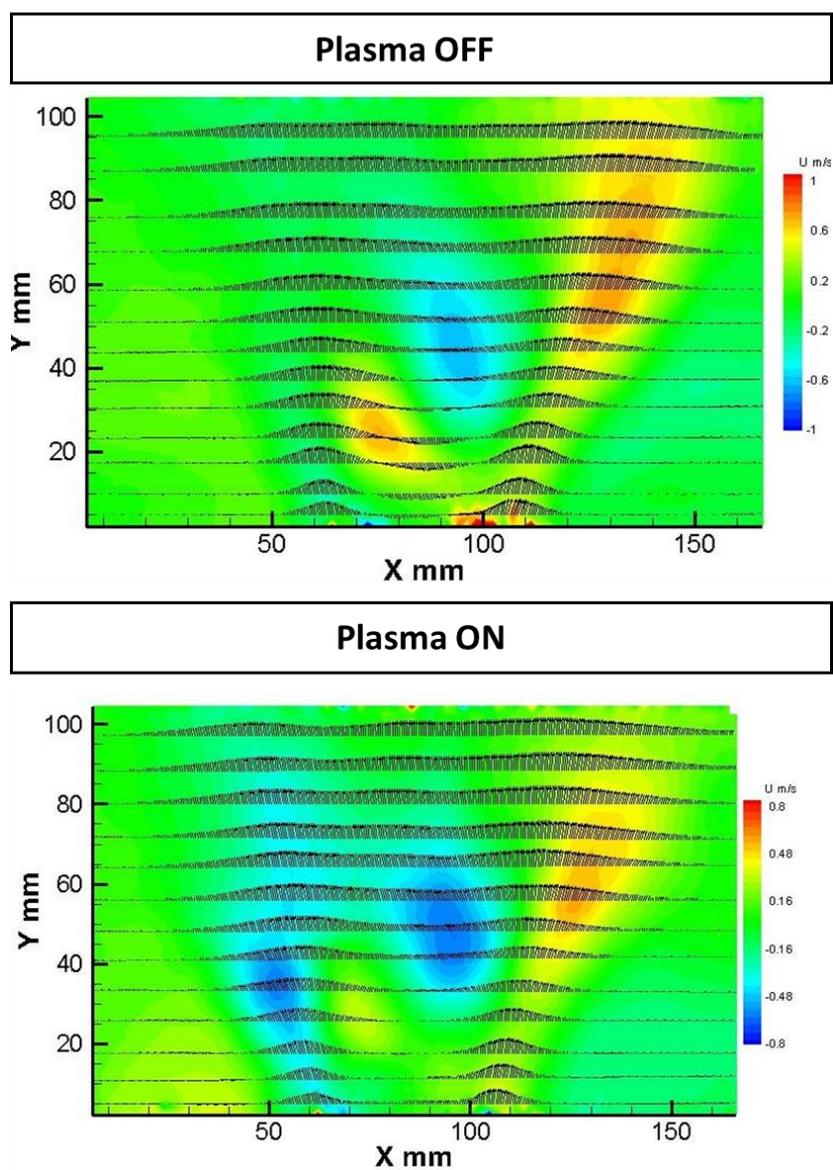
**Figure E.4.** Profils horizontaux de vitesse radiale  $U$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $0\%$   $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de  $4$  mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.



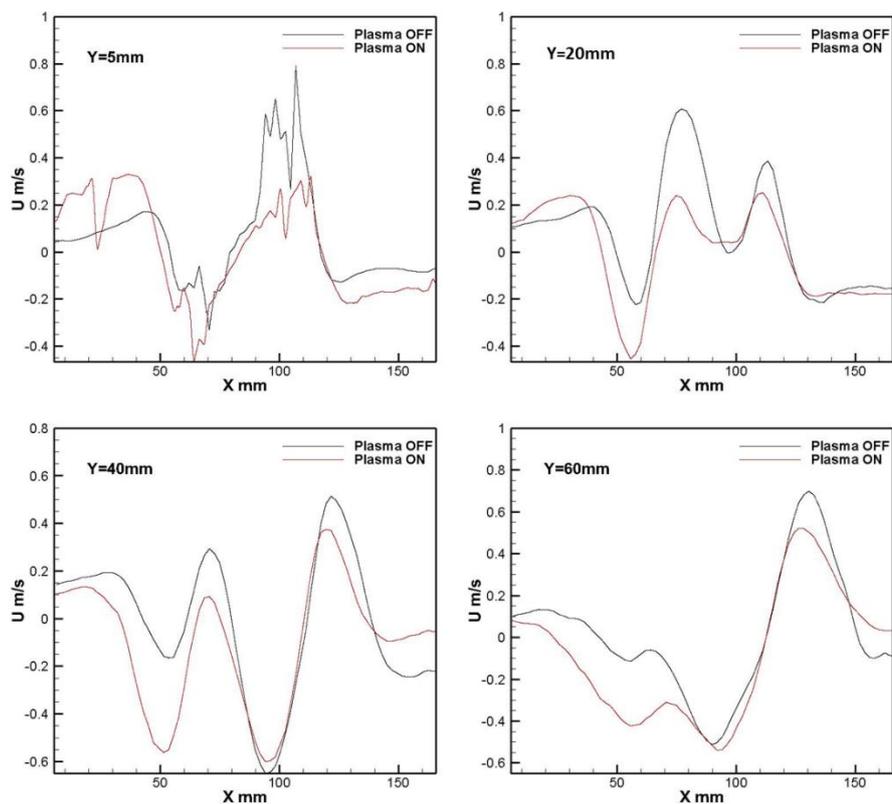
**Figure E.5.** Champs moyens de vitesse longitudinale  $V$  avec le champ des vecteurs vitesse pour le cas 0%  $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 4 mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.



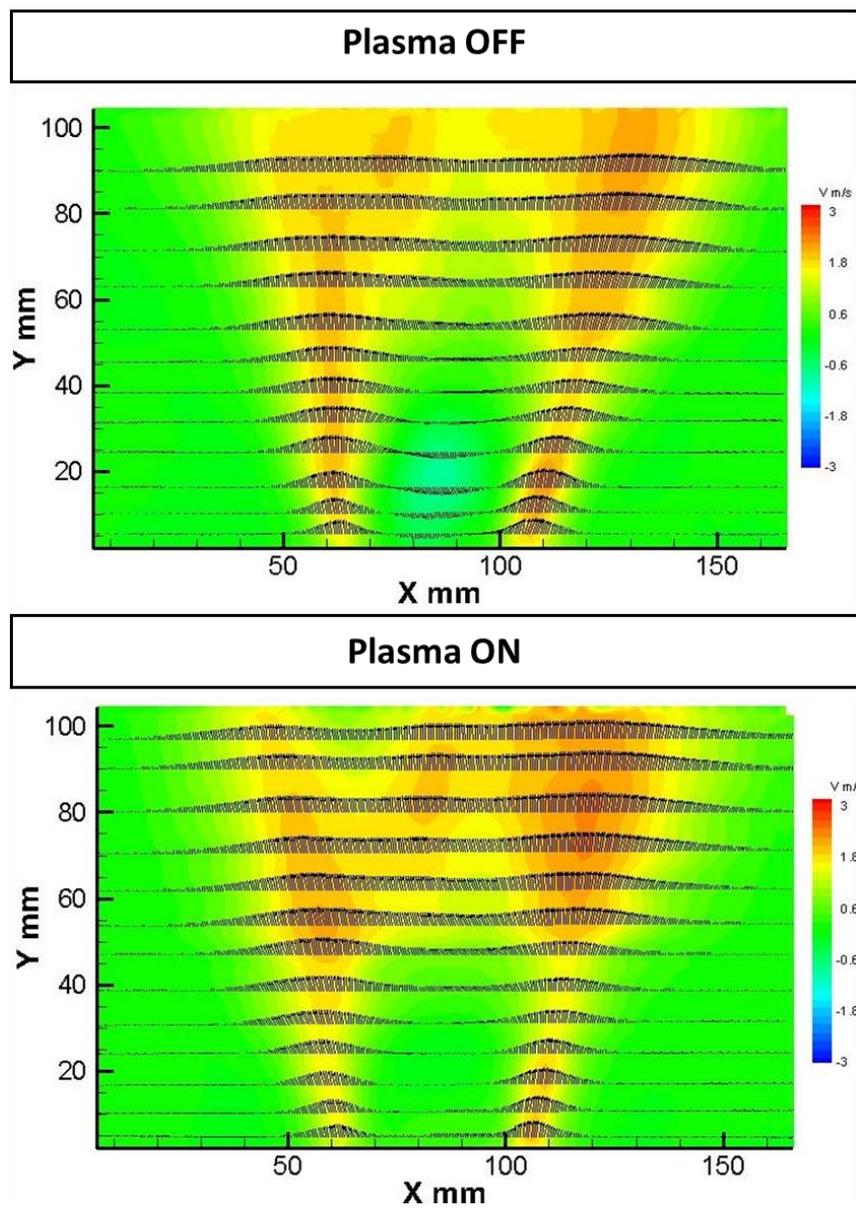
**Figure E.6.** Profils horizontaux de vitesse longitudinale  $V$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $0\%$   $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de  $4$  mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.



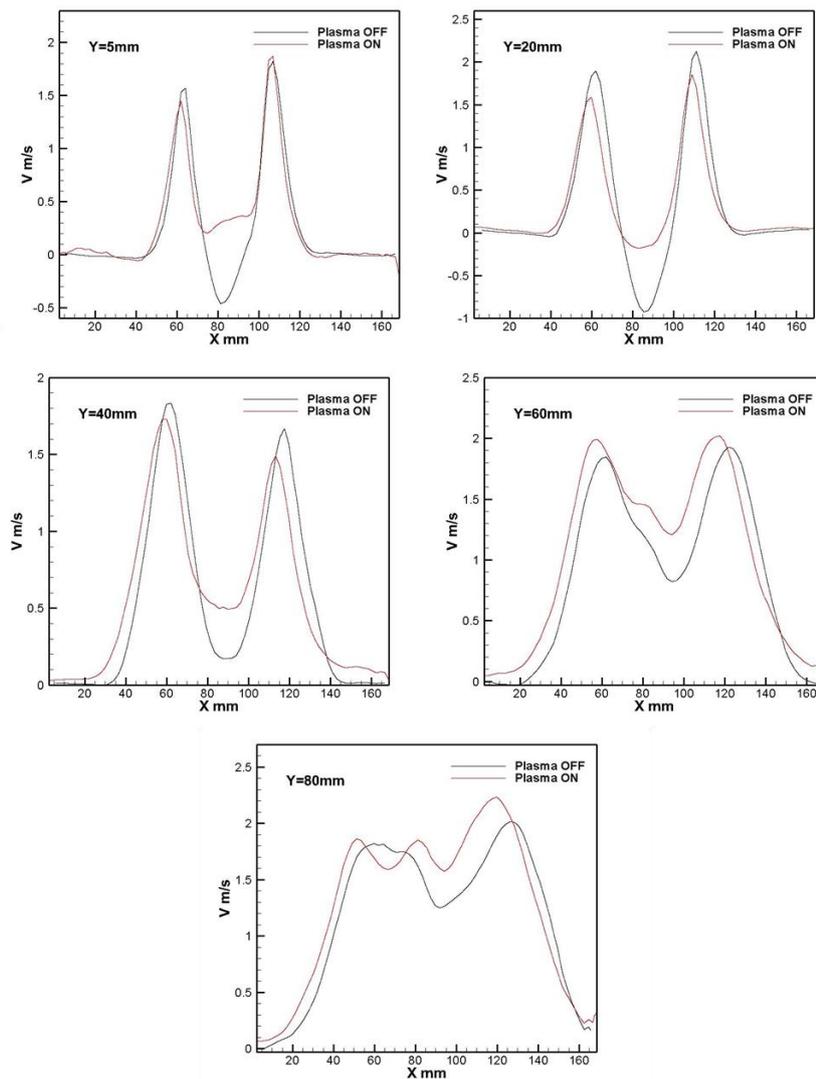
**Figure E.7.** Champs moyens de vitesse radiale  $U$  avec le champ des vecteurs vitesses pour le cas 30%  $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 4 mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.



**Figure E.8.** Profils horizontaux de vitesse radiale  $U$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40$  et  $60$  mm) pour le cas  $30\%$   $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de  $4$  mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}=10.5$  kV.



**Figure E.9.** Champs moyens de vitesse longitudinale  $V$  avec le champ des vitesses pour le cas 30%  $\text{CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de 4 mm et  $\text{Sn}=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $\text{IEV}= 10.5$  kV.



**Figure E.10.** Profils horizontaux de vitesse longitudinale  $V$  à différentes hauteurs ( $Y=5, 20, 40, 60$  et  $80$  mm) pour le cas  $30\% \text{ CO}_2$  dans le mélange,  $\Phi=0.7$ , Tige centrale de  $4$  mm et  $Sn=0.5$ , sans (Plasma OFF) et avec activation du plasma (Plasma ON) à  $f=10$  kHz et  $IEV=10.5$  kV



**Ahlem GHABI**

## **ÉTUDE DES FLAMMES NON-PREMELANGÉES DE BIOGAZ ASSISTÉES PAR PLASMA**

**Résumé :** Le biogaz, essentiellement composé de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), est considéré comme une ressource prometteuse dans le domaine des énergies renouvelables grâce à sa production issue de la décomposition des matières organiques (biomasse, déchets...). Cependant, la présence de taux élevés de  $\text{CO}_2$  dans le mélange de biogaz peut entraîner lors de sa combustion des instabilités menant parfois à l'extinction de la flamme, ce qui engendre des risques pour les systèmes énergétiques et limite l'efficacité énergétique globale. L'utilisation de décharges plasmas pour l'assistance et le contrôle de la combustion produit des effets bénéfiques sur la stabilité de la flamme et sur les caractéristiques de combustion. Cette étude a pour but d'évaluer l'impact d'un plasma impulsif pour améliorer la stabilité et contrôler les émissions polluantes de la combustion de biogaz. Des investigations sont menées pour caractériser les interactions entre les décharges impulsives et les flammes, en fonction de paramètres liés à la combustion (taux de  $\text{CO}_2$  dans le combustible, richesse globale, nombre de swirl) et d'autres liés au plasma (fréquence de répétition des impulsions, Amplitude de la tension électrique appliquée aux électrodes du réacteur plasma) pour comprendre leurs influences sur les caractéristiques de la flamme. Trois configurations de système plasma (Arc glissant, Pointe-Tige-Pointe et Tige-Anneau) avec deux types de brûleurs (injection radiale et injection axiale du combustible) ont été étudiées. Différentes techniques et diagnostics optiques ont été mis en œuvre pour mener cette étude : la chimiluminescence sur  $\text{OH}^*$  pour analyser la stabilité et la structure de la flamme ; la spectroscopie d'émission optique pour visualiser et déterminer les espèces créées par le plasma et la flamme ; la Vélocimétrie par Imagerie de Particules (PIV) pour l'étude dynamique de l'écoulement réactif ; L'analyse des gaz brûlés pour la caractérisation des émissions polluantes ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ). Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les effets de l'utilisation des plasmas impulsifs microsecondes sur la stabilité de la flamme, les émissions polluantes, les espèces impliquées au niveau du plasma ou/et de la flamme et le champ de vitesses de l'écoulement réactif.

**Mots clés :** Combustion assistée par plasma, Combustion de biogaz, Plasma impulsif microseconde, Stabilisation des flammes, Emissions polluantes.

## **STUDY OF PLASMA-ASSISTED NON-PREMIXED BIOGAS FLAMES**

**Summary:** Biogas, mostly composed of methane ( $\text{CH}_4$ ) and carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), is considered a promising renewable energy resource, due to its production from the decomposition of organic matter (biomass, waste, etc.). However, the presence of high levels of  $\text{CO}_2$  in the biogas mixture can lead to combustion instabilities, sometimes resulting in flame extinction, which induces risks for energy systems and limits energy efficiency. The use of plasma discharges to assist and control combustion has beneficial effects on flame stability and combustion characteristics. The aim of this study is to evaluate the impact of a pulsed plasma to improve stability and control pollutant emissions from biogas combustion. Investigations were carried out to characterize the interactions between pulse discharges and flames, as a function of various combustion-related parameters ( $\text{CO}_2$  content in the fuel, global equivalence ratio, swirl number) and plasma-related parameters (pulse repetition frequency, amplitude of the electrical voltage applied to the plasma reactor electrodes), to understand their influences on flame characteristics. Three plasma system configurations (Gliding arc, Tip-to-Plane, and Rod-Ring) with two burner types (radial and axial fuel injection) were studied. Various optical techniques and diagnostics have been implemented for this study: Chemiluminescence on  $\text{OH}^*$  to analyze flame stability and structure; Optical emission spectroscopy to visualize and determine the species created by the plasma and flame; Particle Imaging Velocimetry (PIV) for dynamic study of the reacting flow; flue gas analysis to characterize pollutant emissions ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ). The results highlighted the effects of using microsecond pulsed plasmas on flame stability, pollutant emissions, species involved in the plasma and/or flame, and velocity fields of the reacting flow.

**Keywords:** Plasma-assisted combustion, Biogas combustion, Microsecond pulsed plasma, Flames stabilization, Pollutant emissions.



**ICARE-CNRS Orléans 1C, Avenue de la recherche  
scientifique CS 50060 45071 Orléans cedex 02 France**

