HAL
open science

Etude des flammes turbulentes non-prémélangées stabilisées par un swirler : effets de la recirculation des gaz de combustion et de l'enrichissement à l'oxygène

Hajar Zaidaoui

▶ **To cite this version:**

Hajar Zaidaoui. Etude des flammes turbulentes non-prémélangées stabilisées par un swirler : effets de la recirculation des gaz de combustion et de l'enrichissement à l'oxygène. Génie des procédés. Université d'Orléans, 2020. Français. NNT : 2020ORLE3146 . tel-03682759v2

HAL Id: tel-03682759

https://theses.hal.science/tel-03682759v2

Submitted on 31 May 2022

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 Aérothermique Réactivité et Environnement

UPR 3021 du CNRS

THÈSE présentée par :

Hajar ZAIDAOUI

Soutenance prévue le : **10 Juillet 2020**

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

Discipline/ Spécialité : Énergétique

Etude des flammes turbulentes non prémélangées stabilisées par un swirler : Effets de la recirculation des gaz de combustion et de l'enrichissement à l'oxygène.

Jury de thèse

Toufik BOUSHAKI	Directeur	Maitre de conférences, Univ. Orléans - ICARE
Jean-Charles SAUTET	Co-directeur	Professeur, Université de Rouen - CORIA
Christian CHAUVEAU	Co-encadrant	Directeur de recherche CNRS, ICARE
Laure PILLIER	Rapporteur	Chargée de recherche CNRS - PC2A
Gilles CABOT	Rapporteur	Professeur, Université de Rouen - CORIA
Ashwin CHINNAYYA	Examinateur	Professeur, ENSMA - Institut Pprime
Jacques DUGUÉ	Examinateur	Expert en combustion, TOTAL
Pablo ESCOT BOCANEGRA	Examinateur	Maitre de conférences, Univ. Orléans - GREMI

À mes parents

« La science, après tout, n'est rien donc que l'expérience »

Marun Abbud

Les discussions de village

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Mr Iskender Gokalp, Mr Christian Chauveau et Mr Philippe Dagaut, ancien et nouveux directeurs d'ICARE, pour la confiance qu'ils m'ont accordée en m'accueillant au sein du laboratoire. Merci pour tous les moyens que vous avez mis à ma disposition pour que je puisse parvenir à mes fins.

J'exprime toute ma reconnaissance et mes remerciements à mes directeurs et co-encadrant de thèse, très particulièrement Mr Toufik Boushaki, de m'avoir donné l'opportunité d'effectuer cette thèse. Son soutien au quotidien, sa bonne humeur même pendant les moments les plus difficiles, sa disponibilité, son expertise sur les applications expérimentales, ses précieux conseils m'ont permis de réaliser ce travail avec une grande liberté et sérénité. Je tiens à le remercier également de m'avoir offert la possibilité d'enseigner à l'IUT. Un grand merci à Mr Jean Charles Sautet de m'avoir fait confiance, de m'avoir donné tous les moyens possibles pour pouvoir effectuer des expériences avec l'équipe de métrologie du CORIA. Je le remercie aussi pour toutes ses orientations et remarques très pertinentes et pédagogiques. Je tiens à remercier également Mr Christian Chauveau pour ses précieux aides et conseils durant ces années de thèse et en particulier, d'avoir assuré la diffusion en visioconférence et a géré les nombreux petits soucis techniques. Ça a été un grand plaisir et un grand privilège de pouvoir travailler avec vous pendant ces quelques années.

Je souhaite remercier avec respect et gratitude l'ensemble des membres de mon jury d'avoir accepté d'évaluer mes travaux de thèse. Grâce à eux, nous avons pu faire en sorte que la soutenance se passe dans les conditions les plus normales possibles malgré le contexte difficile de la pandémie. Je remercie plus particulièrement Mme Laure Pillier et Mr Gilles Cabot d'avoir accepté d'en être les rapporteurs. Leurs rapports, commentaires, remarques ont permis de significativement améliorer le manuscrit. Un grand merci également à Mr Ashwin Chinnayya, qui a pu se déplacer, assister et présider à la soutenance et merci d'avoir accepté d'examiner mes travaux. Les échanges ont également été très riches et instructifs avec Mr Pablo Escot et Mr Jacques Dugué que je remercie également d'avoir accepté d'examiner mes travaux.

Ce travail ne serait pas ce qu'il est sans l'aide de plusieurs personnes. Je tiens à remercier très profondément Mr Amine Koched pour sa disponibilité, son professionnalisme, ses précieuses aides et son support sur les différentes techniques de métrologie optique. Je tiens également à remercier chaleureusement l'équipe de métrologie optique du CORIA, Mr Gilles

Godard et Mme Carole Gobin, de m'avoir formé au CORIA sur la SPIV, de m'avoir formé sur le logiciel, d'avoir transporté, mis en place, aligné l'ensemble du matériel, et assuré son bon fonctionnement. Sans oublier Mr Mahmoud Idir et Florian qui ont été d'une grande aide sur la technique de chimiluminescence.

Un grand merci aux équipes de gestion administratif celle du laboratoire ICARE (Murielle, Isabelle, Patrick, Vincent) et celle l'université d'Orléans (Stéphanie, Cécile et véronique) pour leurs services et leurs supports. Je tiens à remercier également l'ensemble des techniciens de l'atelier du laboratoire ICARE (Fabrice, Stéphane, Nicolas) d'avoir toujours été serviables malgré leur planning assez chargé.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à Mme Nabiha Chaumeix pour m'avoir accordée la possibilité de finir la rédaction de mon manuscrit tout en travaillant avec son équipe. Je la remercie pour sa gentillesse, sa générosité, ses conseils et pour tout ce qu'elle a pu m'apprendre pendant ces six mois. Encore merci pour tout.

J'adresse mes plus vifs remerciements à toutes les personnes que j'ai pu côtoyer pendant ces presque cinq ans au laboratoire ICARE. Je tiens à remercier Brahim, Wahid, Saïd, ma voisine Véro, Sédina, Stéphane, Stéphanie, Viviana pour leur gentillesse et pour tous les bons moments passés ensemble au labo ou ailleurs. Ces moments n'auraient pas été si beaux sans le merveilleux thé à la menthe d'Abdallah, que je remercie infiniment pour sa joie, sa bonne humeur, son soutien et tous les bons tajine/couscous qu'il nous a préparé ;). Merci Chouchou qui était toujours là pour moi dès le début jusqu'au jour de la soutenance, et même après, venue de l'Allemagne pour y assister, merci pour tous les weekends et les bons moments passés ensemble, merci encore pour ta précieuse aide sur Matlab. Je tiens à remercier ma Wardoudou pour toutes les balades aux bord de Loire, pour ses conseils, ses encouragements, surtout en période de rédaction, et aussi pour toutes les assiettes qu'elle m'a offertes quand je cuisinais pour nous :p. Merci Maxence pour ces cinq ans et demi, depuis que j'ai mis le pied en France, il a toujours été là pour moi, il m'a soutenu, m'a aidé, m'a supporté durant toute cette période ☺ et merci encore pour les crêpes au caramel. Merci à Seb, Jojo, Anne-Laure pour tous les moments de folie et de joie passés ensemble, pour tous les repas de midi (miam miam !), pour tout. Sans oublier mes co-bureau, Fabien et Hugo. Merci Hugo pour ta gentillesse, ta sympathie, l'odeur du café que tu diffusais tous les matins dans le bureau, merci d'avoir été toujours disponible pour aider, merci pour tout. Une petite pensée également pour les stagiaires et les étudiants édifice que j'ai encadrés durant ces trois années : Arnaud, Romain, Océane, Nathan, Benjamin, Gabin et Axel. Merci à Rob, Marine, Camille, Outmane,

Yassine, Kouamé, Kéké, Alex 1&2, Romain 1&2, Pascal, Guigui, Jules, Nico, Zuzanna, Juan Pa, Ayan, Antonia, Andréa, Hajar, Fathia, Lydia, Jaouad, Sawssen, Fabian, Mouna, Ahlem, Ghenima, Ahmad, Alka, Nesrine, Wenyu, Leiticia, Ayoub, Aziza, Basma, David, Leila…. J'espère avoir fait le tour :D.

J'adresse un merci particulier à la famille Chnitef, ma deuxième famille, merci pour leur soutien et confiance, pour tous les bons moments et tous les weekends passés ensemble, qui me remplissait de joie et d'énergie pour le restant de la semaine. Merci à tous mes amis au maroc, à mes copines, mes très chères Manal, Najia, Noussaiba, Zahira et Fati, pour leur soutien et leur amour. Un grand merci à Khadija, une des personnes les plus adorables que j'aie connus, merci pour avoir été toujours là pour moi, pour tous les moments fous et merveilleux passés ensemble et encore merci pour la préparation du pôt de thèse.

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. Merci à mes sœurs, Sarah, Asmae et Kawtar qui est venue d'Italie pour assister et à la soutenance et a préparé un délicieux pôt de thèse. Aucun mot ne pourrait suffire pour exprimer tout ce que vous m'avez apporté et m'apportez toujours. Merci à toutes mes familles Zaidaoui, Amouri et Kabil pour votre soutien et votre amour, je vous aime. Merci à mon frère chéri que j'adore, ça me fait plaisir de te voir grandir tous les jours.

Et enfin, Je voudrais remercier plus particulièrement Tahati. Son soutien et son amour sans limites ont été essentiels, merci pour tes conseils et tes encouragements. Et merci surtout pour ta présence à mes côtés pendant toutes ces années et Inchaallah pour toute la vie.

Cette thèse, financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet CAPRYSSES, a été réalisée à l'Institut de Combustion Aérothermique Réactivité et Environnement (ICARE), à Orléans, du 15 octobre 2016 au 14 octobre 2019.

Table des matières

Remerciements……..v

Nomenclatures……xiii

Introduction générale 1

Chapitre 1. Etat de l'art 5

1.1 Introduction 7

1.2 Combustion des flammes de diffusion 7

1.2.1 Généralités 7

1.2.2 Caractéristiques des flammes de diffusion 8

1.2.3 Description d'une flamme de diffusion laminaire 9

1.2.4 Classification des flammes de diffusion turbulentes 13

1.2.5 Structure des flammes partiellement prémélangées et flammes triples 15

1.3 Phénoménologie et dynamique des jets swirlés 16

1.3.1 Caractérisation des écoulements swirlés 16

1.3.2 Les différentes techniques de mise en rotation d'un jet 17

1.3.3 Les paramètres de contrôle d'un jet swirlé en non réactif 20

1.3.4 La combustion dans un écoulement swirlé 24

1.4 Voies de formation des polluants 30

1.4.1 Voies de formation des NO_X 30

1.4.2 Voies de formation du CO 32

1.5 L'enrichissement à l'oxygène 33

1.6 Dilution en dioxyde de carbone CO_2 35

1.7 Dilution en vapeur d'eau H_2O 39

1.8 Dilution en gaz de combustion EGR 42

1.9 Conclusion 43

Chapitre 2. Outils expérimentaux ..... Erreur ! Signet non défini.

2.1 Introduction 47

2.2 Présentation du dispositif expérimental 47

2.2.1 Brûleur coaxial à swirl 47
2.2.2 Chambre de combustion 49
2.2.3 Générateur de vapeur d'eau 52
2.3 Techniques de mesure 53
2.3.1 Analyse des gaz de fumées 53
2.3.2 Technique de chimiluminescence OH* 54
2.3.3 Utilisation de plasma type arc glissant sur la flamme 58
2.3.4 La Vélocimétrie Laser à effet Doppler LDV 62
2.3.5 Vélocimétrie par imagerie de particule (PIV) 66
2.4 Paramètres opératoires de l'étude 74
2.4.1 Paramètres de l'étude 74
2.4.2 Conditions opératoires 77
2.5 Conclusion 79
Chapitre 3. Aspect structurel de flamme, stabilité et émissions polluantes 81
3.1 Introduction 83
3.2 Simulation numérique COSILAB 83
3.2.1 Mode de fonctionnement 84
3.2.2 Résultats et discussions 85
3.3 Limites de stabilité des flammes 87
3.3.1 Cartographie des limites de stabilité des flammes sans et avec swirler 88
3.3.2 Cartographie des limites de stabilité des flammes sans et avec enrichissement en oxygène 91
3.3.3 Choix de la zone d'étude lors de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau 92
3.4 Localisation spatiale de la flamme 92
3.4.1 Effets de l'enrichissement à l'oxygène sur la position spatiale de la flamme 93
3.4.2 Effets de la dilution en CO_2 et H_2O sur la position spatiale de la flamme 96
3.4.3 Effets de l'intensité du swirl sur la position spatiale de la flamme 106
3.4.4 Effets de plasma sur la stabilité et la position spatiale de la flamme 108
3.5 Formation des émissions polluantes et évolution des températures des fumées. 109
3.5.1 Effets de la richesse globale et de l'enrichissement à l'oxygène 111
3.5.2 Effets de la dilution en CO_2 et H_2O 113
3.5.3 Effet de la dilution en gaz de combustion EGR 118

3.5.4 Effets de l'intensité du swirl 119
3.5.5 Effets de plasma sur l'évolution des gaz de fumées 121
3.5.6 Effet de la géométrie du brûleur 123
3.6 Conclusion 127

Chapitre 4. Dynamique et structure des flammes swirlées enrichies à l'oxygène et diluées en gaz de combustion 131

4.1 Introduction 133
4.2 Caractéristiques et dynamique des jets swirlés en non réactif et réactif 134
4.3 Influence de la richesse globale à l'injection sur les champs dynamiques 141
4.4 Influence de l'intensité du swirl sur les champs moyens dynamiques 144
4.5 Influence de l'enrichissement à l'oxygène sur les champs dynamiques 147
4.6 Influence de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur les champs dynamiques 152
4.6.1 Effet du CO_2 sur les champs dynamiques 152
4.6.2 Effet de la vapeur d'eau sur les champs dynamiques 156
4.6.3 Comparaison des effets de CO_2 et H_2O sur les champs dynamiques 159
4.7 Influence de la dilution en EGR sur les champs dynamiques 162
4.8 Conclusion 166

Conclusion générale et perspectives 169

Liste des figures 173

Liste des tableaux 181

Annexe 183

1. Caractéristiques des jets swirlés avec la technique LDV-2D 183
1.A Dynamique des jets swirlés en non réactif et réactif 185
1.B Influence de l'enrichissement à l'oxygène 186
1.C Influence de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau 187
2. Résultats Stéréo-PIV 192

Références bibliographiques 199

Nomenclatures

Nous présentons dans cette section les principales notations et abréviations utilisées dans ce manuscrit. Nous allons commencer tout d'abord par la liste des symboles suivi de la liste des abréviations et acronymes utilisés dans le manuscrit. Les termes empruntés de l'anglais « swirl » et « swirler » désignent respectivement la rotation des écoulements et l'élément matériel qui permet d'imposer une rotation à l'écoulement.

Analyse dimensionnelle : [M] Masse, [L] Longueur, [T] Temps, [K] Température.

- **Capitales romaines**

		UNITE	DIMENSION
CO_2	Dioxyde de carbone	-	-
CO	Monoxyde de carbone	-	-
NO_X	Oxyde d'azote	-	-
OH*	Radical OH*	-	-
C_P	Capacité thermique à pression constante	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	$[L^2T^{-2}K^{-1}]$
D	Coefficient de diffusion	$m^2.s^{-1}$	$[L^2T^{-1}]$
Da	Nombre de Damkhöler	-	-
F	Combustible	-	-
MF	Masse molaire du combustible	$g.mol^{-1}$	[M]
O	Oxydant	-	-
OH*	Radical OH*	-	-
P	Les produits de combustion	-	-
T	Température	K	[K]
$Y0$	Fraction massique de l'oxydant	-	-
YF	Fraction massique du combustible	-	-
Z	Variable de mélange ou scalaire passif	-	-
ZS	Fraction de mélange à la stœchiométrie	-	-
$\dot{Q}$	Débit volumique	$m^3.s^{-1}$	$[L^3T^{-1}]$
D_c	Longueur caractéristique de l'écoulement	m	[L]
G_z	Intégrale du flux de quantité de mouvement axial	$kg.m.s^{-2}$	$[MLT^{-2}]$
G_θ	Intégrale du flux de quantité de mouvement angulaire	$kg.m^2.s^{-2}$	$[ML^2T^{-2}]$
Me	Quantité de masse entrainée	$kg.s^{-1}$	$[MT^{-1}]$
R	Rayon du cylindre de contrôle	m	[L]
RE	Nombre de Reynolds	-	-

Sn	Nombre de swirl	-	-
Snc	Nombre de swirl critique	-	-
D	Diamètre caractéristique	m	[L]
D_b	Diamètre du tube coaxial brûleur	m	[L]
D_{eq}	Diamètre équivalent	m	[L]
D_h	Diamètre hydraulique	m	[L]
D_{tube}	Diamètre tube central brûleur	m	[L]
MR	Rapport des quantités de mouvement	-	-
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	$J.kg^{-1}$	$[L^2T^{-2}]$
R	Rayon caractéristique	m	[L]
R_b	Rayon externe du tube coaxial du brûleur	m	[L]
R_h	Rayon hydraulique	m	[L]
R_{tube}	Rayon externe tube central du brûleur	m	[L]
Sn_G	Nombre de swirl géométrique	-	-
Y_{max}	Longueur de pénétration	m	[L]
H_{acc}	Hauteur d'accrochage	m	[L]
H_f	Hauteur de fin de flamme	m	[L]
L_f	Longueur de flamme	m	[L]
Pr	Nombre de Prandtl	-	-
Ra	Nombre de Rayleigh	-	-
V_r	Vecteur de vitesse radiale	$m.s^{-1}$	$[LT^{-1}]$
V_z	Vecteur de vitesse axiale	$m.s^{-1}$	$[LT^{-1}]$
V_θ	Vecteur de vitesse azimutale	$m.s^{-1}$	$[LT^{-1}]$

- **Minuscules romaines**

		UNITE	DIMENSION
PPM	Partie par million	-	-
p	Pression	$kg.m^{-1}.s^{-2}$	$[ML^{-1}T^{-2}]$
r	Position radiale dans le jet	m	[L]
Z	Cordonnée axiale	m	[L]
$v^{CNTP}{}_{,dEb}$	Vitesse débitante dans les conditions normales de pression et température : 0°C et 1 atmosphère	$m.s^{-1}$	$[LT^{-1}]$

e	Excès d'air	-	-
g	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$	$[LT^{-2}]$
h	Coefficient de transfert convectif	$J.m^{-2}.s-1.K^{-1}$	$[MT^{-3}K^{-1}]$
k	Conductivité thermique	$J.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$	$[MLT^{-3}K^{-1}]$
zs	Position du swirler par rapport à la sortie	m	[L]
K	Intensité de l'énergie cinétique	$m^2.s^{-2}$	$[L^2T^{-2}]$
% vol	Pourcentage volumique	-	-

- **Lettres grecs**

		UNITE	DIMENSION
Δh^{O}_{F}	Enthalpie standard de formation	$J.kg^{-1}$	$[L^2T^{-2}]$
β	Fonction de couplage	- ou K	- ou [K]
vF	Coefficient stœchiométrique du combustible	-	-
ξ	Taux d'avancement de la réaction	mol	-
ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$	$[M.L^{-3}]$
rt	Temps caractéristique de la turbulence	s	[T]
rc	Temps caractéristique de la chimie	s	[T]
Φ	Richesse globale	-	-
Ψ	Coefficient de blocage	-	-

- **Abreviations**

CCS	*CO_2 Capture and Storage*
EGR	*« Exhaust Gas Recirculation »*
UHC	*Unburned HydroCarbons*
CNTP	*Conditions normales de température et pression : 0°C et 1 atmosphère*
CAPRYSSES	*Cinétique chimique et Aérothermodynamique pour des Propulsions et des Systèmes Energétiques Propres et Sûrs*
CORIA	*Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie*
EIXX	*Indice d'émission de l'espèce XX*
ICARE	*Institut de combustion aérothermique réactivité et environnement*

JS	*Jet swirlé*
R	*Réactif*
NR	*Non-Réactif*
RB	*Right Branch*
LB	*Left Branch*
LDV	*Vélocimétrie Laser à effet Doppler*
LIF	*Fluorescence induite par laser*
OEC	*« Oxygen Enhanced Combustion »*
PCI	*Pouvoir calorifique inférieur*
PIV	*Vélocimétrie par image de particules (SPIV = Stéréo PIV)*
PLIF	*Fluorescence induite par laser dans un plan*
PSC	*Point de stagnation central*
PVC	*« Precessing Vortex Core »*
RMS	*« Root Mean Square fluctuation »*
RSB	*Rapport signal sur bruit*
UV	*Ultra-Violet*
ZRC	*Zone de Recirculation Centrale*
ZRE	*Zone de Recirculation Externe*

Introduction générale

- **Contexte général et objectif de l'étude**

La recirculation des gaz de combustion (EGR « Exhaust Gas Recirculation ») a longtemps été conçue, installée et pratiquée comme moyen de dilution et de contrôle dans plusieurs systèmes de combustion. L'objectif principal de cette technologie réside dans l'obligation de satisfaire la réglementation actuelle en matière d'émissions basée sur la réduction des émissions de particules et de polluants, en particulier les oxydes d'azote NO_X et de soufre SO_X. Son effet sur la formation de NO_X est dû d'une part à une réduction de la concentration en oxygène et en azote dans la zone de combustion et d'autre part à la teneur en eau et en dioxyde de carbone des gaz d'échappement. Les capacités calorifiques molaires plus élevées de l'eau et du dioxyde de carbone abaissent la température maximale de combustion, ce qui, à son tour, freine la formation de NO_X.

Dans les applications stationnaires, la technique EGR présente divers avantages en termes de concentration de CO_2 plus élevée dans les gaz d'échappement et de débit d'échappement plus faible vers le système de capture. Ceci facilite davantage le processus de captage de CO_2 (CCS « CO_2 Capture and Storage »). En effet, les niveaux croissants de dioxyde de carbone (CO_2) sont une importante préoccupation dans la société moderne, car ils contribuent considérablement au réchauffement climatique et à de multiples déséquilibres environnementaux. Il est donc nécessaire de réduire et limiter les émissions de CO_2 rejetées dans l'atmosphère. Pour ce faire, de nouveaux modes de combustion doivent être mis en place afin d'optimiser le processus et le coût de capture et séquestration du CO_2 (CCS). Pour plus de détails sur les différents processus de captage, nous renvoyons le lecteur vers la référence [1]. Généralement, les principales technologies concurrentes sont l'adsorption, l'absorption physique, la séparation cryogénique et la séparation membranaire. Cette dernière technologie nécessite une concentration en CO_2 dans les gaz d'échappement du processus de combustion supérieure à 30% [2]. Malgré ces avantages, des problèmes techniques subsistent concernant la quantité maximale de gaz d'échappement à recycler, le maintien d'une bonne stabilité de la flamme, des problèmes concernant les hydrocarbures imbrûlés (UHC « Unburned HydroCarbons ») et la formation du CO. Cependant, l'impact de l'EGR sur les performances des systèmes de combustion reste incertain, car peu d'analyses quantitatives sont disponibles.

Dans cette optique, l'objectif de ce travail de thèse est d'étudier les effets de l'enrichissement à l'oxygène OEA (« Oxygen Enriched Air » en anglais) et la recirculation des gaz de combustion EGR sur la stabilité, sur l'évolution des émissions polluantes et plus particulièrement sur la dynamique d'une flamme turbulente non prémélangée méthane/air stabilisée par un swirler. Ce type de flammes, dites swirlées, est présent dans les brûleurs bas-NO_X conçus pour les moteurs, chaudières, fours industriels et dans d'autres systèmes de combustion, afin de maintenir une bonne stabilité de la flamme notamment pour les débits très importants, et également réduire les émissions de NO_X. En effet, l'effet stabilisant de l'oxygène et l'effet diluant des EGR vont permettre non seulement d'augmenter la concentration du CO_2 dans les fumées dans le but d'optimiser son captage, mais aussi de réduire les émissions de CO et de NO_X afin de respecter les réglementations environnementales strictes imposées, tout en gardant une bonne stabilité de la flamme. Nous avons analysé de manière paramétrique, à l'aide de mesures intrusives et non intrusives, les effets de l'enrichissement à l'oxygène et la dilution en gaz de combustion en fonction de plusieurs paramètres, que nous qualifierons de paramètres globaux. Ces grandeurs comprennent principalement la richesse globale à l'injection, l'intensité du swirl, la teneur d'oxygène dans l'air et le taux de dilution en gaz de combustion dans l'oxydant.

Ce travail de thèse a été réalisé au laboratoire ICARE et soutenu financièrement par le laboratoire d'excellence CAPRYSSES (Cinétique chimique et Aérothermodynamique pour des Propulsions et des Systèmes Energétiques Propres et Sûrs). Une partie des travaux de thèse, notamment l'étude dynamique, a bénéficié d'un soutien du laboratoire CORIA en termes de diagnostics laser (Stéréo-PIV) et de support technique et scientifique. Ce travail vise à améliorer la compréhension de la phénoménologie et le comportement des flammes non prémélangées turbulentes swirlées méthane/air enrichies à l'oxygène et diluées en CO_2 et en vapeur d'eau.

- **Organisation du manuscrit**

Ce manuscrit se compose de quatre chapitres et sera articulé comme suit :

Dans le **premier chapitre** sera présentée une revue bibliographique globale sur les approches expérimentales et théoriques des flammes swirlées, enrichies à l'oxygène et diluées en gaz de combustion. Dans la première partie du chapitre 1, nous présenterons les généralités relatives à la combustion des flammes de diffusion en régime laminaire et turbulent. La deuxième partie correspondra à la caractérisation des écoulements swirlés. Cette partie traitera

des aspects dynamiques des flammes swirlées, les différents moyens de mise en rotation d'un jet ainsi que les différents paramètres de contrôle du jet swirlé. La troisième partie concernera les différentes voies de formation des polluants, notamment les NO_X et le CO. Enfin, la dernière partie sera dédiée à la présentation sélective des études qui traitent les effets de l'enrichissement à l'oxygène et la dilution en gaz de combustion (CO_2 et/ou H_2O) sur des configurations de flammes plus ou moins similaires à celle utilisée dans notre étude.

Dans le **deuxième chapitre** seront présentés les différents moyens expérimentaux et les techniques de mesures utilisés durant ce travail de thèse. Dans la première partie seront présentés la chambre de combustion, le brûleur coaxial à swirler et le système de génération de la vapeur d'eau. L'ensemble des techniques de mesures et des diagnostics utilisés sont rassemblés dans la deuxième partie de ce second chapitre : l'analyse des gaz de combustion, la chimiluminescence du radical OH*, le système de plasma de type arc glissant, le principe de fonctionnement et le dispositif expérimental adopté pour chacune des techniques : la LDV (vélocimétrie Laser à effet Doppler) et la Stéréo-PIV (Vélocimétrie par Imagerie de Particules stéréoscopique). La dernière partie de ce chapitre rassemble les paramètres et les conditions opératoires de l'étude.

Les résultats expérimentaux portant sur la répartition spatiale, la stabilité et l'évolution des émissions polluantes sont regroupés dans le **troisième chapitre**. La première partie sera dédiée à une étude numérique à l'aide du logiciel COSILAB portant principalement sur la caractérisation de dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur la température à l'équilibre thermodynamique et la vitesse de flamme laminaire d'un mélange méthane/air enrichi à l'oxygène. Le domaine de stabilité choisi pour cette étude y sera présenté. Ensuite, la localisation spatiale et le comportement de la flamme obtenus par la chimiluminescence du radical OH* seront présentés en fonction des différents paramètres globaux. Les fluctuations des hauteurs d'accrochage et de fin de flamme mesurées permettront de quantifier la stabilité de la flamme. Enfin, nous présenterons les évolutions des émissions polluantes ainsi que les températures de fumées en fonction des conditions opératoires de l'étude.

Le **quatrième chapitre** sera consacré à l'étude dynamique des flammes swirlées enrichies à l'oxygène et diluées en gaz de combustion à l'aide des techniques LDV et Stéréo-PIV. Une caractérisation de l'écoulement en réactif et en non réactif sera explicitement abordée. Les champs moyens de vitesse accompagnés de leurs fluctuations RMS seront systématiquement présentés en fonction de l'ensemble des paramètres globaux de l'étude.

Une conclusion générale et des perspectives clôtureront le manuscrit.

Chapitre 1. Etat de l'art

1.1 Introduction 7

1.2 Combustion des flammes de diffusion 7

1.2.1 Généralités 7

1.2.2 Caractéristiques des flammes de diffusion 8

1.2.3 Description d'une flamme de diffusion laminaire 9

1.2.4 Classification des flammes de diffusion turbulentes 13

1.2.5 Structure des flammes partiellement prémélangées et flammes triples 15

1.3 Phénoménologie et dynamique des jets swirlés 16

1.3.1 Caractérisation des écoulements swirlés 16

1.3.2 Les différentes techniques de mise en rotation d'un jet 17

1.3.3 Les paramètres de contrôle d'un jet swirlé en non réactif 20

1.3.3.1 Nombre de swirl 20

1.3.3.2 Nombre de Reynolds 21

1.3.3.3 Effets du confinement 21

1.3.3.4 Géométrie de la sortie d'un jet en expansion 23

1.3.4 La combustion dans un écoulement swirlé 24

1.3.4.1 L'effet du swirl sur la combustion 24

1.3.4.2 L'effet du swirl sur la formation des NO_X 27

1.4 Voies de formation des polluants 30

1.4.1 Voies de formation des NO_X 30

1.4.2 Voies de formation du CO 32

1.5 L'enrichissement à l'oxygène 33

1.6 Dilution en dioxyde de carbone CO_2 35

1.7 Dilution en vapeur d'eau H_2O 39

1.8 Dilution en gaz de combustion EGR 42

1.9 Conclusion 43

1.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation des notions générales de la combustion des flammes de diffusion en régime turbulent, notamment, les flammes tourbillonnaires dites swirlées. Dans un premier temps, une présentation globale des caractéristiques des flammes de diffusion est présentée. Ensuite, l'accent est porté sur les flammes non prémélangées turbulentes. Puis, une analyse générale des flammes swirlées est effectuée. Enfin, après la présentation des différentes voies de formations des polluants, le CO et les NO_X en particulier, un état de l'art portant sur les effets de l'enrichissement en dioxygène O_2 et de la dilution au gaz de recirculation (le dioxyde de carbone CO_2 et/ou la vapeur d'eau H_2O) sur les caractéristiques des flammes méthane/air est effectué.

1.2 Combustion des flammes de diffusion

1.2.1 Généralités

Les flammes de diffusion, également nommées flammes non prémélangées, se rencontrent fréquemment dans l'industrie, le plus souvent dans les brûleurs industriels, les fours de combustion, les moteurs et les foyers de turbomachines. Une flamme de diffusion se produit entre un milieu combustible et un milieu oxydant séparément injectés (exemple : flamme de bougie ou de briquet), ou bien par l'intermédiaire d'un brûleur. Elle se caractérise par le fait que la combustion se produit en même temps que le mélange entre le combustible et le comburant. Ce type de flammes est contrôlé par la diffusion des espèces ; le combustible et l'oxydant diffusent vers la zone réactionnelle. La préférence accordée aux flammes de diffusion est liée à un argument de sécurité accrue. En effet, contrairement aux flammes de prémélange pour lesquelles le combustible et le comburant sont préalablement mélangés, les flammes de diffusion limitent les risques de retour de flamme et d'explosion. Ces flammes permettent de réaliser des combustions diphasiques, notamment dans les moteurs-fusés, permettant d'augmenter les rendements. Par contre, elles présentent généralement des difficultés notamment sur la stabilisation des flammes lorsque les débits des réactifs sont relativement importants. Pour plus de détails, on pourra se référer aux ouvrages suivants : De Soete et Feugier [3], Borghi & Destriau [4], Borghi & Champion [5], Peters [6]et Poinsot et Veynante [7].

1.2.2 Caractéristiques des flammes de diffusion

La structure d'une flamme de diffusion varie suivant les positions considérées dans la flamme, comme le montre la Figure 1.1 ci-dessous pour flamme jet méthane/air. La zone de température maximale occupe un espace annulaire séparant la zone riche en méthane de celle riche en oxygène. Proche de la sortie du jet de méthane, le centre du jet est froid et riche en CH_4. Loin de la sortie du jet, la concentration du CH_4 sur l'axe diminue de plus en plus et la température augmente, sans atteindre son maximum. Le maximum de température se situe sur l'axe à une certaine distance, quand le méthane disparaît complètement. Sous l'hypothèse d'équidiffusion, la zone de diffusion des espèces et celle de la température sont superposées et symétriques.

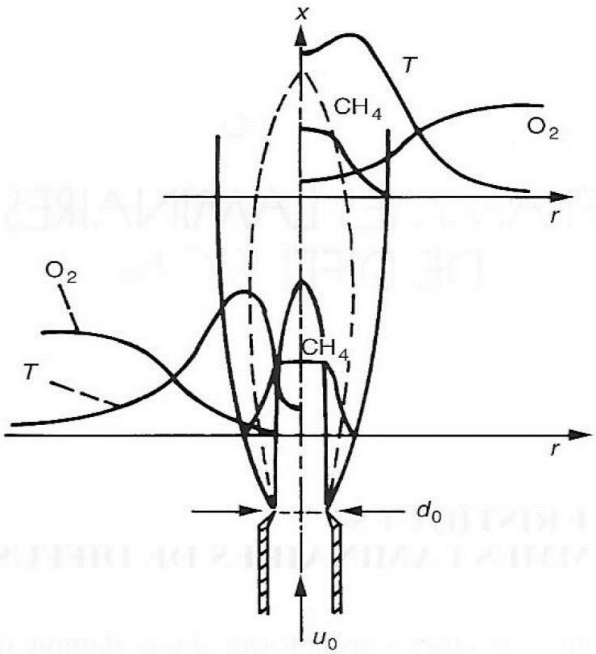


Figure 1.1 : Structure d'une flamme de diffusion obtenue à partir d'un écoulement de combustible débouchant dans l'air [5].

L'épaisseur d'une flamme de diffusion varie en fonction des conditions d'injection (la richesse, la température, la pression et la vitesse d'injection), de la géométrie de l'injecteur, du type de combustible utilisé et de l'emplacement dans la flamme. Elle grossit au fur et à mesure que l'on s'éloigne du début du jet. Tout comme les flammes prémélangées, seule une partie de cette zone épaisse est le siège de réactions chimiques et d'un dégagement de chaleur important. Il s'agit de la zone où la température est la plus importante. Elle correspond à la zone centrale, autour de la ligne pointillée de la Figure 1.1. La zone réactive est bleue comme

celle de la flamme de prémélange, mais elle est généralement cachée par le rayonnement des particules de suie dans le cas d'une flamme de diffusion. Contrairement aux flammes prémélangées, le front de flamme de diffusion reste fixe autour de l'isosurface de mélange stœchiométrique et ne se propage pas au sein de l'écoulement. Par conséquent, pour entretenir la combustion, il faut assurer parfaitement l'apport continu en oxydant et en carburant.

Une flamme non prémélangée sépare par ailleurs deux zones de convection / diffusion, dans lesquelles se produira le préchauffage des gaz, l'apport des gaz frais vers la zone de réaction et l'évacuation des gaz brûlés. En effet, les flammes de diffusion résultent de la compétition entre les processus chimiques et la diffusion moléculaire des espèces. Les phénomènes de convection jouent cependant un rôle plus important en amenant les réactifs et en emportant les produits de façon plus efficace. La structure de cette flamme est donc contrôlée uniquement par le rapport entre les temps caractéristiques de la chimie et de la diffusion.

On distingue de multiples caractéristiques d'une flamme de diffusion. La première caractéristique concerne le régime de combustion de la flamme [8,9]. En effet, il est primordial de connaître le régime que ce soit pour des raisons de sécurité et de rendement, ou bien dans l'optique de la modélisation. La seconde caractéristique est liée au mode de stabilisation qui doit se faire nécessairement détachée de l'injecteur, de façon à ne pas entrainer une surchauffe excessive de celui-ci [10]. Enfin, la dernière caractéristique propre à chaque flamme est l'interaction flamme/turbulence. En effet, la turbulence modifie la structure d'une flamme à grande ou à petite échelle. Les phénomènes d'étirement et de compression de flamme dus aux structures tourbillonnaires peuvent éteindre complètement la flamme en créant des zones d'extinction locales et/ou modifier la réactivité de la flamme. En conséquence, les propriétés locales du front de flamme peuvent être impactées (épaisseur et vitesse du front de flamme). À titre d'exemple, la flamme à contre-courant qui permet de mettre en lumière le rôle de l'étirement dans la détermination de la structure de la flamme de diffusion. Le fait de modifier les vitesses d'injections, permet de contrôler l'étirement que subit la flamme. Par conséquent, la position de l'isosurface de fraction de mélange stœchiométrique, définie dans la section suivante, varie en fonction du taux d'étirement.

1.2.3 Description d'une flamme de diffusion laminaire

La description d'une flamme de diffusion par Burke et Schumann [11] repose sur plusieurs hypothèses :

- **H1** : Le jet de combustible est stationnaire, laminaire, axisymétrique et provient d'un injecteur circulaire.
- **H2** : La chaleur et toutes les espèces diffusent de la même manière. Le flux de diffusion moléculaire suit la loi de Fick, les nombres de Schmidt, Lewis et Prandtl sont égaux à 1.
- **H3 :** Les capacités thermiques des espèces O (oxydant), F (fuel) et P (produits) sont toutes identiques et constantes.
- **H4 :** La réaction chimique de combustion est considérée à une seule étape globale suivant une loi d'Arrhenius qui s'écrit :

$$F + sO \rightarrow (1+s)\,P \tag{1}$$

Où s est le rapport stœchiométrique défini par s = $\frac{\nu_O M_O}{\nu_F M_F}$.

Avec ces hypothèses, les équations de conservation s'expriment de la manière suivante :

Généralement, la fraction massique d'une espèce i dans un milieu en combustion obéit à l'équation de conservation donnée par :

$$\underbrace{\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t}}_{\text{Terme Instationnaire}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho U_j Y_i)}{\partial x_j}}_{\text{Terme de convection}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial x_j}\right)}_{\text{Terme de diffusion}} = \underbrace{\dot{w}_i}_{\text{Taux de réaction}} \tag{2}$$

L'équation de conservation de masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{3}$$

L'équation de quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial \rho U_j}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau}{\partial x_j} \tag{4}$$

Et l'équation de l'énergie s'écrit :

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial(U_j C_p T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) - \Delta H^0 \dot{w}_F \tag{5}$$

Où $\dot{w}_i$ est le taux de réaction de l'espèce i, D le coefficient de diffusion massique des espèces, P la pression, τ le tenseur des forces visqueuses, C_p la capacité thermique, λ la conductivité thermique, et ΔH^0 la chaleur de réaction massique (par unité de masse du combustible). Les termes impliquant les forces d'action en volume, de gravité et de pression sont négligés.

Une flamme de diffusion exige, pour la description de son état local, deux variables : ξ le taux d'avancement de la réaction et Z la variable de mélange ou scalaire passif de l'écoulement (elle n'est pas influencée par la réaction). Nous présentons succinctement la variable de mélange Z et l'équation qu'elle vérifie en se basant sur toutes les hypothèses qui ont conduit à son expression dans le cas laminaire. La variable de mélange Z est définie à partir des variables Schvab-Zeldovich pour le combustible et l'oxydant, par :

$$Z = \frac{\beta - \beta_0}{\beta_1 - \beta_0} \tag{6}$$

Où 0 et 1 désignent respectivement les conditions d'entrée du domaine côté oxydant et côté combustible. La fraction de mélange Z n'est pas unique, car les fonctions de couplage β font intervenir l'oxydant, le combustible, les produits de combustion et la température :

$$\begin{aligned} \beta_{OP} &= Y_O + \frac{s\,Y_P}{s+1} \\ \beta_{TF} &= T + \frac{-\Delta h_f^0}{C_p} \\ \beta_{FO} &= Y_F - \frac{Y_O}{s} \\ \beta_{FP} &= Y_F - \frac{Y_P}{s+1} \end{aligned} \tag{7}$$

Où Y_i est la fraction massique de l'espèce i et s désigne le pouvoir comburivore massique. La fraction de mélange Z vérifie la même équation quelle que soit β avec les conditions aux limites illustrées dans le Tableau 1.1:

Tableau 1.1: Conditions aux limites de l'équation (8).

Variable	Z	Y_F	$\frac{Y_O}{s}$	$-\frac{Y_P}{s+1}$	$\frac{-TC_p}{-\Delta h}$
Comburant	0	$Y_{F,0} = 0$	$Y_{O,0}$	0	$\frac{-T_0 C_p}{-\Delta h}$
Combustible	1	$Y_{F,1}$	$Y_{O,1} = 0$	0	$\frac{-T_1 C_p}{-\Delta h}$

On obtient ainsi le diagramme de Burke-Schumann présenté sur la Figure 1.2, qui résout l'équation (8) pour les différentes fonctions de couplages β avec les conditions aux limites du Tableau 1.

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \upsilon Z)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho D \frac{\partial Z}{\partial x_j}\right) \tag{8}$$

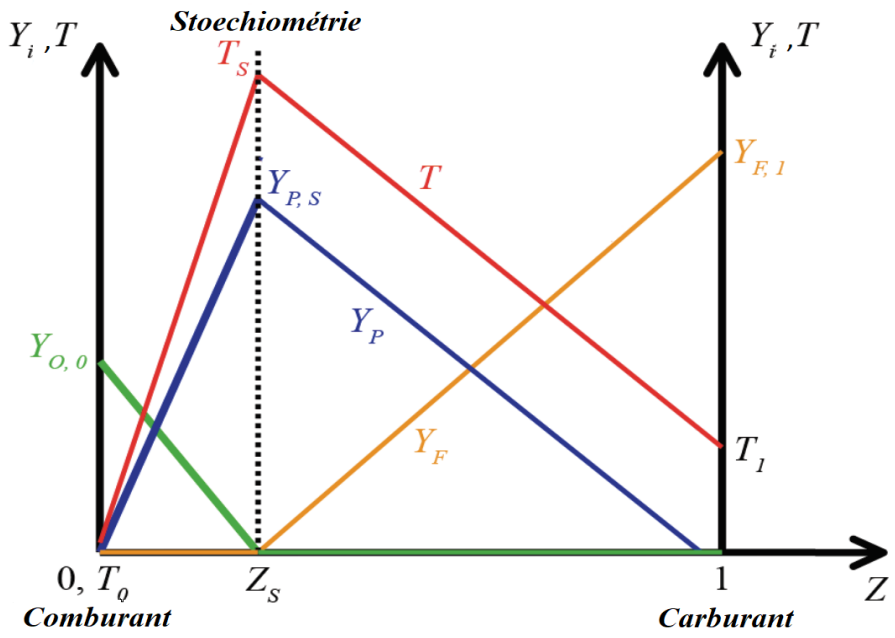


Figure 1.2: Structure d'une flamme de diffusion selon l'approximation de Burke-Schumann.

Généralement, on utilise le taux de dissipation scalaire de Z à la place de l'étirement, noté χ, afin de caractériser la structure de la flamme. On peut montrer que l'étirement moyen et le taux de dissipation de z sont reliés par une relation linéaire faisant intervenir une fonction de la fraction de mélange [12]. χ est défini par :

$$\chi = D\left|\frac{\partial Z}{\partial x}\right|^2 \quad (9)$$

Cette grandeur permet de quantifier les flux de diffusion de masse à travers les isosurfaces de Z. Ces observations nous permettent alors de caractériser la structure d'une flamme de diffusion par seulement deux grandeurs : la fraction du mélange et son taux de dissipation.

1.2.4 Classification des flammes de diffusion turbulentes

Les flammes de diffusion turbulentes sont généralement caractérisées par deux nombres sans dimension : le nombre de Reynolds de la turbulence (avec *u'* fluctuation de la vitesse à l'échelle *l* et l'échelle intégrale de la turbulence) et le nombre de Damköhler (Da) qui divise le temps caractéristique de la turbulence τ_t et le temps caractéristique de la chimie τ_c :

$$Re_T = {u'l_t}/{\nu} \;\; ; \; D_a = {\tau_t}/{\tau_c} \quad (10)$$

La nature de l'interaction entre la chimie et la turbulence dépend du comportement asymptotique de D_a :

$\boldsymbol{D_a} << \mathbf{1}$: Les réactifs ont suffisamment de temps pour se mélanger avant la zone de réaction générant des flammelettes partiellement prémélangées au milieu de celle-ci comme dans le cas des réacteurs parfaitement prémélangés.

$\boldsymbol{D_a} \approx \mathbf{1}$: Les temps caractéristiques sont du même ordre de grandeur ce qui rend difficile la description de l'interaction entre la chimie et la turbulence.

$\boldsymbol{D_a} >> \mathbf{1}$: le temps caractéristique de la turbulence est plus important que celui de la chimie, dans ce cas-là, la chimie est considérée comme infiniment rapide, la turbulence déforme fortement la structure de la flamme, et crée des flammelettes laminaires plissées.

Afin de définir les différents régimes de combustion turbulente, il existe d'autres approches qui utilisent en plus du couple (nombres de Reynolds et de Damköhler), l'intensité des fluctuations de la fraction du mélange Z [12]. En effet, le front de flamme est perturbé par les fluctuations locales de vitesse suivant l'intensité des fluctuations, d'où la notion de fluctuation de la fraction du mélange Z.

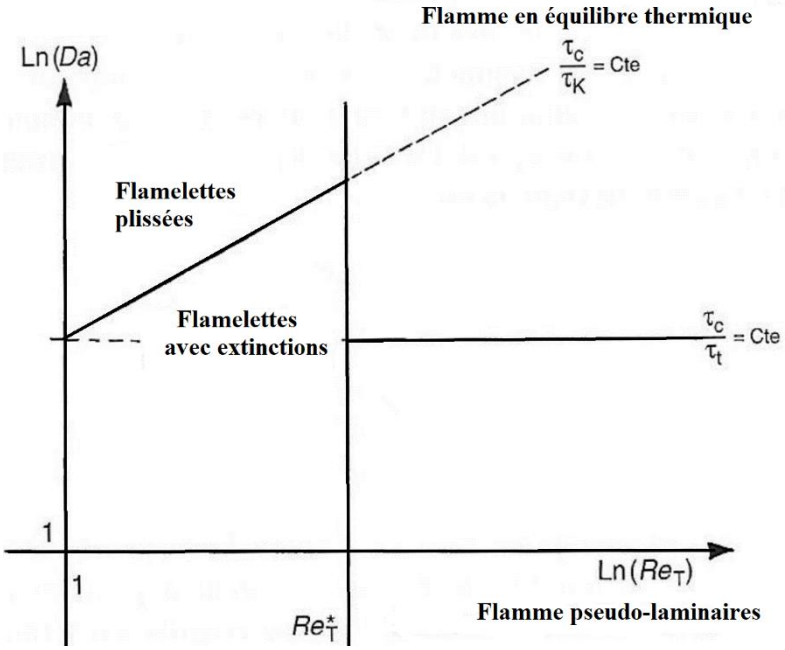


Figure 1.3: Classification de différents types de flammes turbulentes de diffusion dans un diagramme : nombre de Reynolds/nombre de Damkölher [5].

La Figure 1.3 décrit le diagramme de classification de différents types de flammes turbulentes de diffusion proposé par Borghi et Champion [5]. Le diagramme présenté ne permet pas de définir de manière quantitative les différents régimes rencontrés. En particulier les bornes de ces régimes sont susceptibles de changer suivant le point de fonctionnement de la flamme. Le rapport du taux de dissipation de Z sur le taux de dissipation à l'extinction K, choisi en abscisse est proportionnel au nombre de Damköhler, et le rapport de l'épaisseur de réaction sur l'épaisseur scalaire de Gibson, choisi en ordonnée, est proportionnel au nombre de Reynolds. Dans le domaine où τ_c est supérieur à τ_t et que Re_T est très élevé, on retrouve des flammes turbulentes qu'on appelle pseudo-laminaires. En effet, ce sont des flammes avec de larges zones de diffusion-convection qui entourent une zone de réaction. Les fluctuations turbulentes sont très fortes, mais à très petite échelle, elles ont eu le temps de dissiper avant que la chimie n'ait lieu, produisant ainsi une flamme de diffusion presque stable. Dans le domaine où $Re_T > Re_T^*$, il est impossible de distinguer des flammelettes non modifiées par la turbulence. Dans le domaine des flammelettes à extinctions locales, les flammelettes sont éteintes par endroit, là où l'étirement est important au point qu'il provoque l'extinction de la flamme. La flamme ensuite peut se rallumer puisque l'étirement n'est pas permanent. Dans ce cas-là, on fait appel à la configuration de « Flamme triple » observée pour la première fois par Phillips [13] en 1965 représentée dans la Figure 1.4 de la section suivante.

En effet, le rallumage des flammelettes s'effectue par la propagation d'une flamme prémélangée dans la poche de gaz plus ou moins mélangée qui sera formée à l'endroit éteint. Comme évoqué avant, l'interaction entre la turbulence et la combustion influence aussi sur la topologie du front de flamme, plus on augmente le nombre de Reynolds du combustible, plus le taux d'étirement et le taux de plissement sont importants [14].

1.2.5 Structure des flammes partiellement prémélangées et flammes triples

Dans les configurations industrielles, il est très rare de rencontrer directement des régimes de flammes parfaitement prémélangées ou non prémélangées de façon indépendante. Généralement, le mélange des réactifs s'établit d'une manière progressive et amène à la présence d'inhomogénéités au sein de l'écoulement. On distingue deux types de flammes partiellement prémélangées [15]:

- Les flammes où les réactifs sont mélangés de façon progressive aux gaz brûlés avant la zone de réaction (flammes riches, flammes stabilisées par recirculation).
- Les flammes où les réactifs sont mélangés avant de réagir, mais avec des variations locales de richesse (flammes stratifiées).

Ces flammes sont généralement caractérisées par les mêmes outils que ceux utilisés dans le cadre des flammes prémélangées et non prémélangées. Les variations locales de richesses nous poussent à utiliser une fraction de mélange Z comme pour les flammes de diffusion. D'une manière identique aux flammes de prémélange, on peut définir une variable notée c qui nous permet de repérer l'état d'avancement des réactions chimiques dans la flamme. Le rôle de cette variable d'avancement sur la structure du front de flamme est aussi important pour les flammes partiellement prémélangées que pour les flammes prémélangées [15]. On peut donc conclure que la fraction du mélange Z et une variable d'avancement c sont deux paramètres nécessaires pour une représentation appropriée de la structure d'une flamme partiellement prémélangée.

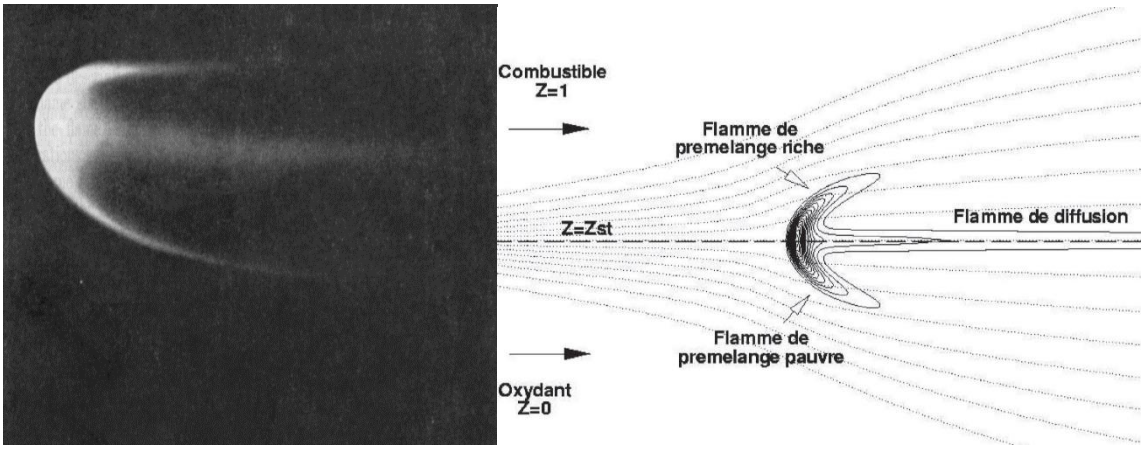


Figure 1.4 : Image d'une flamme triple stabilisée [13] et représentation schématique d'une flamme triple [16].

En ce qui concerne la stabilisation des flammes partiellement prémélangées, il est courant d'étudier le cas canonique de la flamme triple caractérisée par sa structure à trois branches comme l'illustre la Figure 1.4. Ce type de flamme est composée de deux flammes prémélangées, l'une riche et l'autre pauvre en combustible, qui se propagent en amont de l'écoulement et participent à la stabilisation d'une flamme de diffusion. Le point de concours des trois branches est appelé point triple. Cette flamme permet la consommation des imbrûlés provenant de la branche riche et l'oxydant provenant de la branche pauvre. La flamme triple se propage dans la direction des gaz frais le long de l'isosurface $Z=Z_S$, tandis que les deux branches prémélangées se propagent à des vitesses inférieures. Cette propriété donne à la flamme sa forme caractéristique. Les flammes triples se forment en présence d'un gradient de concentration de carburant à l'intérieur des couches de mélange comme l'ont visualisé expérimentalement Kim *et al.*[17]. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur vers plusieurs études expérimentales et numériques [17–21], notamment dans les études de stabilisation des flammes jets.

1.3 Phénoménologie et dynamique des jets swirlés

1.3.1 Caractérisation des écoulements swirlés

Un écoulement swirlé résulte de l'application d'un mouvement spiral ou de giration, dont la composante de la vitesse swirlée (composante de la vitesse tangentielle ou azimutale) devient non négligeable. Les effets du swirl dans des écoulements inertes et réactifs ont été beaucoup appréciés pendant des années. Les écoulements swirlés apparaissent dans différentes

applications et phénomènes ; dans les cas non réactifs, on retrouve parmi d'autres : les réacteurs, séparateur de cyclone, tubes Ranque-Hilsch, les tourbillons des ailes d'avion, les tornades et les échangeurs de chaleur. Dans le cas de la combustion (cas réactif) : Le but principal de l'utilisation du swirl est sa capacité de stabiliser la flamme pour les écoulements à forte intensité et à l'amélioration de la combustion propre dans plusieurs applications comme : les moteurs automobiles, les turbines à gaz, les fours et chaudières industriels et dans plusieurs autres dispositifs de chauffage [22–27]. Ce travail de thèse contribue à l'amélioration et la compréhension des brûleurs à jets swirlés.

1.3.2 Les différentes techniques de mise en rotation d'un jet

L'écoulement swirlé peut être généré par trois principales méthodes [28] :

- Entrée tangentielle : générateur de swirl par entrées axiale + tangentielle. (Figure 1.5)
- Aubes guidées : en utilisant un swirler à pales. (Figure 1.6)
- Rotation directe : Éléments mécaniques tournants.

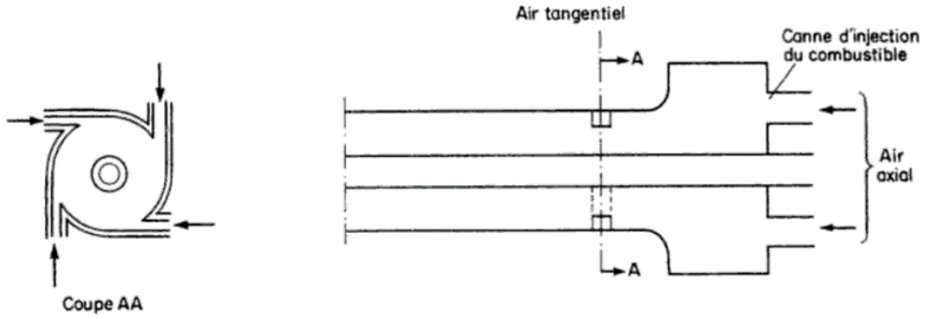


Figure 1.5: Schéma d'un brûleur à swirl par arrivée tangentielle [29].

Le swirler est l'élément qui met en rotation l'écoulement à l'aide de pales inclinées dans un tube axial. Cet angle d'inclinaison est relié à un nombre sans dimension qu'on note le nombre de swirl, qui va être défini dans le paragraphe 1.3.3. Les brûleurs à swirler sont généralement utilisés dans les chaudières à gaz industrielles, dans les chambres de combustion de turbines à gaz, mais aussi dans des installations à charbon ou à combustible liquide, où intervient généralement la combustion diphasique.

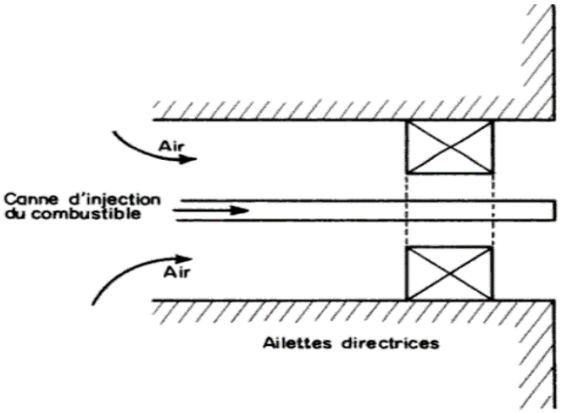


Figure 1.6: Schéma de brûleur avec mise en rotation de l'air avec ailettes directives [29].

Pour la conception des brûleurs à swirler, il existe généralement le choix entre trois types principaux de swirlers : à volute, à pales tangentielles et à pales axiales [30]. Le swirler à volute correspond à une volute d'admission hélicoïdale, ou tangentielle pour un moteur diesel 4 temps [31]. Les deux autres types de swirlers sont largement utilisés dans les configurations de brûleurs diphasiques ou gaz. Suivant la géométrie des pales, le swirler à pales axiales peut se décliner en trois versions : hélicoïdales, courbées, droites. En outre, la largeur du swirler peut évoluer entre ses bords interne et externe (cf. Figure 1.7).

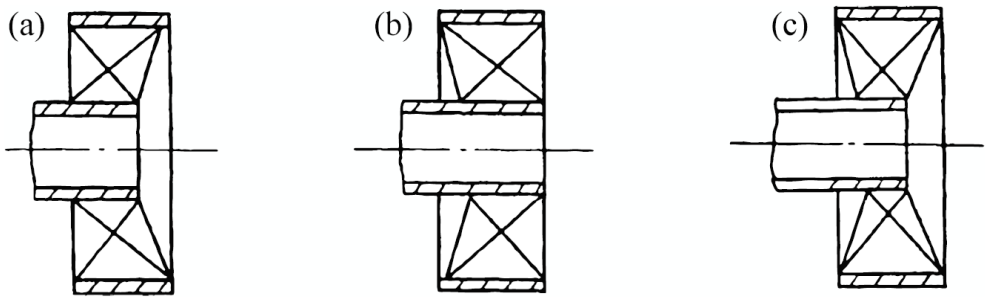


Figure 1.7: Types de swirlers à pales axiales : élargissement (a) en sortie du swirler ; (b) en entrée de swirler ; (c) en entrée et en sortie du swirler [31].

Le choix du swirler entre les configurations tangentielles et axiales et leurs déclinaisons respectives repose sur l'intensité de la rotation et les caractéristiques de l'écoulement désirées. Il reste à trouver un compromis entre obtenir un écoulement swirlé plus ou moins uniforme et le souci de minimiser les pertes de charge induites par la présence du swirler.

Récemment, dans le cas de la combustion liquide, notamment les biodiesels extraits de différents types d'huiles (huile de soja, huile de tournesol, huile de palme, huile de colza, huile d'algue, etc…) [32–35], un nouveau type d'injecteur à swirler, qui combine deux types

de fluides (gaz et liquide) adopte les deux types de swirlers présentés ci-dessus dans des injecteurs à carburants liquides.

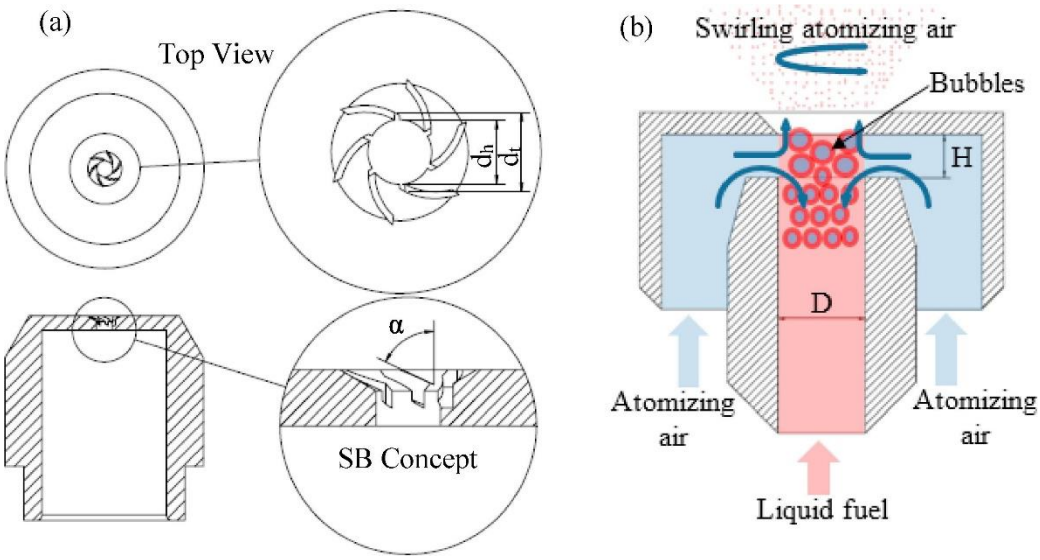


Figure 1.8: (a) Conception de l'injecteur à Swirl-Burst (b) Principe de fonctionnement de l'injecteur [36].

La Figure 1.8 représente un injecteur à swirler à pales utilisé dans la combustion du biofuel à base d'huile d'algue [36]. Le système swirlé SB (« swirl burst » en anglais) utilisé vise à désintégrer rapidement les plus grosses gouttelettes et/ou ligaments en gouttelettes plus fines, améliorant ainsi la prévaporisation du carburant et le mélange air-carburant, pour produire ainsi une combustion prémélangée stable et propre. L'utilisation de l'injecteur SB a montré que l'injecteur permet de générer l'atomisation d'air swirlé (SAA « swirl atomization air » en anglais), des gouttelettes plus fines à des emplacements axiaux dans le champ proche de la sortie de l'injecteur, un angle de pulvérisation plus large avec une fin d'atomisation antérieure par rapport à un injecteur normal à buse, donc une atomisation secondaire améliorée. Cheng et al. [37] ont développé un autre type de swirler à entrée tangentielle dans le but de réduire le diamètre des bulles et améliorer le transfert de masse. Leur étude montre que le diamètre moyen des bulles a diminué de 80,2% à 0,37 mm et le coefficient de transfert de masse a augmenté de 4,6 fois. Enfin, le système optimisé a augmenté le poids sec de la biomasse des microalgues de 49,4%.

1.3.3 Les paramètres de contrôle d'un jet swirlé en non réactif

Afin de caractériser un jet swirlé, l'intensité de rotation est une grandeur pertinente, mais elle n'est pas la seule. Les paramètres de contrôle d'un écoulement swirlé se résument principalement au nombre de swirl Sn, au nombre de Reynolds Re, à la géométrie du confinement et à la géométrie de la sortie du jet pour un jet en expansion.

1.3.3.1 Nombre de swirl

Le nombre de swirl est défini comme étant le rapport entre deux quantités intégrales : l'intégrale du flux de quantité de mouvement axial et l'intégrale du flux du moment angulaire [38]. Il est souvent utilisé pour caractériser l'intensité du mouvement de rotation. Plus ce nombre est élevé, plus l'intensité de la rotation est importante.

On le note :

$$S_n = \frac{G_\Theta}{R\ G_z} \tag{11}$$

Où :

$$\begin{cases} G_z = \int_0^R [\rho V_z^2 + (p - p_\infty)] r dr \\ G_\Theta = \int_0^R \rho V_z V_\Theta r^2 dr \end{cases} \tag{12}$$

G_Z est l'intégrale du flux de quantité de mouvement axial et G_θ est l'intégrale du flux du moment angulaire.

(V_r, V_z, V_θ, p) : les composantes du vecteur vitesse en coordonnées cylindriques (r, z, θ) et la pression statique.

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

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

Pour ramener le rapport de ces deux nombres à une grandeur sans dimension, il est d'usage de multiplier G_Z par une longueur caractéristique qui est le rayon du conduit ou du cylindre de contrôle qu'on note R. On peut aussi le noter, sous certaines hypothèses [39,40], comme suit :

$$S_n = \frac{\int_0^R \rho V_z V_\Theta r^2 dr}{R \int_0^R [\rho (V_z^2 + \frac{1}{2} V_\Theta^2] r dr} \tag{13}$$

La pertinence d'une certaine forme du nombre de swirl Sn dépend des caractéristiques du jet swirlé étudié et des hypothèses adoptées. On peut aussi, du point de vue du concepteur, évaluer un nombre de swirl dit géométrique à partir de considérations sur la géométrie du swirler [41–44]. Ainsi, dans certains cas, on arrive à retrouver le même nombre de swirl pour plusieurs configurations d'écoulement [45], mais ce nombre, étant une quantité intégrale, n'est pas capable de décrire la dynamique particulière d'un jet swirlé [38,43]. Plusieurs définitions existent dans la littérature, la thèse de Palies [46] réunit à ce jour les différentes définitions de Sn.

1.3.3.2 Nombre de Reynolds

En complément du nombre de swirl Sn, « purement dynamique », le nombre de Reynolds *Re* est un autre paramètre qui caractérise le régime de l'écoulement, et aussi un paramètre de contrôle des jets swirlés. Il compare les forces d'inertie et les forces visqueuses. Il est défini par :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{14}$$

Ce nombre permet de distinguer les régimes laminaire et turbulent d'un écoulement donné suivant une longueur caractéristique *D* de l'écoulement. La zone de recirculation d'une flamme swirlée est proportionnelle au nombre de Reynolds Re [47].

1.3.3.3 Effets du confinement

On distingue deux types d'écoulements confiné ou non confiné (libre). Dans un écoulement dit confiné, nous pouvons distinguer les cas où l'écoulement interagit avec les parois et les cas où il n'y a pas d'interaction. L'influence du confinement se traduit par des conditions aux limites particulières pour les équations de Navier et Stokes telles qu'une condition de non-glissement à la paroi pour les composantes de la vitesse par exemple. Nous définissons naturellement le confinement d'un jet comme une dilution non infinie de la matière du jet dans son environnement. Quant à la notion de confinement avec influence des parois, elle intervient lorsque la section droite d'un jet développé est supérieure à un quart de celle de l'enceinte [48]. Avec ce type de confinement proche parois, le jet peut s'y rattacher lorsque l'intensité du swirl est importante. La figure ci-dessous souligne le comportement d'un jet swirlé confiné lorsque l'intensité du swirl augmente dans une sortie divergente. La

configuration « type B », pour laquelle intervient la zone de recirculation centrale ZRC, est usuellement recherchée dans des configurations de flammes stabilisées par un swirl. Elle intervient lorsque l'intensité de la rotation atteint la valeur critique discutée plus haut. À la sortie du brûleur et dans les coins de la chambre de combustion, une partie du gaz est recirculée et nommée zone de recirculation externe (ZRE).

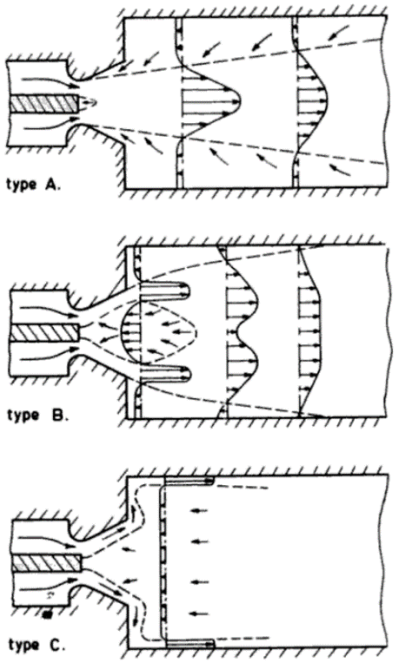


Figure 1.9: Types d'écoulements observés dans un foyer pour des jets swirlés dans une sortie divergente pour différentes intensités de swirl [49].

Numériquement, Yang *et al*. 2019 [50] ont étudié l'effet du diamètre du canal sur la combustion et le comportement thermique d'une flamme prémélangée hydrogène / air dans un microbrûleur à swirler (cf. Figure 1.10). Pour 3 diamètres différents du canal et un nombre de swirl fixe d'environ 0.82, ils ont conclu que la richesse locale était plus importante dans les zones de recirculation, ce qui confirme que les zones de recirculation ont contribué à créer un groupement radicalaire, y accrochant ainsi la flamme. Bien que des paramètres tels que le diamètre du canal, le débit massique d'entrée et la conductivité thermique de la paroi solide aient changé, la racine de la flamme était fermement ancrée à la position de départ des zones de recirculation. Ils ont constaté que l'intensité de combustion était plus forte dans le Micro Chanel avec un petit diamètre D_{in} de 2 mm, qui avait une température de paroi plus élevée. Mais, une température de paroi plus uniforme et une plus grande efficacité d'émetteur ont été obtenues dans le Micro Chanel avec D_{in} = 4 mm.

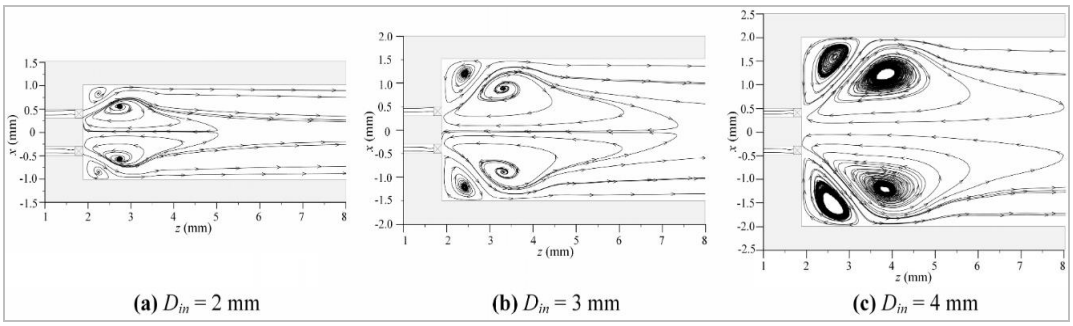


Figure 1.10 : Lignes de courant de l'écoulement dans le plan XZ dans le MC avec différents diamètres du canal [50].

1.3.3.4 Géométrie de la sortie d'un jet en expansion

La géométrie du conduit du brûleur est un paramètre indispensable pour évaluer un écoulement mis en rotation. Les différentes formes présentes dans la littérature sont représentées sur la Figure 1.11 :

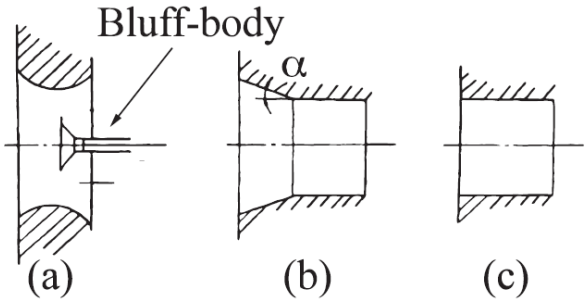


Figure 1.11: Géométries de la section de sortie d'un brûleur à jet swirlé : (a) convergente divergente avec bluff-body ; (b) divergente d'angle α ; (c) droite [31].

L'utilisation d'un accroche flamme ou d'un obstacle (Bluff-body) dans un écoulement génère un sillage qui possède comme caractéristique commune avec les jets swirlés la création d'une zone de recirculation centrale (ZRC), conséquence d'une dépression locale en aval de l'obstacle [51]. La position de l'injecteur du fuel par rapport à la tête du brûleur est un paramètre de conception important qui affecte les émissions de NOx et la stabilité de la flamme. Dans une étude plus récente de Dutka *et al.* [52], les auteurs ont pu évaluer l'effet de la géométrie et la distance entre l'injecteur et la sortie du brûleur de type PPBB « *partially premixed bluff-body* » à injection multiple de fuel sur la formation des NOx en particulier. Ils ont conclu que les émissions de NOx peuvent être réduites en déplaçant la tête de l'injecteur vers la sortie du brûleur, d'où une augmentation de la vitesse du mélange air-carburant à la sortie. Cet effet peut être dû aux changements du champ d'écoulement turbulent derrière l'injecteur, aux changements dans le mélange air-combustible, ainsi qu'à l'entraînement du

gaz de combustion de la chambre de combustion dans la zone de combustion par le courant d'air à haute vitesse. Le déplacement de l'injecteur vers la sortie du brûleur augmente les vitesses et réduit la longueur de la zone de recirculation. Cette réduction de la longueur de la zone de recirculation n'est pas due à une vitesse plus élevée à la sortie, mais est uniquement due à la modification de la géométrie du brûleur.

1.3.4 La combustion dans un écoulement swirlé

1.3.4.1 L'effet du swirl sur la combustion

Le swirl est couramment utilisé dans la combustion, car il a un rôle stabilisateur sur la flamme [53]. Un élément essentiel pour la stabilisation de la flamme est la zone de recirculation centrale ZRC dont la taille et la position varient avec l'intensité de Swirl. Celle-ci est créée et maintenue par l'air issu du swirler situé autour de l'injecteur de fuel (Figure 1.12). En plus de favoriser le mélange, elle permet d'amener des gaz brûlés vers les gaz frais. Ainsi, l'auto-allumage est continuellement assuré pour de larges gammes de pression, de vitesses et de richesses. De plus, le swirl augmente l'entraînement et augmente considérablement les limites de soufflage de flamme [54]. Néanmoins, cette zone de recirculation interne peut être associée à l'apparition des instabilités hydrodynamiques générant un retour de flamme nommé « *Vortex Breakdown* » en anglais [55]. Ce phénomène a tendance à disparaitre à fort nombre de Reynolds [56]. À faibles vitesses, l'étude de Stein et Kempf [57] montre que ce retour de flamme peut être prédit numériquement par la méthode LES « *Large Eddy Simulation* ». Généralement le nombre de swirl est supérieur à 0.6, nommé le nombre de swirl critique S_C, permettant d'obtenir un effet significatif sur le comportement de la flamme [58]. Notons que ce nombre de swirl critique dépend aussi de plusieurs paramètres comme la géométrie de l'injecteur et de la chambre de combustion, ainsi que les conditions opératoires [59].

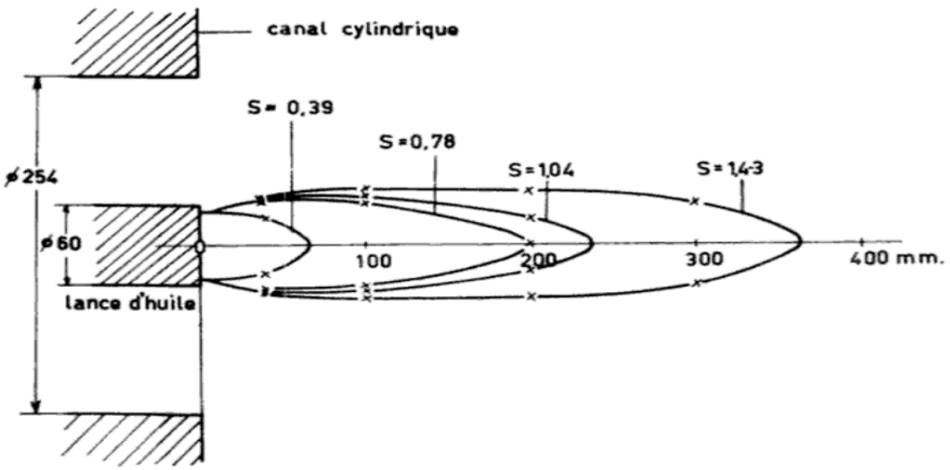


Figure 1.12: Dimension du noyau de recirculation en fonction du nombre de swirl dans un brûleur à canal cylindrique [29].

La mise en place d'un convergent ou d'un divergent à la sortie du brûleur permet d'augmenter l'expansion des lignes de courant des fluides dans la chambre de combustion [29]. L'angle du divergent joue un rôle très important sur l'organisation de l'écoulement en aval du brûleur. Il favorise aussi le débit massique inverse [38]. À forte intensité de swirl, la divergence peut être aussi un inconvénient en créant un écoulement mural «Wall jet» comme évoqué dans la Figure 1.13. Ce type de flammes est attaché à la tête du brûleur ainsi qu'aux parois de la chambre. Elles sont pratiques dans le cas des foyers qui exigent un chauffage radiatif élevé et uniforme. La longueur du divergent est aussi un paramètre à souligner, car c'est en fonction de ce paramètre qu'on définit les conditions du mélange.

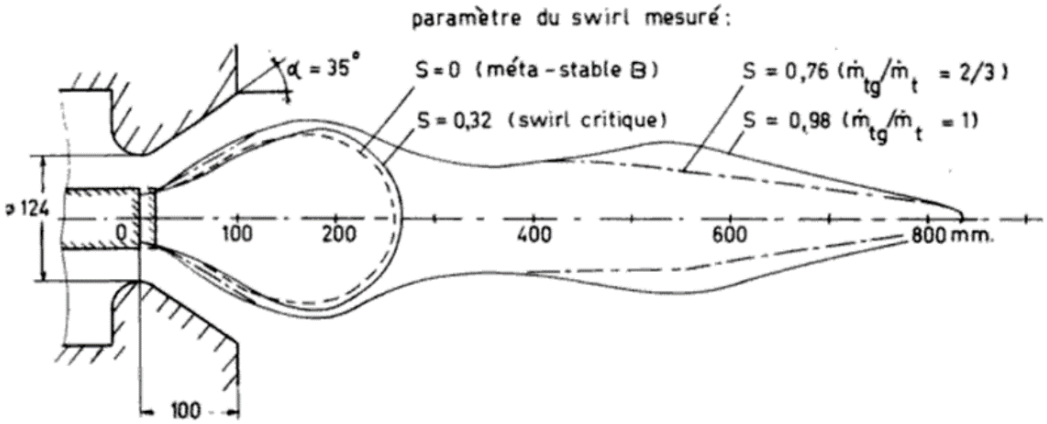


Figure 1.13: Influence d'un divergent sur la forme de la zone de recirculation pour différentes valeurs du nombre de swirl [29].

Dans la littérature, les expérimentateurs ont observé une dépendance du type d'écoulement à un paramètre qu'ils ont noté P, qui compare le diamètre du conduit du brûleur et la longueur du divergent [29]. Il s'écrit comme suit :

$$P = \frac{D_s}{L} \tag{15}$$

Où D_s est le diamètre de sortie du divergent et L la longueur du divergent. Les expériences ont été effectuées à froid dans une maquette et ont été confirmées par des essais à chaud dans un four. À chaud, le type B correspond à une flamme en boule accrochée à la sortie du brûleur, et celle de type C correspond à une flamme plate étalée sur le mur portant le brûleur. Les limites observées sont illustrées sur la Figure 1.14 et sont définies comme suit :

- P < 4 : écoulement de type B
- 4 < P < 4.5 : écoulement Bi-stable de type B ou C
- P > 4.5 : écoulement mural de type C

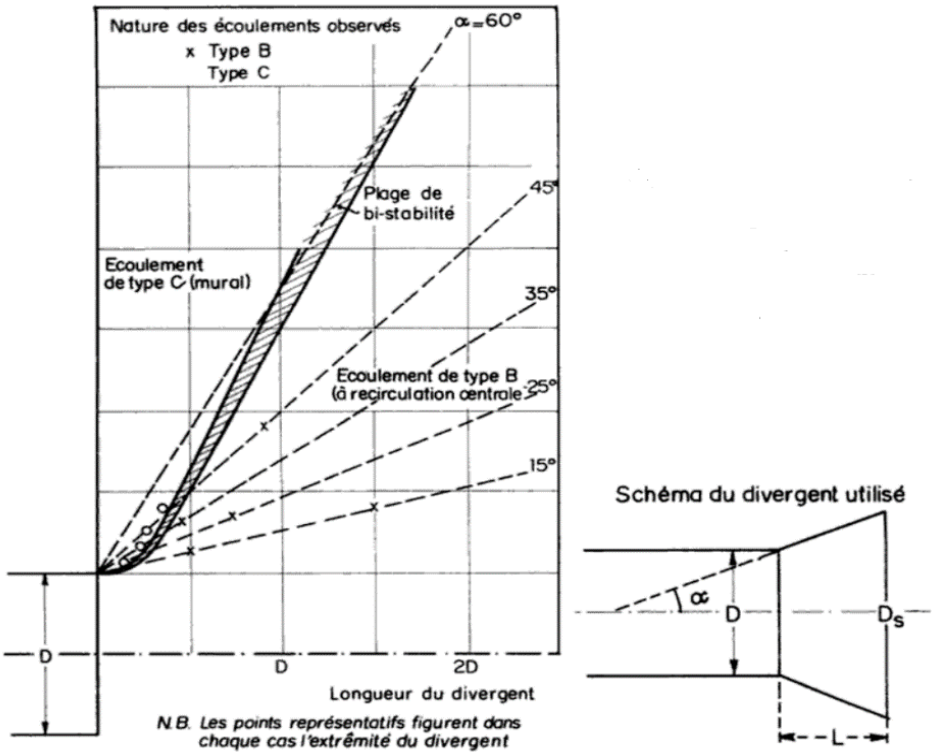


Figure 1.14: Domaines de stabilité des flammes à recirculation centrale et à écoulement mural [Monnot 1978].

Dans des études plus récentes, Therkelsen *et al.* 2011 ont étudié l'effet du divergent dans un brûleur à faible intensité de swirl sur la stabilisation de la flamme. Comparé aux flammes à

faible intensité de swirl sans le divergent, un quarl divergent peut améliorer la stabilité de la flamme, en étendant la limite de retour de flamme de 0,46 à 0,44 pour une flamme méthane / air et en améliorant la limite de retour de flamme de 0,40 à 0,55 pour une flamme hydrogène / méthane / air. De plus, le divergent peut réduire le signal acoustique de la flamme [60]. Dans les brûleurs équipés de divergent, le bord d'attaque de la flamme est situé profondément à l'intérieur du divergent. Ceci est particulièrement intéressant pour la stabilisation de la flamme, mais le mode de combustion peut passer d'une flamme prémélangée à une flamme non prémélangée. Dans une autre étude expérimentale récente, Elbaz et Roberts [61] ont caractérisé les modèles de flamme et d'écoulement dans une chambre de combustion stabilisée par swirl avec différents divergents en utilisant la PIV stéréoscopique. Ils ont observé un changement significatif des structures de flamme avec différents divergents. Ils ont supposé que le brûleur initialement conçu pour fonctionner en mode flamme prémélangée ou partiellement prémélangée aurait pu fonctionner en mode flamme de diffusion avec un niveau élevé d'émissions de suies et de NOx. Plus récemment, Becker *et al.* [24] ont effectué des mesures stéréoscopiques PIV et OH-PLIF de flammes de méthane / oxygène / dioxyde de carbone dans un brûleur à tourbillon avec un divergent. Ils ont observé une structure de flamme complexe à l'intérieur du divergent, où, dans la région proche de la buse du brûleur, une flamme partiellement prémélangée est stabilisée dans la couche de mélange entre la zone centrale de recirculation et le flux primaire. Plus en aval, la zone de réaction se déplace radialement vers l'extérieur où il n'est pas clair si la flamme est dans un mode de flamme non prémélangé ou prémélangé.

Cependant, en plus du nombre de swirl, la composition du mélange [62], la pression d'opérabilité [63], les pertes thermiques au niveau des parois [56], les instabilités thermoacoustiques [64], les instabilités hydrodynamiques provoquées par la ZRC générant le phénomène du « *Vortex breakdown* » [65,66] et l'interaction des couches de cisaillement générant un mouvement de précession PVC « *Precessing vortex core* » en anglais [67] détiennent un rôle non négligeable sur la stabilisation et la structure de la flamme swirlée.

1.3.4.2 L'effet du swirl sur la formation des NO_X

Ce type de flammes, dites swirlées, est présent dans les brûleurs bas-NOx conçus pour les chaudières et les fours industriels afin de réduire les émissions des NOx. Les efforts de développement de ce type de brûleurs sont motivés par des réglementations de plus en plus

contraignantes pour les industriels notamment en ce qui concerne les émissions de polluants. Ainsi, de nombreuses études ont pour but d'évaluer et comprendre les tendances observées sur la formation des espèces présentes dans les gaz brûlés en examinant la dynamique et le mélange en amont et dans la zone réactionnelle.

En effet, l'installation classique du swirl favorise généralement le mélange du combustible/comburant et par conséquent la stabilisation de la flamme. La conception de ces brûleurs bas-NOx change selon les constructeurs, mais repose toujours sur les mêmes principes. Les brûleurs bas-NO_x changent le mélange des réactifs tout en gardant une combustion plus au moins complète et un bon rendement, mais ont pour but de réduire les pics de température de la flamme, d'où la réduction des NO_X [68]. La mise en rotation des réactifs génère un écoulement tourbillonnaire hélicoïdal induisant un gradient radial négatif de pression vers l'axe, ce qui crée la zone de recirculation du mélange, d'où la stabilisation de la flamme. De plus, lorsque l'intensité du swirl augmente, le temps de séjour dans les régions chaudes du foyer diminue, du fait de l'augmentation de vitesse de l'écoulement recirculé. Ceci a également pour effet de limiter la formation des NOx.

On retrouve différentes techniques de réduction des NOx dans ce type de brûleurs [69], qui sont basées sur l'étagement soit de l'air soit du combustible, ce qui signifie une combustion qui a lieu successivement dans des zones à richesses différentes, ou bien basée sur la recirculation des gaz de combustion qui est le cas de notre étude. Les gaz de combustion recirculés à l'intérieur du foyer agissent comme diluants et réduisent la concentration de l'oxygène et la température, limitant ainsi la formation des NO_X. Dans une étude plus récente de Khalil et Gupta [70], dont la finalité est de réduire les NOx, une nouvelle approche de la dilution de l'air dans des conditions de combustion partiellement prémélangées est utilisée et les résultats sont comparés à l'injection prémélangée et non prémélangée d'air et de carburant. Cette approche consiste à introduire une partie du combustible dans le courant d'air et introduire une partie de l'air dans le courant de carburant de sorte que les richesses locales pour chaque flux sont bien en dehors des limites d'inflammabilité pour éliminer les instabilités et le retour de la flamme. Les résultats expérimentaux obtenus montrent des émissions ultra-faibles avec cette nouvelle technique. Avec une richesse de 0.6, l'émission de NO était inférieure de 63% au mode de combustion non prémélangée. De plus, l'émission de NO était similaire à la combustion prémélangée, avec l'avantage d'éliminer le retour de flamme et les instabilités de flamme qui prévalent souvent dans les conditions de combustion prémélangées. Mais ils prévoient des réductions plus importantes au niveau des NOx en améliorant encore

les conditions. Par ailleurs, la dilution a fourni une réduction de 50% du CO par rapport à la combustion sans prémélange.

Cheng *et al*. [71] ont constaté une diminution des oxydes d'azote dans les gaz brûlés en augmentant le nombre de swirl, et en passant d'une injection de méthane axiale à une injection radiale. Tandis que pour le CO, ils observent une tendance contraire. Ils l'expliquent par le fait que l'intensité du mélange augmente avec l'augmentation du nombre de swirl, ce qui favorise la formation d'une interruption relative des réactions d'oxydation. Schmittel *et al*. [64] ont montré que l'utilisation du swirl dans une combustion non prémélangée mène à la réduction des émissions polluantes, notamment celle des oxydes d'azote. Le brûleur est de type axial avec divergent. En effet, les auteurs examinent l'influence de la pénétration du combustible dans la ZRC (zone de recirculation centrale). Lorsque la quantité de mouvement de la ZRC positionnée au-dessus du diffuseur est suffisante, le fuel envahit la zone de recirculation et crée une ZRC riche en combustible (Figure 1.15 (a)). Dans le cas où la quantité de mouvement est insuffisante la ZRC joue un rôle d'obstacle au trajet du combustible en lui imposant de suivre les lignes de courant du jet swirlé annulaire (Figure 1.15 (b)). Ils ont constaté que pour ce dernier cas (Figure 1.15 (b)), l'augmentation du nombre de swirl conduit à la réduction du NO_X d'origine thermique. Ils expliquent cette tendance par une augmentation de la masse recirculée dans la ZRC qui conduit à un temps de séjour plus court lorsque le nombre de swirl augmente.

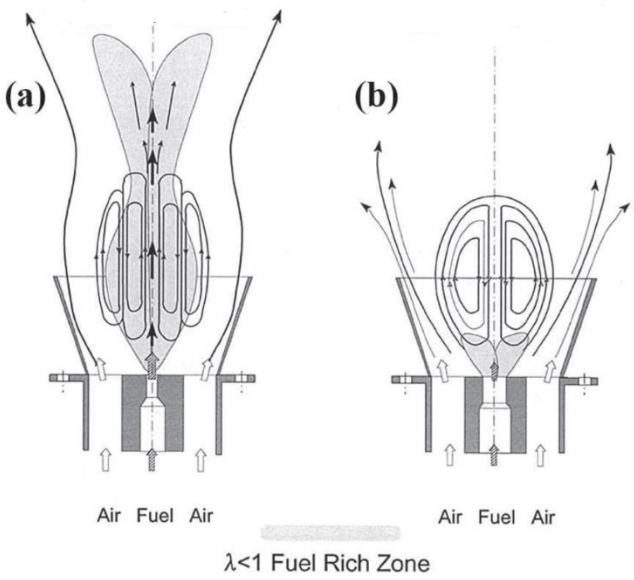


Figure 1.15: Dynamique et mélange des flammes swirlées étudiées par Schmittel et al [72].

L'étude de Coghe *et al.* [73] sur un brûleur de gaz naturel en régime pauvre a montré qu'on peut atteindre une réduction de 30 % pour un nombre de swirl entre 0.7 et 0.82. Burgette et Costa [74] ont évalué l'influence de l'intensité du swirl sur la formation des NOx en se basant sur l'angle des ailettes constituant le swirl. Ils ont montré que la plus grande valeur des NOx est atteinte à un angle de 45 °. Cependant, les émissions des NOx diminuent à un angle inférieur ou supérieur à 45 °. Les auteurs expliquent cette tendance par le fait que la recirculation débute à 45 °, par conséquent, le temps de séjour augmente proche de la sortie du brûleur, augmentant ainsi la température d'où la formation des NOx.

1.4 Voies de formation des polluants

Les finalités des travaux de recherche en combustion sont d'étudier physiquement les méthodes pour maximiser le rendement de la combustion et minimiser les émissions polluantes. Nous nous intéressons dans cette étude particulièrement à l'évolution de la formation des oxydes d'azotes (NO_x) et des oxydes de carbone (CO).

Le choix du combustible repose sur le fait que le gaz naturel est considéré comme l'un des combustibles les plus courants / préférables qui ont été utilisés pour faire fonctionner des turbines à gaz au cours des trois dernières décennies, en raison de sa pollution plus faible par rapport à d'autres types de combustibles liquides ou gazeux, avec pour objectif le contrôle de l'élévation de la température du globe [75–77]. Jaramillo *et al.* [78] ont rapporté que le gaz naturel émet 40% de CO_2 de moins que le charbon et 15% de moins que le pétrole brut.

Dans cette partie seront résumées les voies de formation des oxydes d'azote et des oxydes de carbone, très nocifs pour l'homme et responsables des pluies acides et la formation du trou d'ozone. Les mécanismes d'oxydation de CO en CO_2 et la formation des NO_x présentent des temps de réaction sensiblement plus lents par rapport aux réactions de combustion qui quant à elles ont une cinétique plus rapide.

1.4.1 Voies de formation des NO_X

Les oxydes d'azote (NO_X : NO et NO_2) sont des polluants émis par divers processus de combustion qui sont soumis à des réglementations gouvernementales de plus en plus strictes en raison de leur impact sur l'environnement et la santé humaine [79]. Dans l'oxydation des carburants hydrocarbonés, la formation de NOx est caractérisée par les différentes voies de formation suivantes [80,81] :

- *NO thermique* (mécanisme de Zeldovich *et al.* [82]) :

Ce mécanisme est principalement actif dans la zone de post-flamme, car il est relativement lent par rapport à l'oxydation du combustible. Le mécanisme de Zeldovich comprend trois étapes :

$$O + N_2 \leftrightarrow NO + N \tag{16}$$

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \tag{17}$$

$$N + OH \leftrightarrow NO + H \tag{18}$$

- *NO précoce ou prompt* (mécanisme de Fenimore [83]) :

Les réactions du NO précoce sont plus rapides que celle du NO thermique. Le NO précoce se forme à 1000 K avant que le NO thermique puisse se former, sa formation exige la présence du CH, CH_2 et C en grandes quantités dans les zones de craquage du combustible.

$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + H \tag{19}$$

$$C + N_2 \leftrightarrow CN + N \tag{20}$$

$$HCN + O \leftrightarrow NCO + H \tag{21}$$

$$NCO + H \leftrightarrow NH + CO \tag{22}$$

$$NH + H \leftrightarrow N + H_2 \tag{23}$$

$$N + OH \leftrightarrow NO + H \tag{24}$$

- *Voie de NNH*

Cette voie nécessite une forte concentration en O et H. Elle correspond à la réaction des molécules d'azote avec les atomes H, formant des radicaux NNH, qui à leur tour s'oxydent par les atomes O pour donner du NO [84] :

$$N_2 + H \leftrightarrow NNH \tag{25}$$

$$NNH + O \leftrightarrow NO + NH \tag{26}$$

- Voie *N_2O*

Dans un premier temps, le N_2O se forme directement à partir du N_2 moléculaire dans une réaction à trois corps, favorisée à haute pression, à relativement faible température (<1500 K) et dans des mélanges pauvres. Cette voie est souvent négligée à basse pression ou à pression atmosphérique [85–87].

$$O + N_2 + N \leftrightarrow N_2O + M \tag{27}$$

$$O + N_2O \leftrightarrow NO + NO \quad (28)$$

$$H + N_2O \leftrightarrow NH + NO \quad (29)$$

- *NO combustible*

Ce mécanisme est plus rapide que celui de Zeldovich, car le NO combustible est formé à partir de l'azote existant dans le combustible. Le mécanisme est complexe mais peut être exprimé de la manière suivante : l'azote du combustible volatile est transformé en HCN et NH_3 au cours du processus, le HCN réagit avec les différents radicaux présents tels que O et OH pour former des intermédiaires comme le CN, HCO et HNCO, puis avec le radical H pour former du NH et NH_2. Enfin, les radicaux NH_i réagissent avec O et OH pour former du NO [4].

En conclusion, ces voies peuvent être classées selon que le NO est rapidement produit dans le front de flamme (c'est-à-dire formation rapide de NO) via les voies rapides / NNH, ou lentement formé dans la région post-flamme (c'est-à-dire formation lente de NO) par les mécanismes thermiques / N_2O. La production rapide de NO dépend de la concentration de radicaux liés à la chimie de dégradation du carburant, tels que CH et H ; tandis que la formation lente de NO est principalement due à des températures élevées et à l'oxygène disponible. Dans le cas de la combustion du méthane, la formation des NO_x peut provenir principalement des trois premières voies.

1.4.2 Voies de formation du CO

Le CO est un intermédiaire réactionnel formé lors de l'oxydation partielle des hydrocarbures. Les causes de la formation du CO sont multiples, elle peut être favorisée lorsque les réactifs sont piégés dans les zones froides du foyer, et lorsque l'apport d'oxygène est insuffisant. Dans le cas des flammes non prémélangées, la formation du CO est naturelle en vue du manque d'homogénéité du mélange. Dans le cas d'une combustion incomplète, le monoxyde de carbone se forme selon l'équilibre de Boudouard [88] :

$$C + CO_2 \leftrightarrow 2\,CO \quad (30)$$

Les voies de formation du CO pour le méthane ont été largement présentées dans la littérature. Mathieu *et al.* [89] ont effectué une évaluation des mécanismes cinétiques détaillés modernes pour prédire la formation de CO à partir de la combustion du méthane à l'aide de

mesures d'absorption laser par tube à choc. Une analyse chimique a été réalisée avec les mécanismes suivants : Dagaut [90] et AramcoMech 3.0 [91] ainsi qu'avec le modèle GRI 3.0 [92]. La principale voie de formation de CO semble être la même pour ces trois modèles, et leurs réactions les plus sensibles ci-dessous sont également identiques.

$$H + CH_3\ (+M) \leftrightarrow CH_4\ (+M) \tag{31}$$

$$CH_4 + H \leftrightarrow CH_3 + H_2 \tag{32}$$

$$CH_3 + O \leftrightarrow CH_2O + H \tag{33}$$

$$CH_2O + H \leftrightarrow HCO + H_2 \tag{34}$$

$$HCO + M \leftrightarrow CO + H + M \tag{35}$$

Les différences dans les prévisions entre les modèles sont donc principalement dues aux différences dans les taux de certaines réactions importantes, et il reste possible de concilier les données expérimentales et les modèles avec une meilleure sélection des taux de réaction.

En effet, il est très efficace d'augmenter la turbulence dans un foyer, car elle permet d'assurer que l'ensemble des paquets de gaz rencontre la zone de réaction, vu que la majorité du CO formé est produite par les quelques pourcents de gaz qui ne sont pas portés à haute température et/ou qui n'ont pas rencontré suffisamment d'O_2 pour terminer les réactions d'oxydation. Dans ce cas, la turbulence aura pour effet d'homogénéiser le mélange, ce qui conduira à une diminution notable du CO. Les réactions qui interviennent dans l'oxydation du CO sont les suivantes :

$$CO + OH \leftrightarrow CO_2 + H \tag{36}$$

$$CO + O_2 \leftrightarrow CO_2 + O \tag{37}$$

$$H + H_2O \leftrightarrow OH + OH \tag{38}$$

$$H + O_2 \leftrightarrow OH + O \tag{39}$$

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + OH \tag{40}$$

1.5 L'enrichissement à l'oxygène

L'enrichissement en dioxygène a pour intérêt d'augmenter l'efficacité et le rendement thermique de la combustion. Ceci résulte de l'augmentation de la température permettant une amélioration des transferts thermiques et la diminution du volume de fumées [93], permettant ainsi la réduction de la taille des équipements et des systèmes de traitement correspondants.

Les vitesses de flamme laminaire ont tendance à augmenter considérablement pour la combustion du méthane avec l'air enrichi en dioxygène ou avec le dioxygène pur (oxycombustion) [94,95]. Habituellement, un oxydant constitué d'une teneur élevée en oxygène est adopté pour fournir une température très élevée. Dans le processus de fabrication du verre ou de la céramique, une flamme à haute température est utilisée [96]. Il est donc très important d'étudier les caractéristiques de la flamme sous des fractions molaires d'oxygène plus élevées.

Récemment, l'oxycombustion a attiré une attention considérable en tant qu'approche prometteuse pour la capture et la séquestration du CO_2 à faible coût (CSC) combinée à la réduction des émissions de NO_X. Les thèses de Nazim Merlo [97] et de Yukun Hu [98] donnent un aperçu global sur les effets de l'enrichissement en O_2 lié au captage du CO_2. En oxycombustion, l'oxygène est utilisé comme oxydant et les produits de combustion sont constitués essentiellement de CO_2 et H_2O. Par conséquent, un traitement simplifié des gaz de combustion par condensation de H_2O permet de capturer le CO_2, sans utiliser des méthodes de séparations coûteuses telles que l'absorption chimique (lavage aux amines), des processus d'adsorption, le fractionnement cryogénique ou des membranes [99]. Toutefois, il en résulte de cette technique des températures des flammes très élevées. Dans ce cas, des agents de dilution sont utilisés, tels que le CO_2 ou la vapeur d'eau pour le contrôle de la température de la flamme et le refroidissement des matériaux comme le montre l'étude de Figuera *et al.* [100]. Liu *et al.* [101] ont étudié numériquement les caractéristiques de l'oxycombustion du méthane dans un modèle de turbine à gaz. Ils ont conclu que plus on augmente la fraction d'oxygène dans l'oxydant, plus les limites d'inflammabilité augmentent.

Nemitallah et Habib [102] ont étudié expérimentalement et numériquement la stabilité d'une flamme de diffusion et ont précisé que cette dernière est affectée lorsque la fraction de l'oxygène dans l'oxydant est inférieure à 25%. Rashwan *et al.* [103] ont étudié l'oxycombustion des flammes partiellement prémélangées et ont rapporté que la plage de fraction d'oxygène pour obtenir une flamme stable est comprise entre 29% et 40%. De Persis *et al.* [99] ont tracé la fraction molaire des NO_X en fonction de l'enrichissement en O_2. Le graphique des émissions de NO_X par rapport au pourcentage d'O_2 donne un profil en forme de cloche avec un maximum pour 60–70% d'O_2. La diminution des NO_X après 60 à 70% d'oxygène est due à la diminution de la fraction molaire d'azote initiale. Joo *et al.* [104] ont comparé la concentration des suies des flammes de diffusion laminaires du mélange méthane/air et méthane/oxygène sur une plage de pression allant jusqu'à 60 bars. Ils ont

montré que la concentration des suies est plus importante pour le mélange méthane/air que pour le mélange méthane/oxygène (Figure 1.16).

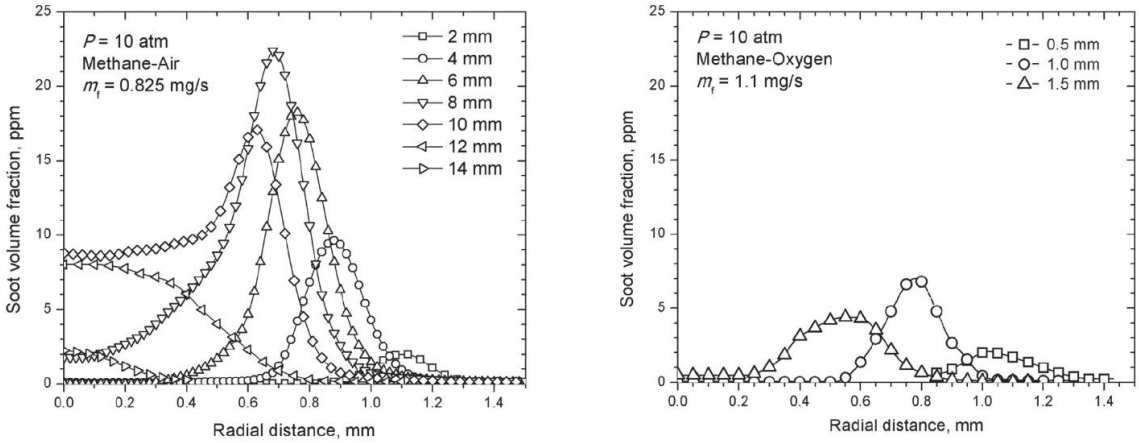


Figure 1.16: Évolution de la formation des suies à P=10 atm pour le méthane-air avec un débit m_f = 0.825mg/s et méthane-oxygène avec un débit mf = 1.1mg/s [104].

La combustion enrichie en oxygène ou bien l'oxycombustion peut améliorer le taux de transfert de chaleur et l'efficacité de combustion, tandis que les concentrations plus élevées de dioxyde de carbone et d'eau améliorent considérablement le transfert de chaleur radiatif dans le four. Un fort transfert de chaleur radiatif affecte de manière significative les distributions de température de flamme et les distributions de flux de chaleur dans les fours [105,106]. Par conséquent, plusieurs études numériques s'intéressent à la modélisation précise du transfert de chaleur radiatif pour la combustion à l'oxygène [50].

1.6 Dilution en dioxyde de carbone CO_2

Selon les caractéristiques de dilution, la dilution entraîne des modifications dans les propriétés thermodynamiques (changements dans la capacité de chaleur et du mélange) et pourrait également affecter les réactions chimiques élémentaires. D'un point de vue industriel, la dilution en CO_2 permet une augmentation du taux du CO_2 dans les gaz de combustion ce qui facilite son captage et sa compression après séchage. Les effets chimiques et de transport du CO_2 et du H_2O affectent les températures de la flamme différemment. L'addition de H_2O favorise la concentration de OH tandis que l'addition de CO_2 diminue la concentration en OH en supprimant ces réactions [107] :

$$H + O_2 \leftrightarrow O + OH \quad (41)$$

$$O + H_2O \leftrightarrow 2OH \quad (42)$$

Pour une oxyflamme de méthane non prémélangée diluée en CO_2, la carte de la stabilité de la flamme présentée dans la Figure 1.17 est divisée en trois zones [108] : la zone de flamme attachée, la zone de flamme liftée et la zone de soufflage. L'augmentation de la fraction molaire de CO_2 dans l'oxydant diminue la zone d'inflammabilité de ce type de flamme. Le comportement d'une flamme (limite d'extinction, hauteur de décrochage, rayon de flamme) peut présenter un comportement de référence pour d'autres flammes diluées avec un diluant chimiquement faible [109].

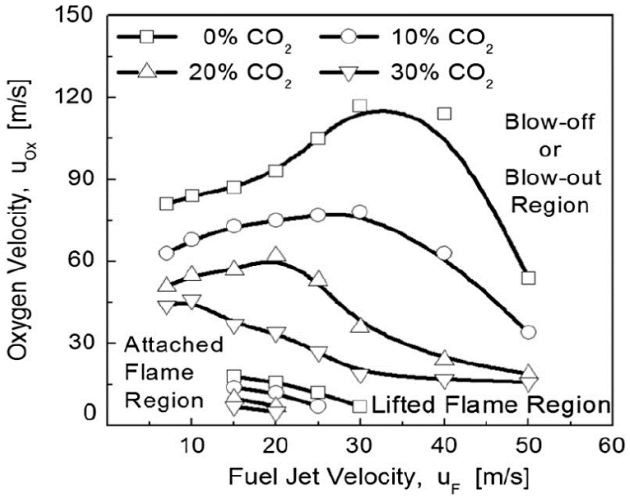


Figure 1.17: Courbes de stabilisation de la flamme : effet de la dilution en CO_2 dans l'oxydant sur la stabilisation de la flamme [108].

Il a été montré par plusieurs auteurs [110,111] que la plus grande diminution de la vitesse laminaire de combustion est obtenue pour la dilution avec le dioxyde de carbone. Ceci peut être expliqué par l'effet de la capacité thermique et la dissociation du dioxyde de carbone. La chaleur spécifique élevée du CO_2 est importante, ce qui réduit généralement le taux de dégagement de chaleur global et donc la vitesse de combustion du mélange [112]. D'autres travaux [113] concernant principalement les flammes de diffusion ont montré que la dilution en CO_2 implique une diminution de la température de la flamme, et par conséquent celle de la formation de NO thermique (voir Figure 1.18). L'étude expérimentale de Branco *et al.* [114] sur des flammes de diffusion turbulentes a montré que l'addition de CO_2 à l'oxydant force la réaction à se dérouler plus loin en aval, abaisse l'intensité d'OH et supprime la formation de NO. Cette baisse de température joue un rôle très important sur la durabilité du brûleur utilisé, car le dioxyde de carbone permet de réduire la chaleur spécifique du mélange d'où la réduction de la température de flamme.

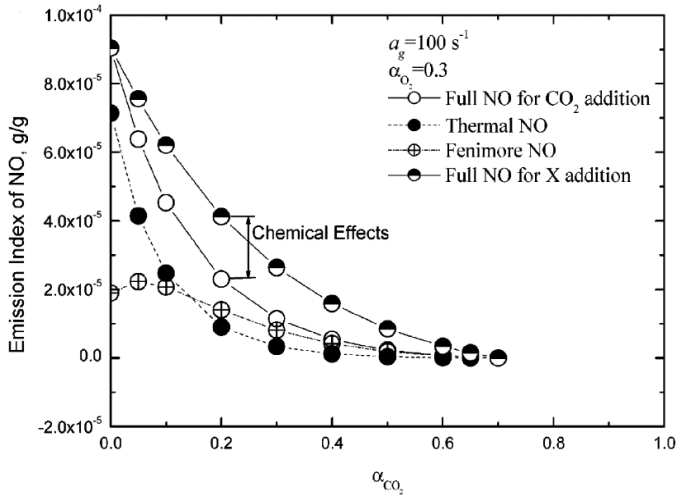


Figure 1.18: Indice de variation des NOx en fonction de la fraction molaire recirculé du CO_2 avec $\alpha_{O_2} = 0.3$ *[113].*

Erete *et al*. [115] ont effectué une étude détaillée sur les effets du CO_2 sur une flamme de diffusion méthane/air. Ils ont constaté que la luminosité de la flamme diminue avec l'augmentation de la concentration du diluant. Une augmentation significative de la hauteur d'accrochage de la flamme et une diminution de la longueur globale visible de la flamme sont observées avec l'augmentation des niveaux de dilution du CO_2, concluant ainsi que le soufflage de la flamme est très sensible au taux de dilution en CO_2. Ils ont lié la diminution de la température de la flamme à la réduction de la concentration des espèces radicalaires dans la flamme, avec une augmentation de la capacité thermique du mélange non brûlé affectant de la même manière les températures de la flamme introduisant une réduction des NO_X. Ils ont constaté que la dilution du CO_2 entraîne une augmentation de l'EICO (« *Emission Index of CO* » en anglais) et une diminution de l'EINOx (« *Emission Index of NO_X* » en anglais) au nombre de Reynolds allant de 1584 à 14 254. Des expériences et des simulations numériques sur PREMIX menées par Qiao *et al.* [116] sur des flammes prémélangées de méthane (Figure 1.19), ont quantifié pas à pas l'évolution de la vitesse de propagation de flamme laminaire S_L en fonction de la concentration molaire de diluant ajouté. Les résultats indiquent une diminution systématique de S_L avec la fraction molaire de diluant dont la plus forte est imposée par le CO_2.

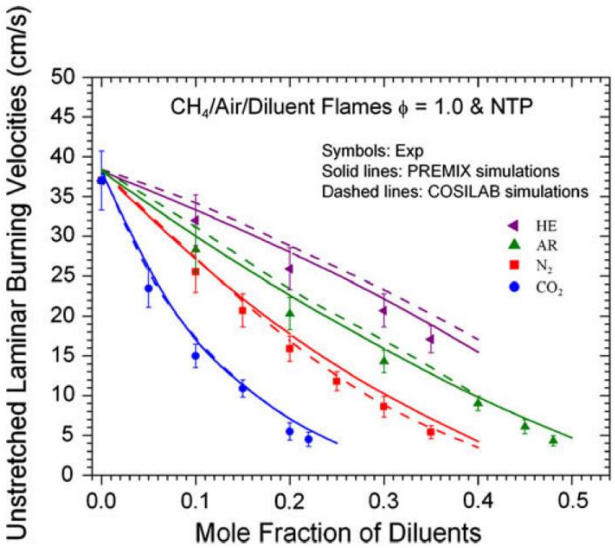


Figure 1.19: Vitesse de flamme laminaire en fonction de la fraction molaire de différents diluants (CO_2, N_2 Ar et He) pour une flamme prémélangée méthane/air/diluant à la stœchiométrie [116].

De Persis *et al.* [99] ont étudié expérimentalement et numériquement les effets de l'enrichissement et de la dilution en CO_2 sur des flammes laminaires de méthane. Ils ont varié l'enrichissement en O_2 de 21% à 100% et la fraction volumique du CO_2 de 0% à 40%. Ils ont constaté que les vitesses de flamme laminaire augmentent avec l'enrichissement à l'oxygène, quelles que soient les fractions volumiques de CO_2 ajoutées au mélange. Pour un taux d'enrichissement donné, les vitesses de flamme laminaire diminuent lorsque la fraction volumique de CO_2 dans le mélange augmente. Ils ont montré aussi que le CO_2 a un effet chimique, qui augmente avec le taux d'enrichissement et l'addition de CO_2. La réaction responsable des effets chimiques du CO_2 s'est avérée être dans la littérature $CO_2 + H = CO + OH$ qui favorise la consommation d'atomes H avec O_2 [117]. En ce qui concerne les NO_X, les résultats numériques montrent que la combustion enrichie en oxygène (60–80% O_2) permet d'obtenir une teneur élevée en CO_2 dans les gaz d'échappement tout en garantissant de faibles émissions de NOx à condition de diluer le mélange gazeux initial par de grandes quantités de CO_2.

Pour les suies, Billaud *et al.* [118] ont considéré que la dilution en CO_2 dans le but de réduire les suies est contingente, car ils ont constaté une légère diminution, voire négligeable, de suies en ajoutant du CO_2, sans ignorer le fait que cet ajout va certainement diminuer le rendement énergétique du processus. L'étude de Liu *et al.* [119] a montré que le dioxyde de carbone est encore plus efficace que l'azote pour supprimer la formation de suies à des pressions élevées jusqu'à 20 atm en raison de son effet chimique supplémentaire. Par contre, en termes de stabilité, Jourdaine *et al.* [120] ont comparé la stabilité d'une flamme swirlée de

prémélange oxy-méthane-CO_2 avec une flamme méthane-air. Ils ont constaté que les flammes diluées au CO_2 sont moins stables que les flammes diluées au N_2. La Figure 1.20 montre que la flamme a tendance à se détacher du brûleur dans le cas de la dilution en CO_2 contrairement au cas de la dilution en N_2.

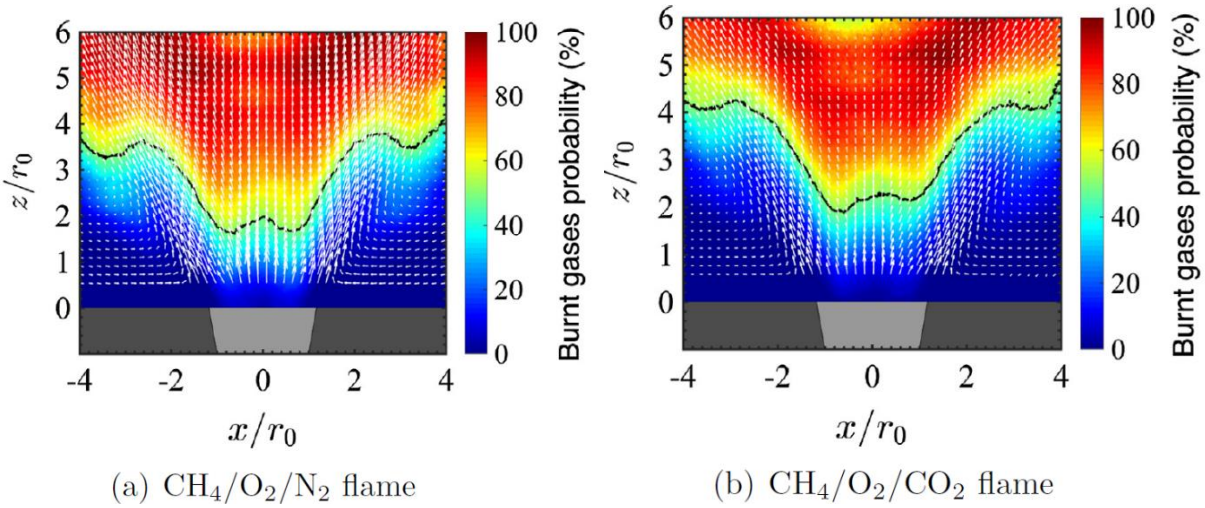


Figure 1.20: Probabilité des gaz brûlés dans un plan axial avec les champs de vitesse 2D superposés. La ligne noire délimite les positions où les gaz brûlés chauds sont présents 50% du temps. ϕ= 0.95; P=13 kW, S0=0.75 et Tad=2200 K [120].

1.7 Dilution en vapeur d'eau H_2O

Un certain nombre d'études ont traité l'influence de la vapeur sur le processus de combustion. Il a été démontré que la dilution par la vapeur peut avoir une forte influence sur le processus de combustion et peut avoir certains avantages. Par exemple, l'utilisation de H_2O au lieu du recyclage des gaz de combustion est plus simple et nécessite moins d'énergie ; de plus l'ajout de H_2O favorise chimiquement la combustion du CO par la voie suivante [121]:

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \qquad (43)$$

Certaines études ont trouvé que l'addition d'eau influence fortement la vitesse de flamme laminaire [122–124]. Ils ont montré que la vitesse de flamme laminaire diminue en augmentant la fraction de H_2O dans le mélange. L'effet chimique est généralement négligeable indépendamment du taux de dilution [125] et la capacité calorifique des gaz semble avoir un effet prédominant sur la vitesse de flamme. L'ajout de la vapeur d'eau diminue la température de la flamme, modifie le processus de réaction chimique et modifie la concentration de radicaux libres dans la flamme en affectant les concentrations des chaînes de O, OH et H [126].

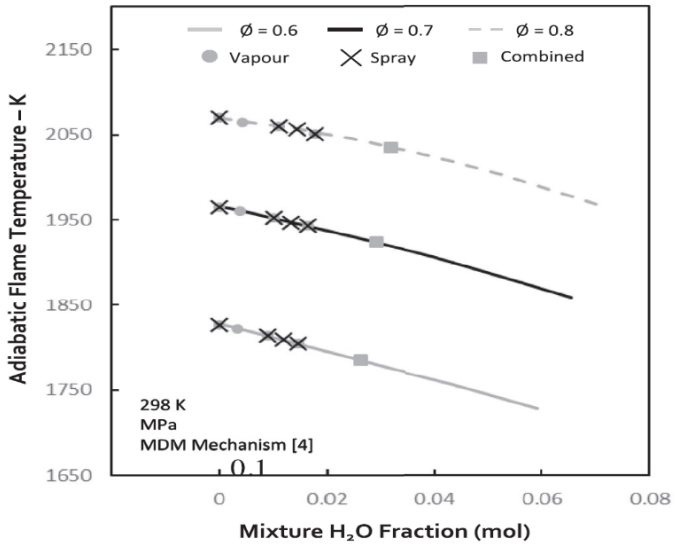


Figure 1.21: Évolution de la température adiabatique de flamme en fonction de la fraction de vapeur d'eau à 0.6, 0.7 et 0.8 (numérique et expérimental) [127].

L'eau fournit deux influences concurrentes sur la propagation de la flamme prémélangée. D'abord, elle agit comme un diluant et la réaction est ralentie par une réduction de la température de la flamme adiabatique comme le montre la Figure 1.21 [127]. Le deuxième effet résulte des changements dans la thermochimie des flammes et une augmentation du taux de réaction global en raison de la production dissociative d'espèces porteuses de chaînes (telles que OH) et un taux de libération de chaleur amélioré. Chen *et al.* [128] ont trouvé que l'addition de vapeur d'eau favorise la concentration en OH (voir équations 40 et 41) qui résulte en une intensité de combustion plus importante, et par conséquent une diminution de la longueur et du rayon de flamme. Gu *et al.* [129] ont noté que l'ajout de la vapeur d'eau influence aussi la stabilité de la flamme en réduisant la zone de recirculation du mélange. En ce qui concerne les émissions de NO_x, l'injection de vapeur d'eau est susceptible d'affecter leur formation de deux façons : elle réduit la température de la flamme et défavorise ainsi la voie de formation de NOx thermique qui contribue le plus aux émissions globales de NO_x à des températures supérieures à environ 1800 K. La vapeur d'eau a également une influence chimique. L'augmentation de la concentration de vapeur, associée à une réduction des concentrations d'oxygène et d'azote, affecte la cinétique de réaction en modifiant la concentration d'espèces actives impliquées dans la formation de NO_x. Dans le cas des flammes CH_4-air et gaz naturel-air, Le Cong et Dagaut [90] ont montré que l'addition de vapeur d'eau entraîne une vitesse de flamme plus basse, une température adiabatique inférieure et une formation réduite de NOx. Les analyses cinétiques indiquent que la réduction de l'émission de NO par injection de H_2O est principalement due à la dilution, à la réduction

de la concentration de N_2 et aux effets thermiques. L'influence de l'expansion de la vapeur d'eau sur les différentes voies de formation est signalée différemment dans la littérature. Pour une flamme de diffusion de gaz naturel, Meng *et al.* [130] ont constaté que la vapeur d'eau conduit à des émissions élevées à travers la voie thermique, mais elle est contrainte dans son ensemble par des signaux de NO_x significativement plus faibles.

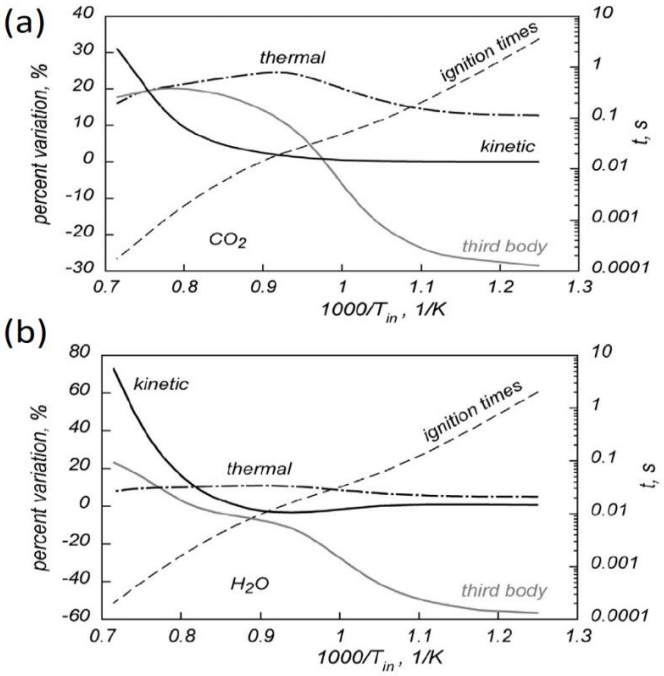


Figure 1.22: Effets chimiques et thermiques de CO_2 (a) et H_2O (b) sur les délais d'auto-inflammation [131].

La vapeur d'eau agit dans certains cas comme étant la troisième espèce de la réaction (three body reaction). À basse température, la Figure 1.22 montre que l'ajout de vapeur d'eau diminue les délais d'auto-inflammation en favorisant les réactions de branchement à basse température [131]:

$$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M \quad (44)$$

$$H_2O_2 + M \leftrightarrow 2OH + M \quad (45)$$

Une grande quantité de vapeur d'eau ajoutée entraîne des effets complexes du troisième corps en défavorisant la combustion et en diminuant la concentration des radicaux libres (O, H, OH) dans la zone de réaction chimique, ce qui entraîne un déplacement en aval du front de flamme [130]. L'étude de Zhang *et al.* [132] montre que cette recombinaison de réaction à trois corps augmente considérablement l'énergie minimum d'allumage et diminue les limites de dilution. Chica Cano *et al.* [133] ont étudié expérimentalement et numériquement les effets de la dilution de l'eau et de l'enrichissement en oxygène sur les vitesses de combustion laminaires

fondamentales des mélanges CH_4 / O_2 / N_2 / H_2O. Ils ont remarqué une grande différence entre la vitesse fondamentale laminaire de combustion avec et sans eau, de l'ordre de 10 $cm.s^{-1}$. Ces résultats montrent que H_2O a un effet chimique. Cependant, pour un enrichissement en oxygène donné, la vitesse de la flamme laminaire diminue lorsque la dilution de H_2O augmente. L'augmentation de la teneur en eau dans le mélange diminue non seulement la vitesse de la flamme laminaire, mais également la température de la flamme, ce qui affecte directement la diffusivité thermique. De plus, la teneur en carburant sera remplacée par l'augmentation de la teneur en oxygène et la dilution de l'eau induisant une réduction de la teneur en énergie du mélange.

1.8 Dilution en gaz de combustion EGR

La recirculation des gaz d'échappement (EGR « *Exhaust Gas Recirculation* » en anglais) est une méthode avantageuse utilisée pour atténuer les émissions de NO en réduisant la concentration d'oxygène dans le mélange réactif, et pour un dégagement de chaleur constant, réduire les températures des flammes [134,135]. Pour un mélange méthane / air à la stœchiométrie, la composition molaire des EGR est 0.0948 CO_2 + 0.1896 H_2O + 0.7156 N_2 pour une mole de méthane [136]. En pratique, les gaz d'échappement peuvent être recirculés soit à l'intérieur soit à l'extérieur. Les applications EGR externes courantes incluent les moteurs à essence et diesel lourds [137], tandis que les techniques EGR internes sont utilisées dans les fours industriels [138] et les moteurs à turbine à gaz [134,139,140]. En plus de la réduction des émissions de NO et des autres avantages discutés par Amato *et al.* [134], il a également été démontré que la dilution EGR augmente le taux de déformation d'extinction (« extinction strain rate » en anglais) des combustibles hydrocarbonés pour une température de combustion donnée, les flammes O_2/CO_2 et $O_2/CO_2/H_2O$ sont environ 30% plus difficiles à éteindre que les flammes O_2/N_2 [141], réduit les coûts des processus de captage du CO_2 (CCS : « CO_2 capture and storage » en anglais) [142], et permet ainsi d'atténuer les effets de surchauffe des chambres de combustion dans les applications oxycombustibles [143].

Lipardi *et al.* [144] ont effectué une étude sur des flammes CH_4-air diluées aux gaz de combustion EGR, prémélangées, à des températures de combustion constantes dans le but d'observer les effets sur les mesures de NO, de température et de vitesse de flamme à pression atmosphérique. Les résultats expérimentaux sont comparés aux simulations obtenues avec CHEMKIN-Pro® en utilisant les mécanismes thermochimiques GRI-Mech 3.0, San Diego 2005 (SD) et Combustion Science and Engineering (CSE). La Figure 1.23 illustre les

contributions relatives de chaque voie de formation de NO_X pour les cas avec et sans dilution à 1850 K pour les trois différents mécanismes. Le graphique à barres est organisé de telle sorte que la concentration de NO produite par chaque voie est regroupée par les catégories de formation de front de flamme et de post-flamme. La dilution EGR tend à augmenter le poids relatif de la voie de formation rapide de NO et à réduire la contribution des deux mécanismes de formation lente de NO. Ce changement est dû à la concentration en oxygène réduite qui atténue la quantité de radicaux O importants pour les voies thermiques et N_2O, tandis que la vitesse de flamme réduite augmente le temps de séjour dans la flamme et augmente la production de NO par les voies rapides précoce et NNH. Ils ont aussi constaté que la diminution de la concentration en oxygène induite par la dilution produit une réduction de la vitesse de flamme de référence d'un facteur de 2 pour les deux températures de flamme étudiées.

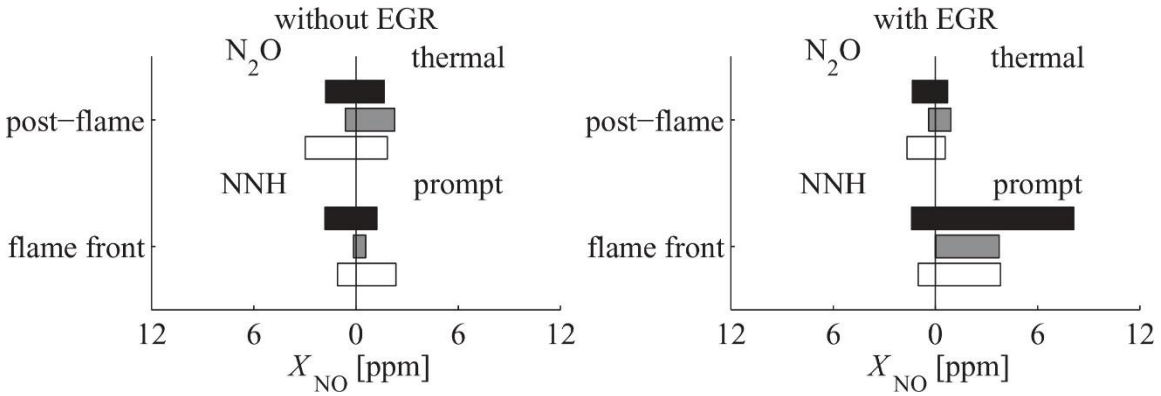


Figure 1.23 : Contributions relatives de chaque voie de formation de NOx à la valeur totale simulée d'oxyde nitrique prédite par les trois modèles pour les deux niveaux de dilution EGR à 1850 K. Les résultats « sans EGR » se produisent à $\phi \sim 0{,}69$ à 0% EGR. Les résultats « avec EGR » se produisent à $\phi \sim 1$ à 27% d'EGR. Légende : Noir : GRI, Gris : SD, Blanc : CSE. [144].

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé dans un premier temps, les aspects fondamentaux des flammes de diffusion. Le régime turbulent des flammes de diffusion est ensuite abordé, en mettant le point sur les différentes hypothèses et diagrammes de combustion issus de la littérature. Ensuite, la phénoménologie et la dynamique des jets swirlées sont discutées dans la deuxième partie. Une synthèse des différentes techniques de mise en rotation d'un jet ainsi que les paramètres de contrôle correspondants (nombre de swirl et de Reynolds, la géométrie du brûleur et aussi celle du confinement) est effectuée. Par la suite, nous avons évoqué l'influence de la combustion sur un jet swirlé, l'influence du swirl, notamment la géométrie et

les différents types d'injection du mélange, sur la structure de la flamme ainsi que sur la formation de polluants, les NO_X en particulier.

Après avoir dressé un aperçu général sur les aspects dynamiques des écoulements swirlés en non réactif et en réactif, une synthèse bibliographique sur les spécificités des flammes swirlées enrichies à l'oxygène et diluées en gaz de combustion est effectuée, notamment sur la formation des polluants. Dans un premier lieu, nous avons abordé les différentes voies de formation des polluants (NO_X et CO) en identifiant les étapes clés issues de la littérature. Ensuite les caractéristiques de la combustion à l'air enrichi en oxygène et dilué aux composants des gaz d'échappement (CO_2 et/ou H_2O) sont reliées aux problématiques industrielles et environnementales. Cet état de l'art est effectué pour souligner le manque d'informations sur ce type d'étude et de mettre en évidence l'importance des études combinant les effets de l'enrichissement en oxygène et de la dilution en gaz de combustion sur les flammes turbulentes swirlées. Après avoir évoqué tous ces différents aspects, nous allons passer à l'approche expérimentale. Les différents outils expérimentaux utilisés et mis en œuvre pour réaliser ce présent travail sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 2. Outils expérimentaux

2.1 Introduction 47

2.2 Présentation du dispositif expérimental 47

2.2.1 Brûleur coaxial à swirl 47

2.2.2 Chambre de combustion 49

2.2.3 Générateur de vapeur d'eau 52

2.3 Techniques de mesure 53

2.3.1 Analyse des gaz de fumées 53

2.3.2 Technique de chimiluminescence OH* 54

2.3.3 Utilisation de plasma type arc glissant sur la flamme 58

2.3.4 La Vélocimétrie Laser à effet Doppler LDV 62

2.3.5 Vélocimétrie par imagerie de particule (PIV) 66

2.4 Paramètres opératoires de l'étude 74

2.4.1 Paramètres de l'étude 74

2.4.2 Conditions opératoires 77

2.5 Conclusion 79

2.1 Introduction

Nous avons utilisé durant cette thèse une installation expérimentale permettant d'étudier la combustion dans un four à l'échelle de la dizaine de kilowatts. Cette dernière a été conçue et réalisée durant les travaux de thèse de N. Merlo [97]. Des modifications ont été apportées durant ce travail concernant l'installation du système d'injection de la vapeur d'eau et le système de chauffage correspondant. L'installation sans les techniques de mesures, comprend principalement une chambre de combustion, un panneau d'alimentation en gaz, un panneau d'alimentation en vapeur d'eau, des systèmes de chauffage et l'ensemble des connectiques gaz, eau et électriques.

Ce chapitre est scindé en deux grandes parties. La première partie est dédiée à la description du dispositif expérimental utilisé pendant cette thèse. Dans un premier temps, le brûleur coaxial et la chambre de combustion sont présentés. Ensuite, nous décrirons le système d'évaporation et de chauffage mis en place afin d'assurer le passage de la vapeur d'eau et éviter sa condensation. Dans la seconde partie, nous présenterons les différentes techniques de mesure adoptées pour caractériser la structure de la flamme, les champs dynamiques de l'écoulement et les émissions polluantes. Il s'agit notamment de la mesure des concentrations des polluants dans les fumées par analyseurs multigaz, de la visualisation du front de flamme par imagerie de chimiluminescence sur OH*, de l'étude de l'effet d'une décharge plasma sur les caractéristiques de la flamme, des mesures des vitesses d'écoulement par vélocimétrie laser à effet doppler (LDV) en 2D et finalement la caractérisation des champs de vitesses des écoulements swirlés grâce à la technique de vélocimétrie par images de particules à trois dimensions (Stéréo-PIV).

2.2 Présentation du dispositif expérimental

2.2.1 Brûleur coaxial à swirl

Les expériences ont été réalisées avec un brûleur coaxial à swirl. Ce dernier a été utilisé précédemment par Merlo [97] et Olivani [145] dans leurs travaux de thèse. La Figure 2.1 illustre une représentation schématique détaillée du brûleur coaxial à swirl utilisé. Ce dernier comprend plusieurs éléments : le tube central (diamètre extérieur de 15 mm et diamètre intérieur de 12 mm) qui dirige le méthane jusqu'à la tête de l'injecteur. Ce dernier est placé à l'extrémité du tube central, il comporte 8 trous de 3 mm de diamètre uniformément répartis, permettant l'injection radiale au voisinage de la sortie du brûleur. Les quatre tubes placés en

bas du brûleur assurent l'arrivée d'air co-courant en passant par une zone de tranquillisation à l'aide de billes en verre placées dans le tube coaxial de 38 mm de diamètre. Les différents swirlers utilisés sont en acier inoxydable conçus grâce à la technique de frittage de poudre métallique (DMLS : Direct Metal Laser Sintering) en impression 3D. Ces derniers ont été disposés dans le tube coaxial d'air et fixé à -55 mm du plan de sortie du brûleur. Ils comportent 8 pales avec des orientations dépendantes du nombre de swirl souhaité (voir Tableau 2.1). Un collier chauffant est placé à l'extérieur du tube coaxial dans le but de chauffer le brûleur et assurer ainsi, dans le cas de la dilution en H_2O, le passage de la vapeur d'eau en état gazeux.

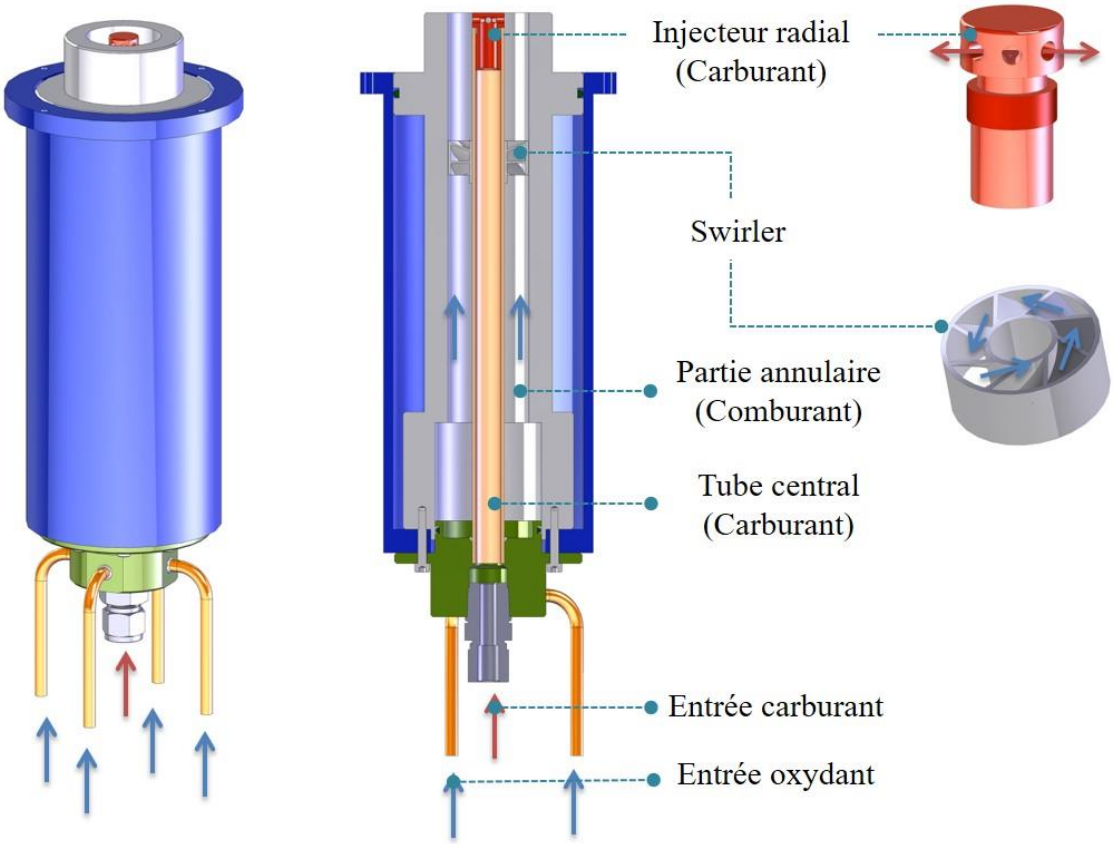


Figure 2.1 Schéma du brûleur coaxial à swirl.

Tableau 2.1 : Dimensions de deux différents swirlers utilisés dans cette étude.

	R (mm)	R_h(mm)	α (°)
Sn = 0.8	17.5	8.8	47
Sn = 1.4	17.5	8.8	60

Où R_h désigne le rayon interne, R le rayon externe, et α l'angle de la pale sur le bord externe du swirler comme le montre l'ensemble des Figure 2.2.

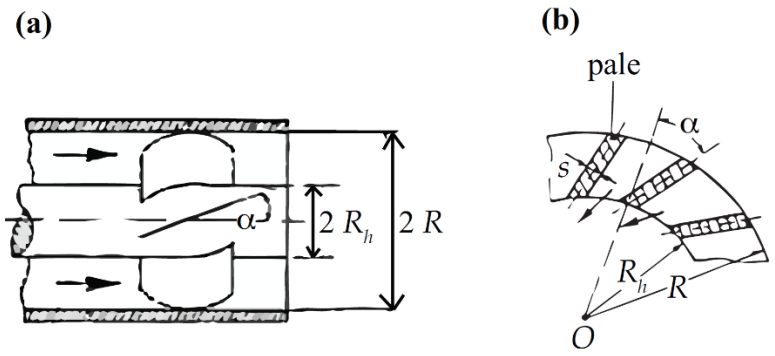
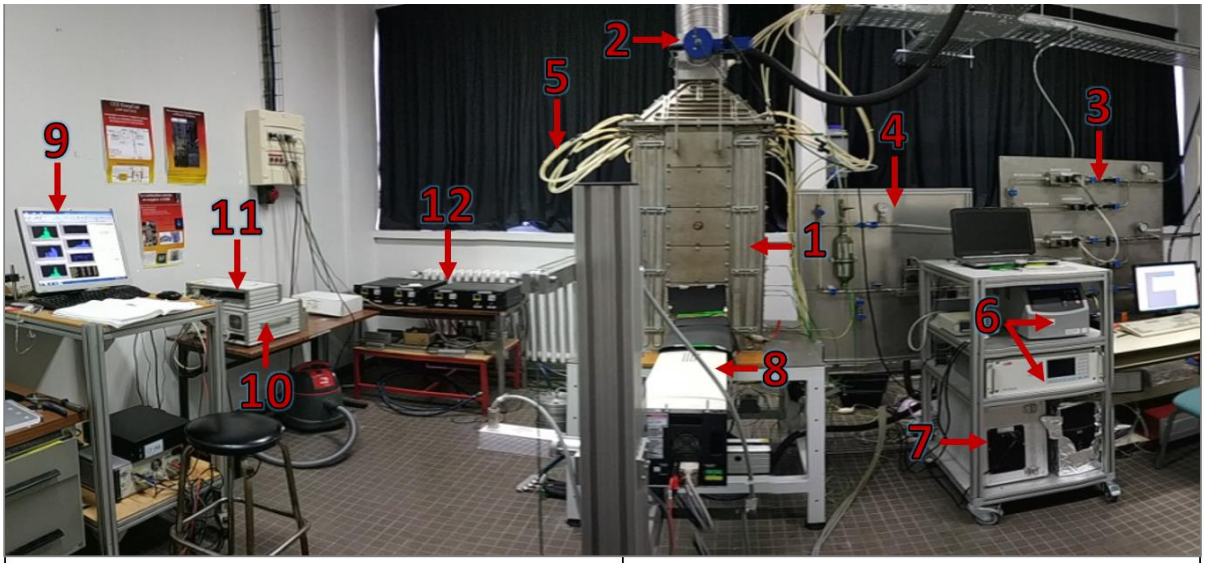


Figure 2.2 : Paramètres géométriques du swirler [38] : (a) coupe longitudinale, (b) coupe transverse.

Afin de minimiser l'effet de blocage sur l'écoulement, l'épaisseur des pales s est de 1 mm et l'épaisseur des diamètres concentriques est de 1,3 mm. Les pales ont fait l'objet d'un dimensionnement particulier, l'épaisseur étant conditionnée par deux aspects contradictoires : la réalisation pratique encourage des épaisseurs supérieures à 1 mm alors que la mécanique des fluides nécessite des ratios de blocage les plus faibles possible. Par ailleurs, le choix d'une épaisseur des pales sera conditionné par la technique de réalisation retenue. Ainsi, le frittage de poudres par laser permet une épaisseur de 0,8 mm, la stéréolithographie autorise 0,5 mm, l'impression 3D par dépôt de fil fondu (ABS pour Acrylonitrile Butadiène Styrène) nécessite 1,3 mm.

2.2.2 Chambre de combustion

Nous détaillons dans cette partie les caractéristiques de la chambre de combustion. La Figure 2.3 représente une photographie de l'installation expérimentale accompagnée des diagnostics d'analyse des gaz et de la technique LDV « Laser Doppler Velocimetry » que nous détaillerons plus tard. La chambre de combustion fixée sur un châssis, en en acier inoxydable, est à section carrée de 48x48 cm² avec une hauteur de 1 m. Le haut de la chambre présente un convergent de 20 cm de hauteur avec une section circulaire de 10 cm à la sortie de la chambre. Cette dernière est reliée au tube d'extraction limitant ainsi les infiltrations d'air par le dessus. La chambre de combustion fonctionne à une puissance nominale de 25 kW à pression atmosphérique.



1. Chambre de combustion	**7.** Groupe Froid
2. Sonde de prélèvement	**8.** Laser/sonde LDV
3. Panneau d'alimentation en gaz	**9.** PC d'acquisition
4. Panneau d'alimentation en vapeur d'eau	**10.** Processeur signal FSA
5. Circuit eau de refroidissement	**11.** Photo-détecteur PDM
6. Analyseurs des gaz de fumées	**12.** Régulateurs du système de chauffage

Figure 2.3 : Chambre de combustion et éléments du dispositif expérimental.

La chambre de combustion est recouverte à l'intérieur d'une laine céramique réfractaire souple de faible conductivité thermique (~0,08 W/(m.K) à 300 °C). Ce type de laine réfractaire assure une excellente résistance à haute température, une bonne isolation de l'environnement chaud de la flamme du milieu extérieur et aussi la protection des parois internes de la chambre du contact direct avec les produits de combustion sans aucun risque de toxicité. Les murs de la chambre sont refroidis par l'extérieur via une circulation d'eau, à température ambiante et en circuit ouvert. L'eau passe dans des tubes en acier inoxydable placés en contact direct avec les parois externes de la chambre. Le débit principal d'eau de refroidissement est divisé en 8 sous-débits par un manifold qui comporte des vannes d'équilibrage. Une étude thermique de la chambre de combustion a été présentée dans la thèse de Merlo [97].

Les accès optiques à la flamme dans un foyer de combustion sont des éléments majeurs dans les études des structures de la flamme. Dans cette perspective, six fenêtres de

visualisation de tailles différentes sont découpées sur les quatre faces de la chambre (80 x 120 mm pour les petites ouvertures et 120 x 200 mm pour les grandes), permettant ainsi l'utilisation de diagnostics optiques à différentes hauteurs. Les ouvertures peuvent accueillir des hublots en quartz ou bien des plaques en acier inoxydable en fonction de ce que l'on souhaite visualiser.

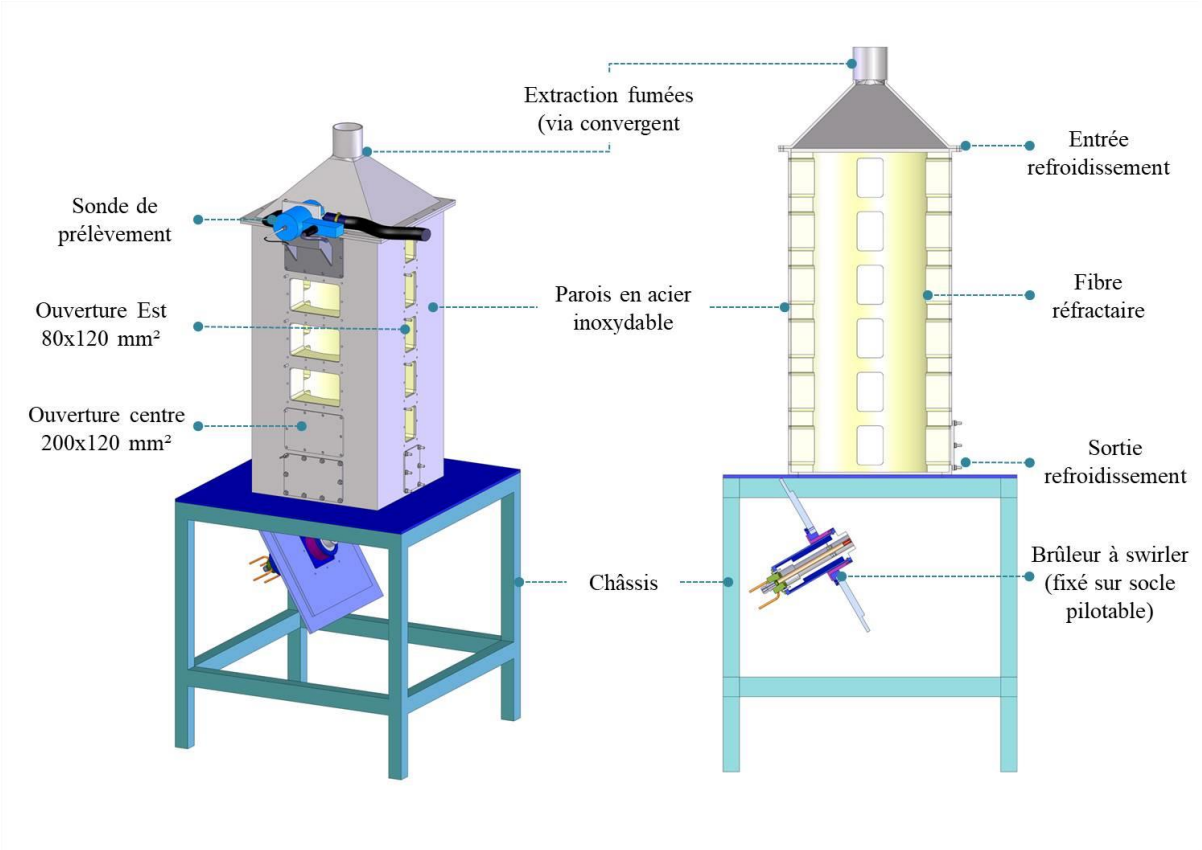


Figure 2.4 : Représentation schématique de la chambre de combustion

Le brûleur placé au-dessous de la chambre de combustion (voir Figure 2.4) est alimenté par différents gaz provenant de deux panneaux d'alimentation différents. Le premier panneau d'alimentation est dédié aux débitmètres gazeux. La régulation des gaz (air, CH_4, CO_2 et O_2) est assurée par des débitmètres massiques thermiques de type Brooks *SLA* 5851S et 5853S. Le méthane est issu de bouteilles pressurisées (qualité G20™ de chez Air Liquide). L'air est en provenance du circuit d'air comprimé du laboratoire. L'oxygène et le CO_2 (qualité ALPHAGAZ 1™ de chez Air Liquide) sont stockés dans des bouteilles haute pression (B50 et L50). Pour réaliser l'enrichissement en oxygène et la dilution en CO_2 de l'oxydant, l'air est mélangé, via un réservoir que l'on dénommera mélangeur, à de l'oxygène ou du CO_2. Le mélange est réparti par la suite, à l'aide d'une nourrice, sur les 3 tubes qui alimentent le tube

coaxial. Le quatrième tube est dédié à l'alimentation en vapeur d'eau provenant du deuxième panneau d'alimentation présentée dans la section suivante.

2.2.3 Générateur de vapeur d'eau

Nous avons dimensionné et mis en place un nouveau système d'évaporation d'eau de chez Bronkhorst. Le système de contrôle de l'évaporation et du mélange CEM (« *Controlled Evaporation and Mixing* » en anglais) est un générateur de vapeur de liquide ; il comprend un débitmètre liquide de type mini CORI-FLOW, un débitmètre massique pour le gaz porteur et une chambre de mélange/évaporation régulée en température. Un schéma descriptif du système est présenté dans la Figure 2.5.

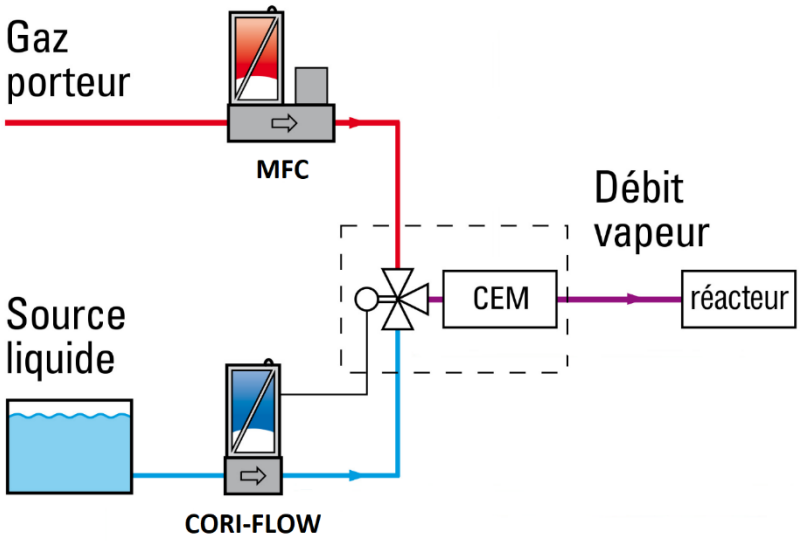


Figure 2.5: Système CEM (contrôle de l'évaporation et du mélange).

Ce système est adapté aux débits d'eau qu'on souhaite injecter, allant de 1 jusqu'à 1200g/h, correspondant à un débit volumique maximal de 33NL/min d'eau. Dans le but de limiter les pertes de charge dans le système, il est nécessaire de connaître la température et les débits massiques gaz/liquide exacts (qui sont air/eau dans notre cas). La quantité du gaz porteur nécessaire à l'évaporation dépend de la quantité d'eau souhaitée et ne peut dépasser 100 NL/min. Cette quantité est obtenue grâce au logiciel de calcul en ligne FLUIDAT de Bronkhorst. Il est par ailleurs possible, grâce à ce logiciel, de faire différents calculs, de connaître la température exacte du CEM, le débit de la vapeur de sortie, les débits massiques de l'eau et de l'air nécessaires à l'humidité relative de la vapeur (allant de 5 à 95%). L'évaporation totale de l'eau avec le gaz porteur dans la chambre de mélange est assurée grâce à l'échangeur thermique qui chauffe le mélange jusqu'à l'évaporation complète avec

une température maximale allant jusqu'à 200°C et une pression maximale allant jusqu'à 100 bars.

Suite à l'installation du système d'évaporation, il a été primordial d'installer un système de chauffage complet permettant d'assurer la non-condensation de la vapeur d'eau. Dans cette perspective, nous avons procédé à l'installation de différents systèmes de chauffage : 3 colliers chauffants de type Mica fabriqués sur mesure permettent de chauffer le brûleur, le mélangeur et l'ensemenceur. Les lignes de gaz ont été remplacées par des flexibles métalliques et chauffées grâce à des fils résistifs en nickel-chrome de 1 mm de diamètre entourant les tubes. Afin d'obtenir une température d'environ 110°C à la sortie du brûleur, l'ensemble des colliers ont été régulés à des températures allant de 100 à 170°C et les lignes de gaz à 100°C. Un système de régulation avec un capteur de température approprié est mis en place pour chaque élément chauffant (fils chauffants, colliers) permettant de mesurer la température réelle instantanée des différentes parois externes des éléments.

2.3 Techniques de mesure

2.3.1 Analyse des gaz de fumées

L'analyse des fumées est une partie importante de la caractérisation de la combustion dans un contexte d'étude expérimentale de flammes. Cette analyse permet de vérifier la composition des fumées, notamment les taux d'émissions polluantes (CO, NO_X). Dans ce but, l'enceinte est équipée d'une sonde de prélèvement des gaz reliée, par une gaine chauffante, à deux analyseurs donnant accès à la composition et les teneurs des différentes espèces chimiques (CO, NO_X, CO_2, O_2, SO_2 et CH_4).

Le système d'analyse des gaz de combustion est constitué de plusieurs éléments :

- Une sonde de prélèvement de type PSP4000–HCT, chauffée à 483K, située en haut de la chambre à 1.2 m de la sortie du brûleur. Elle contient une cartouche filtrante permettant le filtrage des gaz prélevés.
- Un tube de prélèvement chauffé à 483K équipé d'un thermocouple Fe-CuNi permettant la mesure des températures au point de prélèvement.
- Une gaine chauffée à 453K permettant le transport des gaz vers les analyseurs.
- Un groupe froid (pré-échantillonneur PSS5) permettant d'éliminer la vapeur d'eau contenue dans les gaz, permettant ainsi d'obtenir des mesures sur des fumées sèches.

- Deux analyseurs (Horiba PG250 et ABB AO2020) permettant de mesurer les concentrations des espèces dans les fumées.

Après avoir calibré les analyseurs des gaz grâce à des bouteilles d'étalonnage, les gaz prélevés sont acheminés à l'analyseur Horiba PG250 avec un débit de gaz analysé de 0.4 NL/min, ce qui permet de mesurer les concentrations de (NO_x ($NO + NO_2$), CO, SO_2, CO_2 et O_2) et à l'analyseur ABB AO2020 avec un débit de gaz analysé d'environ 1 Nl/min pour mesurer le CH_4 et le CO_2 à pourcentage élevé (voir Tableau 2.2). Le transport des gaz s'effectue dans une gaine chauffée à 150°C afin d'éviter la condensation de l'eau qui pourrait dégrader l'analyse des gaz. La vapeur d'eau contenue dans les gaz de combustion est par la suite éliminée par un groupe froid qui précède l'analyseur ce qui permet d'obtenir des mesures sur fumées sèches. Le temps de réponse est de l'ordre de la dizaine de secondes pour les deux analyseurs.

Tableau 2.2 : Caractéristiques des analyseurs de gaz.

Analyseur	Espèces	Principe de mesure	Gamme
ABB 02020	**CH_4**	Infrarouge non dispersif avec détecteur de type pneumatique	0 à 5000 ppm
	CO_2	Infrarouge non dispersif avec détecteur de type pyroélectrique	0 à 100 %
HORIBA PG250	**NO_X**	Chimiluminescence	0 à 5000 ppm
	CO	Infrarouge non dispersif avec détecteur de type pneumatique	0 à 5000 ppm
	CO_2	Infrarouge non dispersif avec détecteur de type pyroélectrique	0 à 25 %
	O_2	Paramagnétisme	0 à 25 %

Les mesures sont enregistrées dès que le régime permanent est atteint (temps caractéristique d'une minute), et elles sont moyennées sur des durées de trois à cinq minutes. Les incertitudes sont estimées à ± 1 % de la pleine échelle pour l'ensemble des gaz étudiés.

2.3.2 Technique de chimiluminescence OH*

Une flamme est un phénomène très complexe où de très nombreuses réactions ont lieu, produisant de nombreuses espèces (radicaux libres, atomes, molécules) qui coexistent, avec un dégagement de chaleur et de photons. Certaines d'entre elles sont produites sur des niveaux d'énergie élevés. Pour retrouver leur niveau d'énergie à l'équilibre thermodynamique

(généralement, sur le niveau fondamental), celles-ci émettent quasi instantanément des photons dont la longueur d'onde est caractéristique de la transition énergétique. Lorsque l'énergie qui permet aux molécules d'atteindre l'état excité et d'émettre de la lumière provient d'une réaction chimique, il s'agit du phénomène de chimiluminescence de la flamme.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé cette technique afin d'étudier le positionnement spatial de la flamme via une caractérisation des hauteurs d'accrochage (ou de suspension) et des longueurs de flamme. Cette technique nous permet de détecter le contour de la flamme afin d'obtenir les hauteurs d'accrochage et de fin de la flamme. Elle consiste à repérer un seuil de niveau d'intensité qui délimite nettement le bruit du signal de chimiluminescence. Ce seuil peut être choisi à partir du niveau d'intensité maximum qui correspond à la zone de bruit ou bien au point d'inflexion du signal de chimiluminescence déterminé à chaque position radiale sur l'image. La Figure 2.6 illustre l'implantation du montage de chimiluminescence dans le dispositif expérimental.

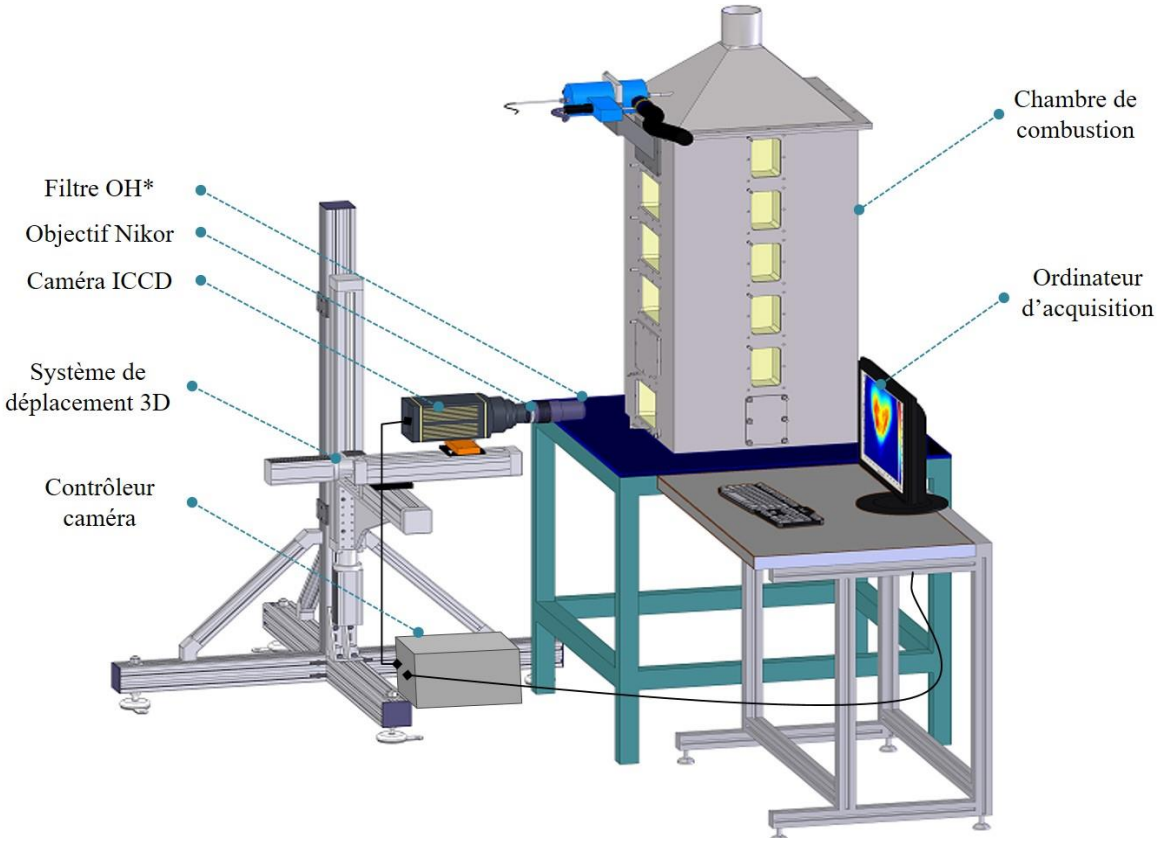


Figure 2.6 : Technique de chimiluminescence installée autour du système de combustion.

Ce montage est composé d'une caméra CCD intensifiée munie d'un objectif UV Nikkor de 105 mm de focale (*f*/4,5), d'un dispositif de contrôle de la caméra (refroidissement par effet Peltier et système de synchronisation), d'un filtre interférentiel CG-UG-11-2X2-1.0 (Melles

Griot), centré sur 308 nm de longueur d'onde avec une bande passante de 20 nm, et d'un ordinateur pour acquérir et stocker les images en temps réel.

Les voies réactionnelles les plus fréquentes des principaux radicaux responsables de la chimiluminescence d'une flamme d'hydrocarbures (OH*, C_2*, CH* et CO_2*) [146] sont :

- $CH + O_2 \rightarrow CO + OH^* (A^2\Sigma^+)$ … -> $OH (X^2\Pi) + h\upsilon$ à 308 nm (46)
- $C_2H + O \rightarrow CO + CH^* (A^2\Delta)$ … -> $CH (X^2\Pi) + h\upsilon$ à 430 nm (47)
- $C_2H + O \rightarrow CO + CH^* (B^2\Sigma^-)$ … -> $CH (X^2\Pi) + h\upsilon$ à 387 nm (48)
- $CH + C \rightarrow H + C_2^* (d^3\Pi_g)$ … -> $C_2 (a^3 \Pi_u) + h\upsilon$ à 516 nm (49)
- $CO + O + M \rightarrow M + CO_2^* (^1B_2)$ …-> $CO_2 (1 \Sigma^+_g) + h\upsilon$ à 300-500 nn (50)

La Figure 2.7 représente les différents spectres d'émission des radicaux OH*, CH* et C_2* pour une flamme prémélangée méthane/air à différentes richesses. Dans les fours à haute température, la chimiluminescence des radicaux C_2*, CH* et CO_2* dans le visible est superposée et peut être confondue avec l'émission thermique dans le visible des parois chaudes en réfractaires. Dans ce cas, il est préférable de choisir de collecter la chimiluminescence du radical OH* dans l'ultraviolet pour s'affranchir de ce rayonnement thermique parasite [146].

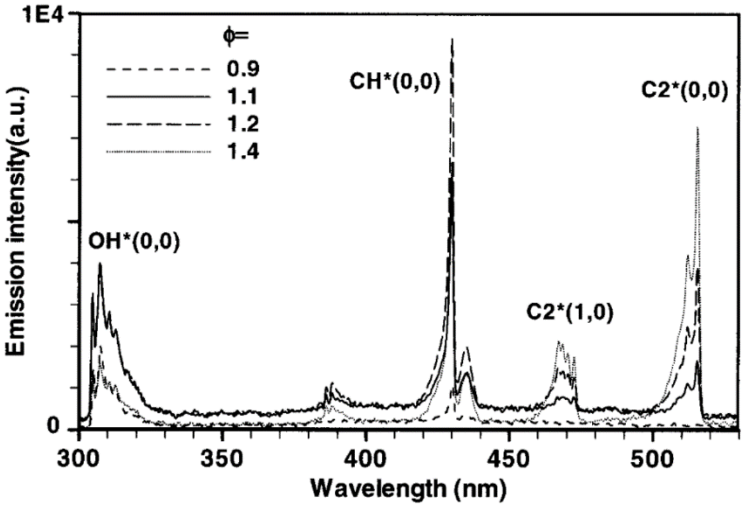


Figure 2.7: Spectres d'émission des radicaux OH, CH* et C_2* pour une flamme prémélangée Méthane/air à différentes richesses [147].*

La caméra utilisée pour cette technique est une caméra CCD intensifiée de Princeton Instruments, PI-MAX 2, 1024x1024 pixels² sur 16 bits (voir Figure 2.8(a)). Elle permet la collection de rayonnements visibles et ultraviolets. Une photocathode convertit les photons incidents en électrons. Par la suite, le signal est amplifié à l'aide d'un intensificateur UV

GenII tout en offrant de bonnes performances, en termes de rapidité et de sensibilité. Enfin, un écran phosphore reconvertit les électrons incidents en photons, traduits en image numérique par un capteur CCD refroidi par effet Peltier.

Figure 2.8 : (a) Caméra PI-MAX2 (b) Objectif Nikon 105 mm F/4.5 UV-Micro Nikkor.

L'objectif utilisé (Nikon 105 mm F/4.5 UV-Micro Nikkor) (Figure 2.8(b)) est constitué de six éléments optiques de qualité UV avec les trois premiers réalisés en silice fondue (quartz), les autres en fluorure de calcium synthétique (CaF_2). Un filtre interférentiel UG11 a été installé pour ne permettre la transmission que des rayonnements émis par la tête de bande principale du radical OH*. Ce filtre transmet le signal émis par la flamme à un système d'acquisition connecté à un ordinateur pour visualisation.

L'acquisition des images est assurée par le logiciel WinView32 qui permet l'enregistrement et la visualisation des images. Ce logiciel permet de contrôler le gain, la durée de la porte d'intensification de la caméra et l'indice d'ouverture de l'objectif pour conserver un rapport signal sur bruit satisfaisant et ne pas saturer la caméra. Le temps d'intégration typique est de 40 ms. Le champ de mesure est de 112x112 mm^2 avec une résolution spatiale de 9,2 pixels/mm. L'acquisition est effectuée sur 300 images pour permettre, lors du traitement des images, le calcul de grandeurs statistiques (moyenne convergée et écart-type). Le traitement des images a été effectué à l'aide d'un programme Matlab adapté aux types et aux tailles d'images obtenues. Ce programme permet la détection des contours de flammes permettant d'obtenir les hauteurs d'accrochage, les longueurs de flammes et les écarts-types correspondants. Les différentes sources d'incertitudes des mesures des hauteurs d'accrochage et de longueur de flamme sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.3 : Évaluation des incertitudes des mesures de hauteur de décollage et de hauteur de flamme.

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

2.3.3 Utilisation de plasma type arc glissant sur la flamme

Dans le cadre de l'étude de stabilité de flamme, nous avons utilisé un système plasma de type arc glissant impulsionnel, développé durant le projet PEPS « Cellule Énergie CNRS » CAGLISSE. Le projet CAGLISSE (Combustion assistée par Arc GLISsant et SpectroscopiE) se déroulait en partenariat avec le laboratoire GREMI (site d'Orléans et de Bourges), dont la thématique est la combustion assistée par plasma. Le projet consiste en l'intégration d'une source plasma non thermique dans un brûleur et en l'analyse de ses effets sur les caractéristiques de la flamme. L'idée principale de ce projet est donc de créer un plasma d'arc glissant multi-impulsionnel, qu'on nommera par la suite Glidarc, pour le contrôle actif d'une flamme de type swirlée et d'en mesurer les effets en termes de stabilité et d'émissions polluantes.

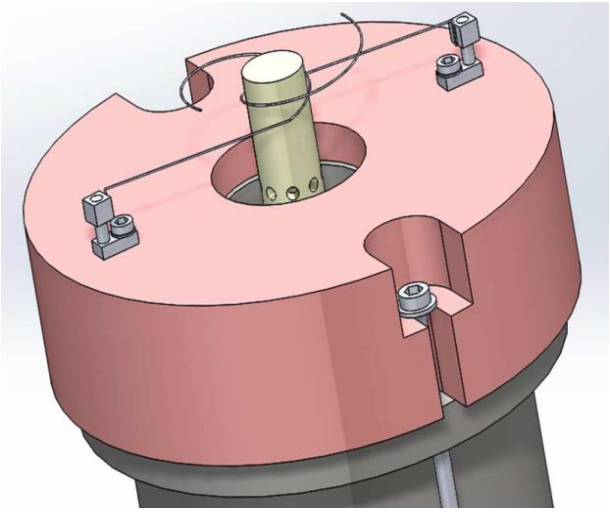


Figure 2.9: Schéma du système Glidarc installé sur le brûleur coaxial à swirl

Le choix d'utiliser une décharge d'arc glissant comme source plasma est lié à la simplicité du système d'un point de vue technologique. Le Glidarc est composé principalement de deux

électrodes divergentes en cuivre de forme circulaire comme le montre la Figure 2.9. Les électrodes présentent l'avantage d'avoir une conductivité thermique et électrique élevée permettant un meilleur passage du courant électrique tout en dissipant les effets thermiques associés limitant leur usure progressive. De plus, l'utilisation du Glidarc est bien adaptée à ce type de configuration, car c'est une technologie plasma non thermique, c'est-à-dire des plasmas hors équilibre thermodynamique ayant des températures ioniques et électroniques très élevées (10^3-10^4 K) tout en gardant une température des gaz faible (~ 300 K). Ce type de plasma présente donc l'avantage d'être à la fois une source radiative et une autre chimique, engendrant une forte production d'espèces réactives dans la zone de combustion par réactions de collisions électroniques sans procéder à un chauffage du gaz réactif et sans provoquer de surcoût énergétique par un chauffage inutile des gaz. Les électrodes sont disposées sur le brûleur de telle sorte qu'elles suivent le mouvement du gaz injecté, afin de perturber le moins possible les lignes de flux de gaz tout en s'écartant progressivement de l'électrode centrale. L'injecteur du brûleur a été modifié afin de pouvoir créer l'arc glissant en amont ou dans la flamme. Il a fallu allonger l'axe central du brûleur initial afin de créer une nouvelle buse d'injection servant également d'électrode centrale pour l'arc. La longueur et la forme de cet injecteur/électrode ont fait l'objet de plusieurs essais avant d'obtenir les dimensions les mieux adaptées. Deux autres électrodes périphériques ont été positionnées symétriquement pour traiter le maximum de gaz, l'embase des électrodes étant située en amont des 8 trous d'injection de combustible. Cette configuration permet donc de conserver le mieux possible l'effet swirl de l'écoulement. Une pièce en alumine usinée par SCERAM nous a permis de fixer les électrodes périphériques dans la chambre permettant ainsi de les isoler de la partie supérieure du brûleur. En plus d'un support, cette pièce a permis d'éviter les courts-circuits au niveau des appareils de mesures et de contrôle des débits de gaz (voir Figure 2.10 (a)). La Figure 2.10 (b) illustre un exemple de flamme en présence de plasma.

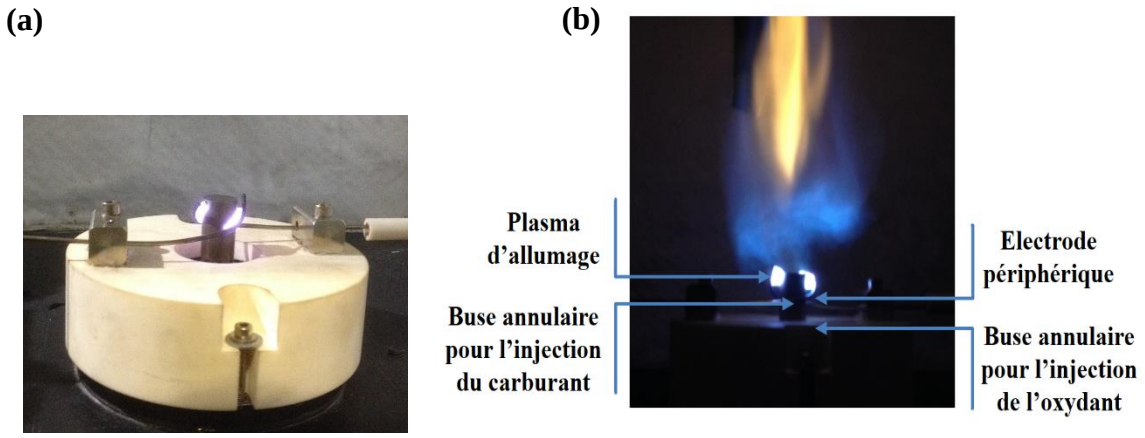


Figure 2.10 : (a) photo de l'instalation Glidarc en présence de plasma. (b) Exemple de fonctionnement du brûleur en présence d'un plasma arc glissant. Conditions expérimentales de combustion : flamme méthane/ air Q_{CH4} : 7 L/min, Q_{air} = 60 l/min ; plasma : U = 190 V, ti_{pulse} = 450 ns, f_{pulse} = 12 kHz.

Deux alimentations électriques ont été créées, une pour chaque électrode, d'une part pour obtenir un dépôt d'énergie plasma identique dans les deux décharges et d'autre part pour avoir la possibilité de procéder à l'allumage d'un ou deux plasmas en simultanés. La fréquence et la tension sont des paramètres réglables pour modifier les caractéristiques de l'arc. La durée du pulse est de 500 ns et la fréquence associée est variable de 1 à 30 kHz. La tension primaire est ajustable de 0 à 350 VCC et la tension secondaire de 0 à 20 kV. La puissance instantanée maximale ainsi produite en sortie d'alimentation est de 150 W. Le rendement électronique moyen durant les essais est de 60%. Ces alimentations permettent donc l'ajustement de la tension à vide et de la fréquence d'impulsion amenant de la souplesse sur les conditions d'allumage des plasmas. Le développement de ces alimentations a été effectué par le laboratoire GREMI. Afin d'éviter tout risque électrique et limiter la propagation des ondes magnétiques, la buse et l'ensemble de la chambre de combustion ont été reliés à la masse. Par conséquent, aucune perturbation électrique ou magnétique n'a été observée sur l'ensemble du dispositif expérimental de combustion et d'analyse.

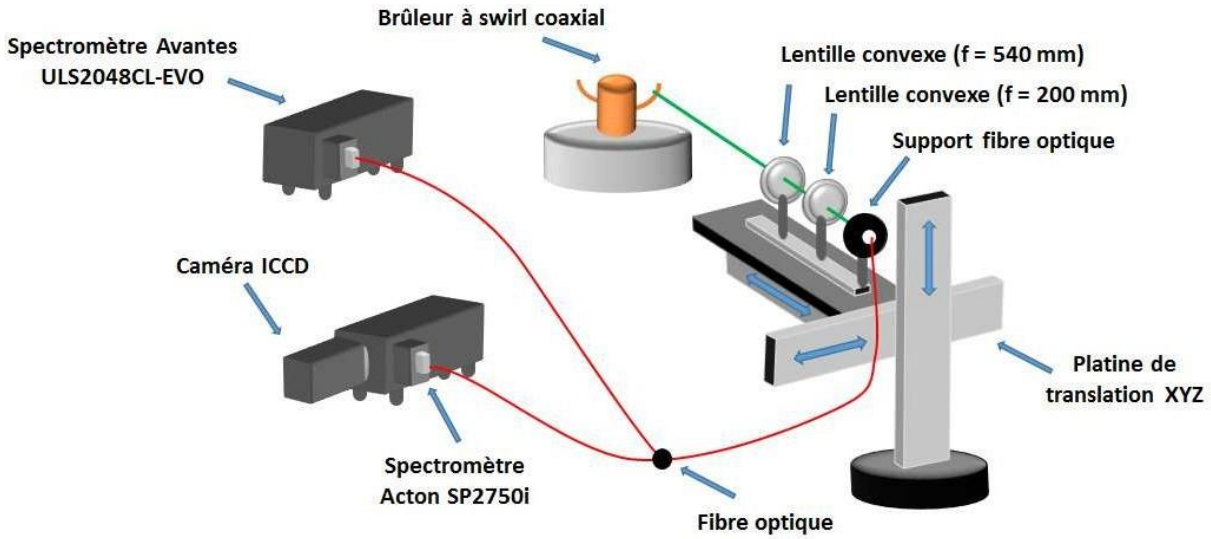


Figure 2.11 : Schéma d'implantation du dispositif d'analyse du rayonnement par spectroscopie optique d'émission.

L'analyse du rayonnement UV-visible émis par le plasma et par la combustion a été réalisée grâce à la technique de spectroscopie optique d'émission dont un schéma d'implantation sur le dispositif est présenté sur la Figure 2.11. L'ensemble du dispositif d'analyse est positionné sur un ensemble de trois platines de translation motorisées de manière à ajuster finement le point en plusieurs positions dans la chambre de combustion.

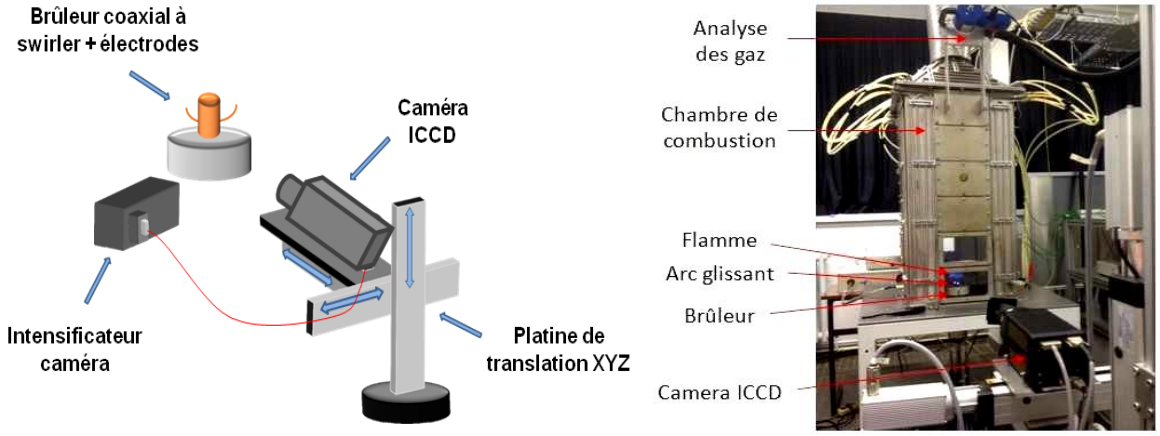


Figure 2.12 : Schéma d'implantation du dispositif de chimiluminescence OH avec le Glidarc.*

Deux spectromètres ont été utilisés en parallèle de manière à collecter en simultané la lumière provenant du plasma et de la flamme. Le premier spectromètre Avantès ULS2048Cl-EVO permet une mesure rapide de spectre d'émission large bande (300 - 550 nm) permettant d'obtenir rapidement un inventaire des espèces réactives générées par le plasma pouvant avoir un effet bénéfique en ce qui concerne la création d'espèces réactives initiatrices de la

combustion. À la suite de ces résultats préliminaires, le second spectromètre Acton SP2750i a été utilisé pour une analyse spectrale complémentaire sur une gamme plus étendue (200 - 800 nm) afin de sonder des espèces dans le domaine des UV jusqu'au proche IR (cf. Figure 2.11). Ce spectromètre, équipé d'une tourelle de trois réseaux de diffraction, permet également d'accéder à des mesures spectrales plus résolues permettant la mise en place de techniques d'analyse spectroscopique reposant sur l'analyse fine de spectres d'émission. Ceci permet d'obtenir des données quantitatives sur la nature et les températures atteintes (électroniques, translationnelles, vibrationnelles, rotationnelles) par les espèces atomiques et radicalaires par comparaison des spectres expérimentaux avec des spectres théoriques via le logiciel SPECAIR acquis récemment via la fédération EPEE. En parallèle, ces mêmes diagnostics optiques ont été mis en œuvre afin de procéder à l'étude directe de la zone de combustion. Grâce à cela, il est possible d'accéder à des mesures de températures au sein de la zone de combustion et qui seront reliées à l'évolution des quantités de polluants émis, l'augmentation des températures ayant généralement pour conséquence d'améliorer l'homogénéité et l'efficacité de la combustion. Ces analyses spectrales ont été complétées par des mesures d'imagerie interférentielle en utilisant la technique de chimiluminescence du radical OH* (cf. Figure 2.12) décrite précédemment. Cet intermédiaire réactionnel, caractéristique du positionnement du front de flamme, permet le suivi du front de flamme en présence d'un plasma.

2.3.4 La Vélocimétrie Laser à effet Doppler LDV

2.3.4.1 Principe général de la LDV

La vélocimétrie Doppler Laser est une technique optique ponctuelle non intrusive de détermination de vitesse d'un écoulement. Cette technique permet l'acquisition de données comme les vitesses moyennes de l'écoulement, les fluctuations RMS, l'intensité de turbulence, les contraintes de Reynolds, etc. Le croisement de deux ou quatre faisceaux laser crée un volume de croisement composé de plusieurs franges d'interférences comme le montre la Figure 2.13. En introduisant des particules très fines, ces dernières passent dans le réseau de franges et émettent une lumière qui est modulée à une fréquence proportionnelle à la composante de vitesse perpendiculaire aux plans parallèles et équidistants des franges d'interférences suivant la relation suivante :

$$f = \frac{2V \sin \Theta}{\lambda} \tag{51}$$

Θ représente le demi-angle entre les deux faisceaux Laser de longueur d'onde λ.

Dans le but de déterminer le sens du déplacement des particules, le système comprend une cellule de Bragg qui introduit un décalage de fréquence entre les deux faisceaux laser. En tenant compte de la fréquence de Bragg (f_b), la relation entre la vitesse et la fréquence s'écrit :

$$V = \frac{\lambda(f - f_b)}{2 \sin \Theta} \tag{52}$$

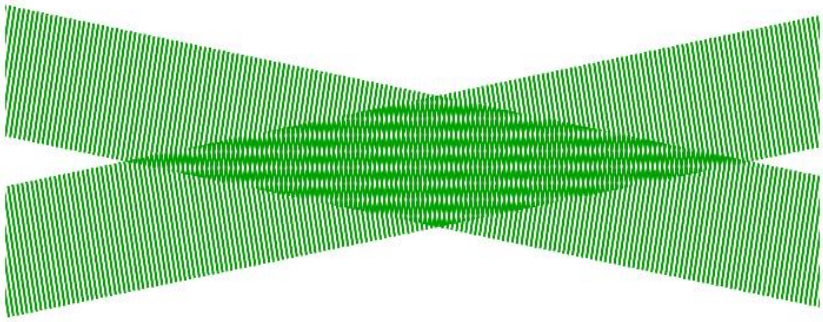


Figure 2.13: Franges d'interférences formées par deux faisceaux laser.

2.3.4.2 Dispositif expérimental LDV

Le système de vélocimétrie Doppler au laser TR-SS-2D de (TSI, Inc.) est un système laser à semi-conducteurs (solid-state laser-based system), utilisé pour les mesures de vitesse et d'intensité de turbulence, à un point spécifique de l'écoulement, avec un taux d'échantillonnage élevé (~ 1000 kHz) et une résolution temporelle très élevée (~ 0,0015 %) Le système LDV utilisé durant cette étude est illustré dans la Figure 2.14. C'est un système optique à deux longueurs d'onde qui permet de mesurer deux composantes de vitesse simultanément (longitudinale et radiale). Il se compose d'une sonde compacte à la fois d'émission et de réception par rétrodiffusion appelée « PowerSight », d'un boîtier PDM1000 pour séparer et filtrer les signaux collectés par les cellules PMT et d'un échantillonneur et analyseurs de signaux FSA3500. Il existe deux modules principaux pour le système PowerSight, le vélocimètre laser PowerSight et le contrôleur PowerSight. Les deux modules sont nécessaires pour fonctionner comme une unité. Pour constituer le système LDA complet, les processeurs de signal PDM1000 et FSA3500 appropriés sont nécessaires.

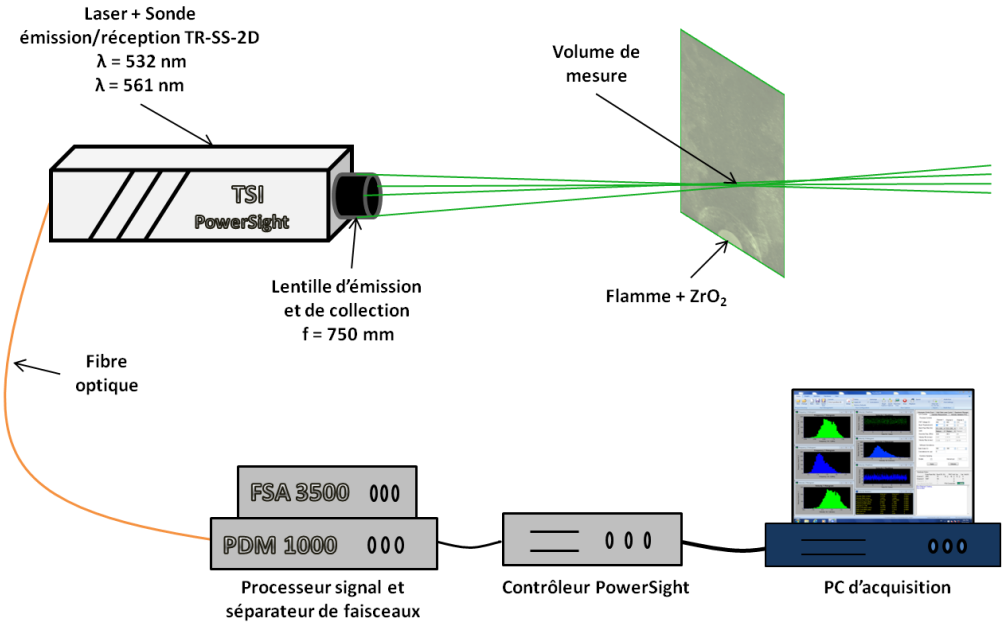


Figure 2.14 : Schéma descriptif du dispositif LDV.

Le système TR-SS-2D utilise des lasers pompés par diode pour générer des signaux Doppler de haute qualité. La sonde d'émission délivre deux longueurs d'onde : 561 nm pour le premier canal et 532 nm pour le second sous forme de deux paires de faisceaux laser polarisés verticalement et situés dans deux plans perpendiculaires. En effet, l'un des faisceaux de chaque paire est généré suite à la modulation acousto-optique (c.-à-d. cellule de Bragg) du faisceau primaire pour changer également la fréquence de la lumière à une valeur fixe de 40 MHz. Les faisceaux laser se croisent au même point de mesure situé à une distance égale à longueur focale de la lentille montée sur la sonde PowerSight (Figure 2.15). Pour les besoins de cette étude, et pour éviter l'endommagement de la lentille à cause du rayonnement du confinement en la présence de la flamme, on a opté pour une lentille d'une focale de 750 mm. L'acquisition peut être effectuée de deux méthodes différentes : la première consiste à ce que les données soient acquises séparément sur chaque voie (dans la limite de 10000 mesures), la deuxième méthode repose sur le fait que la mesure ne soit acquise que si dans un certain laps de temps appelé « fenêtre de coïncidence » une vitesse a été validée sur les deux voies. Dans ce cas, les deux vitesses sont mesurées simultanément. Il est par la suite possible de déduire les corrélations croisées $\overline{U'V'}$ relatives aux forces de cisaillement.

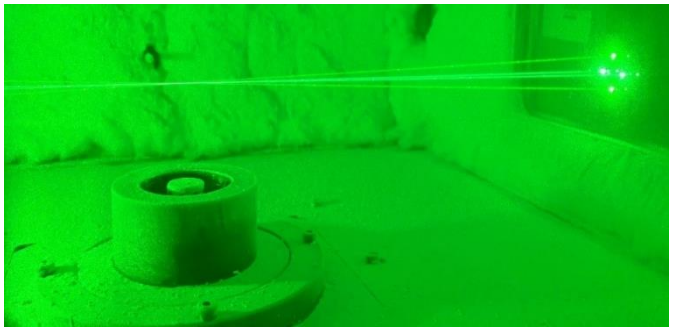


Figure 2.15 : Photo des quatre faisceaux laser LDV croisés au niveau du point focal à z=60mm au-dessus du brûleur à swirl.

Le volume de mesure correspondant au point de croisement des quatre faisceaux laser est un ellipsoïde de quelques microns de longueurs d'axes. L'intersection des faisceaux de lumière cohérente et polarisée, génère dans le volume de mesure un réseau de franges parallèles, équidistantes et alternées sombres et brillantes. Le passage d'une particule à travers le volume de mesure va donc générer un signal (i.e. burst) avec de pics d'intensité successifs correspondant au signal émis par la particule traversant les franges brillantes. Un signal est émis pour chaque longueur d'onde permettant de mesurer la vitesse de la même particule en deux directions différentes (horizontalement et verticalement) et donc les deux composantes de vitesse simultanément. Ce signal sera par la suite filtré, échantillonné et traité pour en déduire la fréquence (c.-à-d. fréquence Doppler) qui correspond à la vitesse de déplacement de la particule à travers le volume de mesure. La fréquence d'acquisition du système LDV-2D dépendra du nombre de particules validées qui passent à travers le volume de mesure. La qualité de l'ensemencement est donc primordiale pour atteindre des fréquences d'acquisition les plus élevées. Le processeur FSA garantit que chaque passage de particule soit mesuré avec la plus grande précision possible. Le paramètre optique principal est le parallélisme des franges sur tout le volume de mesure, car le PowerSight détecte la lumière des particules passant à travers toute la région, pas seulement la région parallèle centrale. Cela se traduit généralement par une erreur de moins de 0,5% de la vitesse mesurée.

La capacité des particules utilisées dans la technique de LDV à suivre l'écoulement est un élément majeur conditionnant la qualité des mesures obtenues. Dans le cas des mesures en combustion les seules particules possédant une température de fusion (2700 °C) suffisante pour résister aux hautes températures engendrées par l'enrichissement en oxygène sont les particules d'oxyde de zirconium (ZrO_2). Ce type de particules très fines doivent obligatoirement être étuvées au préalable afin de limiter leur agglomération durant les mesures et d'éviter plus particulièrement les bouffées de particules. Le système

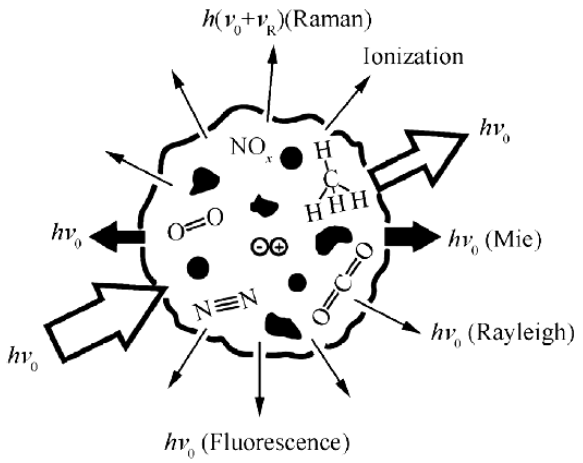
d’ensemencement sera décrit en détail dans la section 2.3.5.4. Un système de déplacement 3D de type ISEL, a été configuré pour contrôler la position du laser par rapport au centre du brûleur avec une précision de l’ordre du 1/10ème de millimètre. Le déplacement a été effectué de manière horizontale avec un pas de 1 mm pour les différentes positions verticales (z).

2.3.5 Vélocimétrie par imagerie de particule (PIV)

2.3.5.1 Principe de fonctionnement de la PIV

La PIV (vélocimétrie à images de particules) est une technique de mesure optique de diagnostic laser, non intrusive et indirecte, permettant de mesurer des champs de vitesses instantanées pour de larges domaines, basée sur l’analyse statistique des signaux de diffusion de lumière par des particules traceuses de l’écoulement. La Figure 2.16 illustre les différents processus d’interaction entre un faisceau laser irradié et une particule dite traceuse.

La technique PIV a fait de grands progrès en termes de principes de mesure, de mise en œuvre de système, d'applications pratiques, d'analyse d'incertitudes, etc. Moins précise en terme de résolution temporelle que la technique de Vélocimétrie Laser à effet Doppler (LDV) par exemple, la PIV présente l’avantage non négligeable d’offrir une caractérisation instantanée des champs de vitesse sur une fenêtre d’acquisition de taille allant jusqu’à plusieurs dizaines de centimètres contrairement à la LDV qui ne permet de mesurer la vitesse de l’écoulement qu’en un seul point du champ souhaité. La technique de PIV présente aussi plusieurs contraintes. En effet, les principales difficultés dans la majorité des installations, que ce soit à l’échelle industrielle ou laboratoire, proviennent principalement de la faible taille des accès optiques dans les confinements, du rayonnement thermique des parois, et de la nécessité d'obtenir des champs de mesures adaptés à la taille des installations [148].



Physical process	Cross-section (cm^2/sr)
Mie scattering	10^{-7}–10^{-13}
Fluorescence	10^{-19}–10^{-24}
Rayleigh scattering	10^{-27}
Linear Raman scattering	10^{-30}–10^{-31}

Figure 2.16 : Schéma de différents processus d'interaction entre un faisceau laser irradié et une particule [149].

Cette technique consiste en premier lieu à mesurer un champ de déplacement d'un écoulement ensemencé par des particules solides ou liquides de taille suffisamment faible capables de suivre fidèlement la dynamique de l'écoulement. Par la suite et grâce au traitement et calcul, on obtient des champs de vitesses instantanées. Un système PIV est composé généralement d'un plan lumineux (nappe laser), un ensemencement homogène et régulier avec une concentration adéquate de l'écoulement en particules solides ou liquides dites traceuses et un système de collection de signaux de diffusion (caméra CCD). Le capteur de la caméra CCD récolte la lumière diffusée par les particules et l'enregistre à chaque éclairage. Le premier flash laser éclaire l'écoulement à l'instant t et le capteur enregistre la diffusion de Mie (frame1), le second flash laser éclaire l'écoulement à l'instant t+Δt et une deuxième image est enregistrée (frame2). Le traitement est effectué par la suite pour calculer les champs des vitesses par détermination du déplacement des particules entre frame 1 et frame 2 à partir des intensités lumineuses I et I' reçues par chaque pixel du capteur CCD aux instants t et t+Δt respectivement. Des filtres interférentiels avec une courte bande spectrale et centrés sur la longueur d'onde du laser sont installés sur les caméras afin d'éviter que d'autres signaux parasites perturbent le calcul des champs de vitesse. Ce calcul consiste en le découpage des images en fenêtres d'interrogation de petite taille permettant de calculer le déplacement des particules entre deux instants (Δt) par une intercorrélation du signal de diffusion de Mie (Figure 2.16). On peut déduire par la suite la vitesse instantanée dans chaque fenêtre d'interrogation à travers Δt et le grandissement optique.

Le choix de la taille de fenêtre d'interrogation repose sur les caractéristiques de l'écoulement, notamment la vitesse et l'intensité de turbulence. En effet, on obtient des champs avec une résolution spatiale très élevée avec une taille de fenêtre d'interrogation très faible, mais dans ce cas un nombre de particules très faible risque de fausser les mesures. D'un autre côté, une taille importante de fenêtre baissera la résolution spatiale, ce qui limitera en termes d'analyse, les phénomènes ayant des gradients de vitesse importants tels que les tourbillons. Il faut surtout éviter le phénomène de repliement spectral en choisissant des valeurs de Δt qui autorisent un déplacement maximal inférieur ou égal à ¼ de la fenêtre d'interrogation [4]. Une fois le déplacement le plus probable estimé, les composantes des vecteurs vitesse de l'écoulement dans le plan (x, y) peuvent être calculés par $(v_x, v_y) = (\Delta x/\Delta t, \Delta y/\Delta t)$. La mesure du déplacement est donc réalisée par la suite par l'algorithme d'intercorrélation développé par Dantec (DynamicStudio).

2.3.5.2 Principe de la PIV stéréoscopique (Stéreo-PIV)

La stéréo-PIV, généralement utilisée dans les systèmes de translation (déplacements latéraux), et dans les écoulements rotationnels (déplacements angulaires), est une technique de mesure des trois composantes de vitesse dans un écoulement présentant un fort caractère tridimensionnel. La méthode de traitement Stéréo PIV calcule des 3 composantes des vecteurs de vitesse dans un plan 2D en combinant les données de deux caméras, chacune fournissant des images de particules à double frame à partir de la nappe laser vue de différents angles. De chacune des deux caméras la méthode requiert une carte vectorielle 2D et une calibration de la caméra, décrivant comment les points situés dans le plan objet représentent les points situés dans le plan image de la caméra en question. Lorsque nous regardons la nappe laser sous un angle au lieu d'une vue perpendiculaire, l'objectif et le plan de l'image doivent être inclinés comme illustré dans la Figure 2.17. Ceci est connu comme la condition de Scheimpflug [150] et assure une bonne focalisation. Pour la perspective, le déplacement hors du plan sera perçu différemment de chacune des deux caméras et cette différence est exploitée pour déduire la troisième composante de vitesse. Ceci est illustré ci-dessous où le déplacement réel est représenté par le vecteur bleu, tandis que les vecteurs vert et rouge illustrent ce à quoi il ressemble respectivement dans les caméras 1 et 2 (projetées sur le plan nappe laser / objet). La distorsion de la perspective est évitée en utilisant une fonction de cartographie du second ordre [151]. Cette fonction est la matrice qui transforme le système de coordonnées en pixels en systèmes de coordonnées réels.

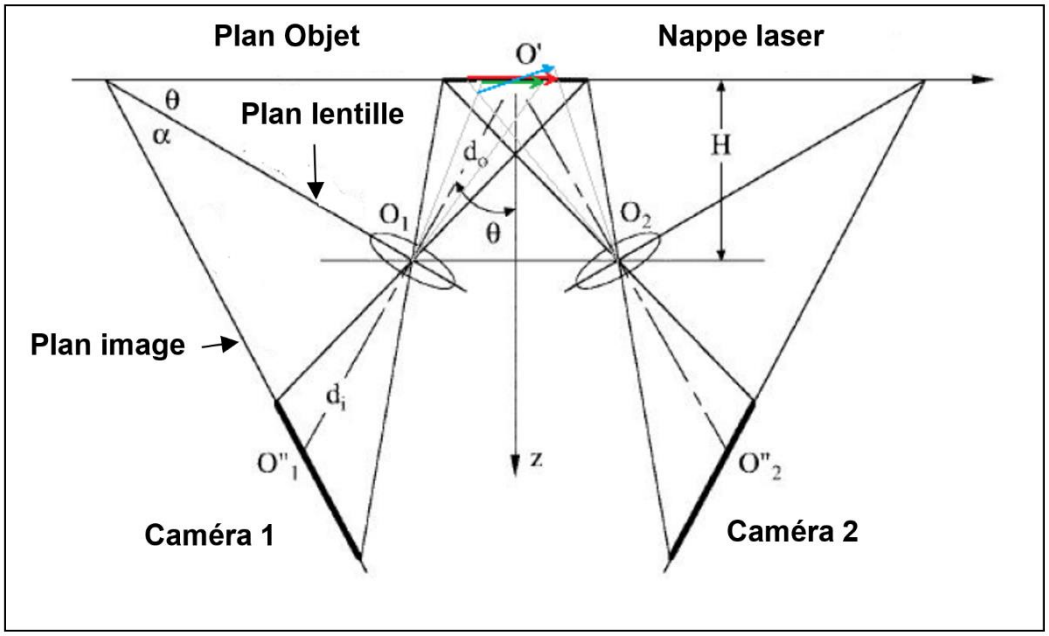


Figure 2.17: Schéma descriptif du principe d'une configuration Stéréo-PIV avec condition de Scheimpflug [152].

2.3.5.3 Montage optique et protocole expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour les mesures de stéréo-PIV (Figure 2.18), mis à disposition par la plateforme RENADIAG du laboratoire CORIA Rouen, est composé principalement d'un laser de type Nd : YAG double impulsion (Quantel CFR200, 2x130 mJ) de fréquence 10 Hz émettant deux faisceaux lasers collimatés à une longueur d'onde de 532 nm et de deux caméras CCD de type JAI (série : RM-4200CL, 12bits en sortie et 2048 x 2048 pixels), équipés de deux objectifs Milvus de Carl Zeiss du type Makro-Planar T*100mm f/2 ZF.2 et de deux filtres interférentiels 532 nm ± 5 mm, permettant de collecter la diffusion de Mie des particules d'ensemencement tout en limitant le signal émis par la flamme. Pour réaliser le montage stéréoscopique, les caméras sont orientées respectivement à + 45° et -45° par rapport au plan de mesure. Pour des raisons de résolution et de contraintes expérimentales, nous avons fait le choix de positionner les caméras de part et d'autre du plan de mesure. Des montures de Scheimpflug (Lavision V3) permettent d'ajuster les orientations relatives des capteurs et des objectifs par rapport au plan laser, pour permettre la mise au point sur l'intégralité du champ déformé en raison de l'orientation. La synchronisation des deux caméras et du laser est assurée par un boîtier de synchronisation de type BNC (Berkeley Nucleonics Corp, 575-8Canaux). Le délai entre les deux tirs laser a été fixé à 30 µs. Le système optique transformant le faisceau laser en une nappe a été mis en place. Le système est composé d'un périscope, d'une lentille sphérique (de distance focale de 1000 mm), qui permet

de faire converger le faisceau laser pour obtenir un faisceau très fin et d'une lentille cylindrique plan-convexe de distance focale de -50 mm qui permet de faire diverger le faisceau pour former une nappe laser. Dans le cas de notre étude, cette nappe est verticale. L'épaisseur de la tranche laser ainsi obtenue est comprise entre 100 et 200 µm sur environ 100 mm de hauteur. Un obstacle est disposé sur le chemin optique et coupe nettement la partie basse de la nappe laser afin d'éviter les réflexions parasites sur les parois externes du confinement et la tête du brûleur.

Nous avons utilisé les particules de dioxyde de zirconium ZrO_2 pour ensemencer notre écoulement. Ces particules de faibles diamètres (~1.8µm) ont une température de fusion très élevée (3000 K), indispensable à la traversée du front de flamme. Leur indice de réfraction permet d'avoir une bonne diffusion de lumière ($n \approx 2.2$ à 532 nm) offrant un temps de réponse de l'ordre de la microseconde et un nombre de Stokes très inférieur à 1. Nous rappelons que le nombre de Stokes, *St*, est défini comme étant le rapport entre le temps de réponse des particules et un temps caractéristique de l'écoulement. La taille du champ de mesure est d'environ 100*80 mm² avec 500 paires d'images par chaque caméra. L'acquisition et le traitement des images ont été réalisés avec le logiciel DynamicStudio de Dantec.

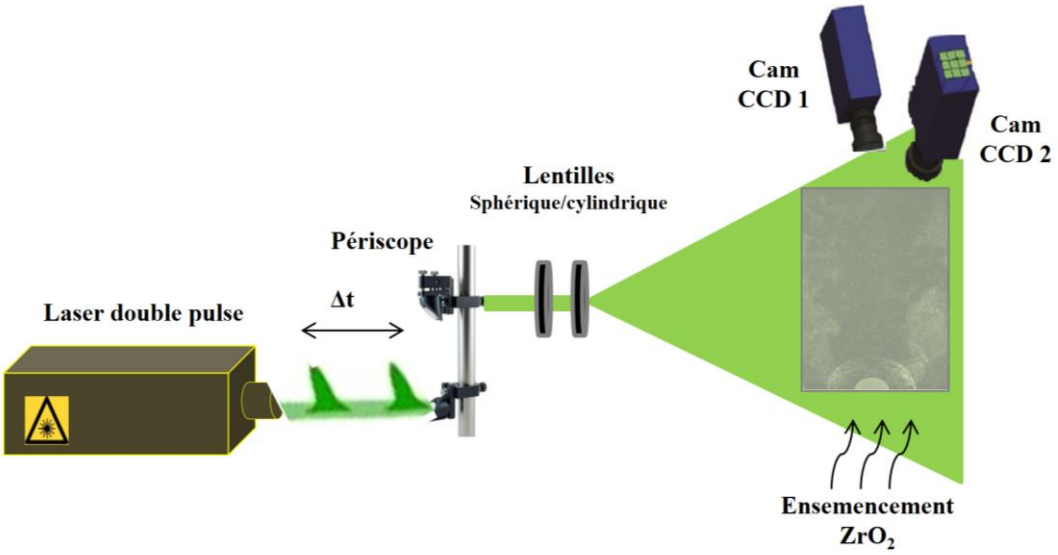


Figure 2.18 : Schéma descriptif du système Stéréo-PIV pour une mesure dans le plan longitudinal.

2.3.5.4 Système d'ensemencement

Avant chaque série de mesures, les particules sont étuvées à environ 500 K pendant trois heures et tamisées avant d'être introduites dans l'ensemenceur. Cette procédure a pour but

d'éviter toutes sortes d'agglomérats dus en général à l'humidité dans les tubes et les ensemenceurs, de conserver le même nombre de Stokes et de garder un ensemencement homogène et régulier. Le nombre de Stokes est un nombre adimensionné permettant d'évaluer l'importance relative de la dissipation visqueuse et celle de force inertielle. Il est défini comme suit :

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_e} \tag{53}$$

Avec τ_p le temps de réponse des particules et τ_e est le temps caractéristique de l'écoulement (des grandes et petites échelles turbulentes). Notons que la constante de temps τ_p du mouvement des particules s'écrit :

$$\tau_p = \frac{1}{6} m_p \, \mu \, \pi \, r = \frac{2\rho_p r^2}{9\mu} \tag{54}$$

Avec m_p la masse de la particule, μ la viscosité dynamique du fluide, *r* le rayon de la particule supposée sphérique. Nous rappelons que nous avons opté pour l'oxyde de Zirconium comme particules d'ensemencement, et nous pouvons donc considérer que ces particules suivent bien l'écoulement pour les différentes structures turbulentes, suite à leur faible diamètre et donc un faible nombre de Stokes (entre 0.01 et 1).

La Figure 2.19 illustre l'ensemenceur développé au laboratoire et utilisé durant cette étude. Ce dernier a été chauffé, grâce à un collier chauffant de type Mika, à une température de 430 K dans le but d'éviter la condensation de la vapeur d'eau avant la sortie du brûleur. Plusieurs réglages de températures du système de chauffage ont été effectués afin de maintenir une température des gaz plus au moins constante à la sortie du brûleur (~383 K). Le réglage de la densité des particules, autrement dit le taux d'ensemencement, est contrôlé par pertes de charges à l'aide des vannes à pointeau placées à la sortie de l'ensemenceur. L'ensemenceur est placé au plus près du brûleur afin de minimiser les distances de canalisation évitant ainsi la stagnation des particules dans les tubes.

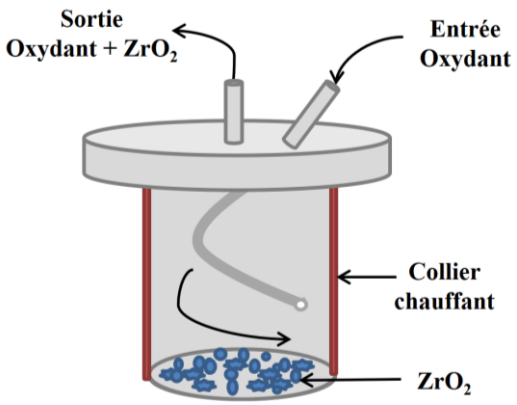


Figure 2.19: Schéma descriptif de l'ensemenceur.

2.3.5.5 Calibration, calcul et traitement d'images

La calibration a été effectuée grâce à une mire à double face fabriquée au laboratoire CORIA, d'un système de déplacement et de la fonction Multi Calibration à l'aide du logiciel DynamicStudio. Une phase de calibration stéréoscopique permet de calculer les matrices de déformation des images pour les passer dans le plan objet, et permet également de faire correspondre les deux plans (définition d'un repère commun). Dans cette phase indispensable à la mesure, la mire, d'une taille de 100 x 100 mm et d'une épaisseur de 2 mm, est placée verticalement au centre du brûleur et à 1 mm du nez du brûleur. Elle est déplacée sur 2 mm par un pas de 0.5 mm. Cette étape nous permet d'effectuer la calibration du déplacement dans la direction perpendiculaire au plan, afin d'avoir accès à la troisième composante de vitesse. Afin de résoudre les défauts d'alignement inévitables entre la nappe et la mire, une dernière phase de correction, appelée auto-calibration, a été réalisée sur les images de particules traversées par la nappe. La calibration doit être effectuée impérativement avant et après chaque série de mesures.

Le traitement des images Stéréo-PIV a été établi grâce au logiciel DynamicStudio comme illustré dans la Figure 2.20. Le traitement comprend plusieurs étapes :

- Acquisition des images PIV (500 paires)
- Soustraction du bruit de fond à l'aide de l'image moyenne et la fonction (image arithmétique)
- Extraire la partie basse de l'image contenant des vecteurs faux à l'aide de la fonction ROI extract (Region Of Interest).

- Calcul des vecteurs de vitesse basé sur des paires d'images de particules (adaptive PIV), La méthode peut ajuster de manière itérative la taille, la forme et l'emplacement des zones d'interrogation individuelles afin de les adapter aux densités d'ensemencement locales et aux vitesses et gradients de flux
- Calcul et reconstruction des vecteurs de vitesses avec les 3 composantes en combinant les données 2D récoltées des deux caméras.

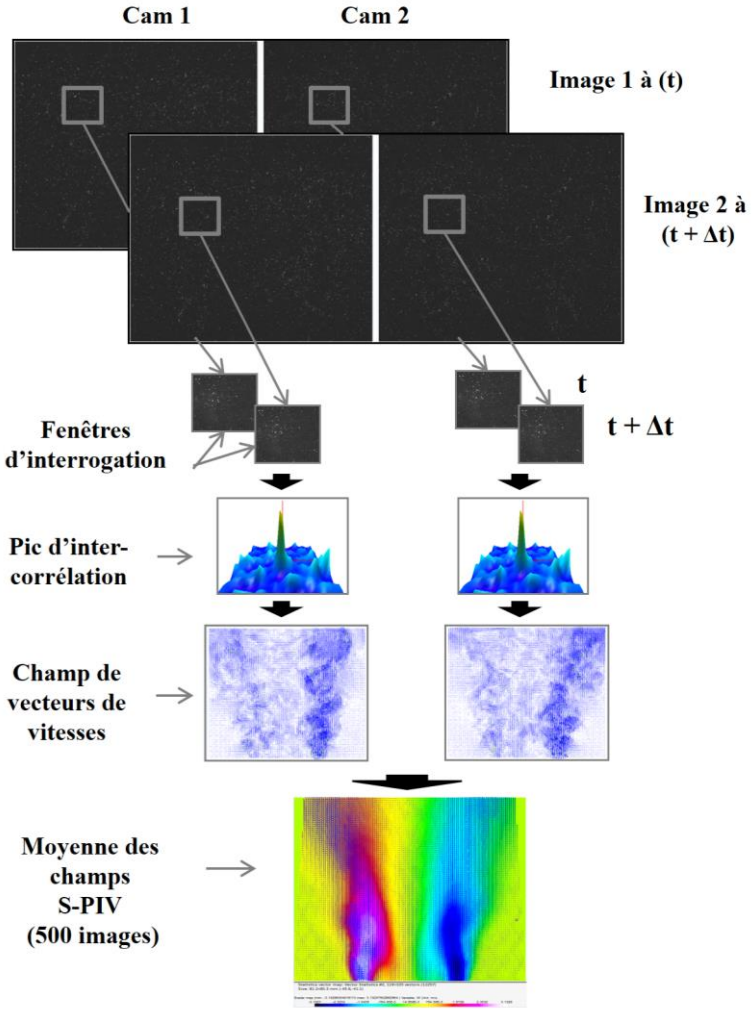


Figure 2.20 : Schéma des étapes principales de traitement Stéréo-PIV.

Afin de s'assurer que les mesures Stéréo-PIV sont correctes, il est important de vérifier au préalable la précision de mesures de vitesse effectuées. En effet, il faut s'assurer du fait que les mesures ne sont pas affectées par les biais de mesures du système d'imagerie utilisé,

notamment le « peak-locking » lors de l'interpolation gaussienne, qui tend généralement à concentrer les déplacements vers des valeurs entières de pixels [153].

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 (l'écart-type, RMS). Pour ce faire, les calculs sont effectués avec 500 images pour chaque caméra et pour toutes les séries de mesures.

2.4 Paramètres opératoires de l'étude

2.4.1 Paramètres de l'étude

Nous présentons dans cette section les paramètres globaux relatifs au cas d'études présentés dans cette thèse.

- ***La richesse globale à l'injection ϕ :***

Nous définissons la richesse globale à l'injection ϕ comme suit :

$$\boldsymbol{\phi} = \mathbf{2}\,\frac{\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{CH_4}}}{\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{tot,O_2}}} \tag{55}$$

$\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{CH_4}}$ est le débit volumique du méthane et $\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{tot,O_2}}$ désigne le débit volumique total du dioxygène contenu dans l'oxydant. Le facteur 2 correspond à l'inverse du rapport débit de CH_4 sur débit d'oxygène à la stœchiométrie.

- ***Le taux d'enrichissement à l'oxygène Ω :***

La teneur d'enrichissement en dioxygène représente la proportion du dioxygène dans le mélange O_2/N_2 et s'écrit :

$$\boldsymbol{\Omega} = \frac{\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{tot,O_2}}}{\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{tot,O_2}} + \dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{N_2}}} \tag{56}$$

Avec

$$\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{tot,O_2}} = \dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{O_2}} + \mathbf{0,21}\,\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{air}} \tag{57}$$

$\dot{Q}_{air}$ désigne le débit volumique d'air. L'enrichissement à l'oxygène de l'air est réalisé par injection de dioxygène pur $\dot{Q}_{O_2}$ dans l'oxydant dans le but d'obtenir la teneur volumique souhaité. 0,21 désigne la fraction volumique d'oxygène contenue dans l'air provenant du compresseur du laboratoire.

- ***Le taux de dilution en dioxyde de carbone %CO_2 vol. :***

On définit la teneur de dilution en CO_2 par le rapport suivant :

$$\%CO_2\ vol. = \frac{\dot{Q}_{CO_2}}{\dot{Q}_{tot,Oxydant}} \tag{58}$$

$\dot{Q}_{tot,Oxydant}$ désigne le débit total de l'oxydant fixé à 150 NL/min dans toute l'étude. Il s'écrit :

$$\dot{Q}_{tot,Oxydant} = \dot{Q}_{O_2} + \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_{CO_2} + \dot{Q}_{H_2O} \tag{59}$$

- ***Le taux de dilution en vapeur d'eau %H_2O vol. :***

On définit la teneur de dilution en vapeur d'eau par le rapport suivant :

$$\%H_2O\ vol. = \frac{\dot{Q}_{H_2O}}{\dot{Q}_{tot,Oxydant}} \tag{60}$$

- ***Le nombre de swirl Sn et Sn_g :***

Nous rappelons ici l'expression du nombre de swirl définie par Gupta *et al.* [38] :

$$Sn = \frac{G_\theta}{R\ G_z} \tag{61}$$

Nous pouvons aussi définir une expression théorique du nombre de swirl dépendant de la géométrie du swirler qu'on notera Sn_g [53], il s'écrit :

$$Sn_g = \frac{1}{1-\Psi}\left(\frac{1}{2}\right)\frac{1-\left(\frac{R_{tube}}{R_b}\right)^4}{1-\left(\frac{R_{tube}}{R_b}\right)^2}\tan(\alpha) \qquad (62)$$

Ψ désigne le coefficient de blocage, R_{tube} le rayon externe du tube central, R_b le rayon du tube coaxial et α l'angle de la pale sur le bord externe du swirler.

- ***Le nombre de Reynolds Re :***

Le nombre de Reynolds est calculé sur la base du diamètre hydraulique D_h dans les conditions normales de température et de pression (CNTP, 0°C et 1atm) et s'écrit :

$$Re_{mél\ gaz}^{CNTP,D_h} = \frac{\rho_{mél}\, v\, D_h}{\mu_{mél}} \qquad (63)$$

$\rho_{mél}$ désigne la masse volumique du mélange considéré que nous notons :

$$\rho_{mél} = \frac{PM_{mél}}{RT} \qquad (64)$$

Avec

$$M_{mél} = \sum_{i=1}^{k} X_i M_i \qquad (65)$$

X_i **et** M_i sont respectivement la fraction molaire et la masse molaire du constituant i et $\mu_{mél}$ est la viscosité dynamique du mélange, elle est définie par :

$$\mu_{mél} = \left(\sum_i \frac{c_i}{\mu_i}\right)^{-1} \qquad (66)$$

c_i est la fraction massique du constituant i et elle s'écrit :

$$c_i = \frac{X_i M_i}{\sum_{i=1}^{k} X_i M_i} \qquad (67)$$

2.4.2 Conditions opératoires

Dans cette étude, les conditions opératoires dépendent de la technique de mesure utilisée. Un tableau récapitulatif des différentes conditions opératoires sera présenté avant chaque section de résultats dans les chapitres suivants. Globalement, nous avons opté pour trois nombres de swirl 0,8 ; 1,1 et 1,4, nous avons considéré trois richesses 0,8 ; 0,9 et 1. La teneur en O_2 varie de 21 à 30 % vol. dans l'air et le taux de dilution en CO_2 et/ou en vapeur d'eau varie entre 0 et 20 % vol. dans le mélange (oxydant + diluant). Les essais sont réalisés à pression atmosphérique. Dans le cas des études en non-réactif, nous avons remplacé le méthane par du diazote N_2. Le tableau ci-dessous rassemble les conditions opératoires dans le cas de la dilution en CO_2 et de l'enrichissement en dioxygène pour une richesse de 0,8.

Tableau 2.4: Tableau récapitulatif des conditions opératoires dans le cas de la dilution en CO_2 et de l'enrichissement en dioxygène pour une richesse de 0,8.

ϕ	Ω (% vol.)	CO_2 (% vol.)	$\dot{m}_{air}$ (g/s)	$\dot{m}_{CH_4}$ (g/s)	$\dot{m}_{O_2}$ (g/s)	$\dot{m}_{CO_2}$ (g/s)	$v_{CH_4}^{CNTP}$ (m/s)	$v_{CH_4+Ox}^{CNTP}$ (m/s)	$Re_{CH_4+Ox}^{CNTP}$
0.8	**21**	**4**	3.28	0.144	0	0.197	3.6	2.8	4712
0.8	**21**	**8**	3.32	0.138	0	0.394	3.4	2.8	4533
0.8	**21**	**12**	3.34	0.132	0	0.591	3.3	2.8	4394
0.8	**21**	**16**	3.36	0.126	0	0.788	3.1	2.8	4235
0.8	**21**	**20**	3.35	0.120	0	0.985	3	2.8	4076
0.8	**23**	**4**	3.2	0.158	0.09	0.197	3.9	2.8	4646
0.8	**23**	**8**	3.24	0.151	0.08	0.394	3.7	2.8	4490
0.8	**23**	**12**	3.27	0.145	0.08	0.591	3.6	2.8	4333
0.8	**23**	**16**	3.28	0.138	0.07	0.788	3.5	2.8	4177
0.8	**23**	**20**	3.28	0.132	0.07	0.985	3.3	2.8	4020
0.8	**25**	**4**	3.12	0.172	0.17	0.197	4.2	2.9	4579
0.8	**25**	**8**	3.16	0.165	0.17	0.394	4.1	2.9	4426
0.8	**25**	**12**	3.19	0.157	0.16	0.591	3.9	2.9	4273
0.8	**25**	**16**	3.2	0.150	0.15	0.788	3.8	2.8	4119

0.8	**25**	**20**	3.2	0.143	0.14	0.985	3.7	2.8	3965
0.8	**27**	**4**	3.05	0.186	0.26	0.197	4.6	2.9	4513
0.8	**27**	**8**	3.09	0.178	0.25	0.394	4.5	2.9	4362
0.8	**27**	**12**	3.12	0.170	0.24	0.591	4.3	2.9	4212
0.8	**27**	**16**	3.12	0.162	0.23	0.788	4.2	2.9	4061
0.8	**27**	**20**	3.12	0.155	0.22	0.985	4	2.9	3909
0.8	**30**	**4**	2.94	0.206	0.39	0.197	5.1	2.9	4414
0.8	**30**	**8**	2.97	0.198	0.37	0.394	5	2.9	4267
0.8	**30**	**12**	2.99	0.189	0.36	0.591	4.9	2.9	4120
0.8	**30**	**16**	3	0.181	0.34	0.788	4.7	2.9	3973
0.8	**30**	**20**	3	0.172	0.32	0.985	4.6	2.9	3826

$\dot{m}$ désigne les débits massiques des différents réactifs et diluants. Les vitesses sont calculées à partir des débits massiques et de la section débitante. $v_{CH_4}^{CNTP}$ représente la vitesse débitante du méthane dans chaque trous du l'injecteur radial. $v_{CH_4+Ox}^{CNTP}$ désigne la vitesse débitante de la somme des débits CH_4 + mélange (oxydant + diluant) à la sortie de la section annulaire. La méthode de calcul repose sur la loi des gaz parfaits et les différentes grandeurs sont calculées dans les conditions normales de température et de pression CNTP. Durant toute l'étude, les débits sont mentionnés en NL/min nous renseignons dans le tableau suivant un exemple des conditions étudiés dans le cas de l'enrichissement à l'oxygène en débit volumiques pour 3 richesses globales à l'injection.

Tableau 2.5 : Exemple de conditions opératoires en débits volumiques

	ϕ = 0,8			**ϕ = 0,9**			**ϕ = 1**		
Ω	$\dot{Q}_{air}$ *(NL/min)*	$\dot{Q}_{CH_4}$ *(NL/min)*	$\dot{Q}_{O_2}$ *(NL/min)*	$\dot{Q}_{air}$ *(NL/min)*	$\dot{Q}_{CH_4}$ *(NL/min)*	$\dot{Q}_{O_2}$ *(NL/min)*	$\dot{Q}_{air}$ *(NL/min)*	$\dot{Q}_{CH_4}$ *(NL/min)*	$\dot{Q}_{O_2}$ *(NL/min)*
21	150	12,6	0	150	14,18	0	150	15,75	0
23	146,2	13,8	3,8	146,2	15,53	3,8	146,2	17,25	3,8
25	142,4	15	7,6	142,4	16,88	7,6	142,4	18,75	7,6

27	138,6	16,2	11,4	138,6	18,23	11,4	138,6	20,25	11,4
30	133	18	17	133	20,25	17	133	22,50	17

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le dispositif expérimental et les différentes techniques de mesures utilisée au cours de ce travail ont été présentés. Les méthodologies suivies pour traiter les différentes données expérimentales acquises ont été explicitement exposées pour chaque technique.

Les différentes techniques permettent d'avoir un aperçu global sur plusieurs aspects intervenant dans cette étude :

- Aspect structurel et stabilité : Chimiluminescence OH* (mesure des concentrations OH* par émission directe de la flamme à 306 nm) et étude de l'effet plasma par arc glissant sur la stabilité de la flamme.
- Aspect physico-chimique : Analyse en continu des gaz de combustion (mesures des concentrations des espèces dans les gaz brûlés : NO_X, CO, CO_2, O_2 et CH_4) et mesure des températures au point de prélèvement des fumées.
- Aspect dynamique : Stéréo-PIV (mesure des champs des vitesses à partir des champs de déplacement des particules) et LDV (mesure des vitesses longitudinales et des intensités de turbulence correspondantes temporelles).

Après avoir présenté les différents moyens expérimentaux utilisés au cours du présent travail, nous allons commencer par présenter, dans le prochain chapitre, les résultats des différentes études réalisées portant sur la stabilité et l'évolution des émissions polluantes.

Chapitre 3. Aspect structurel de flamme, stabilité et émissions polluantes

3.1 Introduction 83

3.2 Simulation numérique COSILAB 83

3.2.1 Mode de fonctionnement 84

3.2.2 Résultats et discussions 85

3.3 Limites de stabilité des flammes 87

3.3.1 Cartographie des limites de stabilité des flammes sans et avec swirler 88

3.3.2 Cartographie des limites de stabilité des flammes sans et avec enrichissement en oxygène 91

3.3.3 Limites de stabilité dans le cas de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau 92

3.4 Localisation spatiale de la flamme 92

3.4.1 Effets de l'enrichissement à l'oxygène sur la position spatiale de la flamme 93

3.4.2 Effets de la dilution en CO_2 et H_2O sur la position spatiale de la flamme 96

- Effets du CO_2 97
- Effets de la vapeur d'eau 99
- Effets des EGR 103

3.4.3 Effets de l'intensité du swirl sur la position spatiale de la flamme 106

3.4.4 Effets de plasma sur la stabilité et la position spatiale de la flamme 108

3.5 Formation des émissions polluantes et évolution des températures des fumées. 109

3.5.1 Effets de l'intensité du swirl 119

3.5.2 Effets de la richesse globale et de l'enrichissement à l'oxygène 111

3.5.3 Effets de la dilution en CO_2 et H_2O 113

3.5.4 Effets de plasma sur l'évolution des gaz de fumées 121

3.6 Conclusion 127

3.1 Introduction

Ce chapitre est composé de quatre parties principales. La première partie concerne la simulation numérique à l'aide du logiciel COSILAB. Elle comprend le mode de fonctionnement des codes de calculs et les paramètres fondamentaux de combustion découlant des simulations effectuées, ainsi que les résultats obtenus avec ces simulations.

La seconde et la troisième partie sont consacrées à la caractérisation des zones d'accrochage, de stabilité, de décrochage ou de soufflage de la flamme et à l'étude de la structure des flammes swirlées enrichies en oxygène et diluées en CO_2 et en vapeur d'eau. Tout d'abord, les diagrammes de stabilité pour deux nombres de swirl avec et sans enrichissement y sont présentés. Ensuite, les résultats portant sur la stabilité et la position spatiale de la flamme en fonction des paramètres de l'étude : richesse, enrichissement à l'oxygène, dilution en gaz de combustion, intensité de swirl et intensité de plasma, notamment les hauteurs d'accrochage et les longueurs de flammes, sont présentés et analysés. Cette étude de stabilité justifie le choix des conditions opératoires présentées dans ce travail.

La quatrième partie de ce chapitre est dédiée à l'étude des évolutions des émissions polluantes avec les différents paramètres de l'étude. Les émissions polluantes, NO_X et CO en particulier, sont mesurées en continu grâce à des analyseurs multigaz de type HORIBA PG250 et ABB2020. Les mesures sont effectuées sur des fumées sèches et couplées à des mesures de températures des fumées à la sortie de la chambre de combustion.

3.2 Simulation numérique COSILAB

Le logiciel COSILAB [154] a été utilisé au cours de cette thèse pour effectuer une étude de modélisation préliminaire et prédictive sur les effets physico-chimiques des aspects (enrichissement et dilution) abordés durant cette thèse. Ce logiciel constitue un ensemble de modules permettant de faire des simulations des phénomènes de combustion allant de 0D (calcul à l'équilibre thermodynamique, calcul pour moteur automobiles HCCI ou diesel, etc.) à la simulation des phénomènes plus complexes 1D ou 2D (jets libres, flamme à jet opposées, analyse des voies réactionnelles, etc.). Deux codes de calculs en particulier ont été utilisés au cours de cette thèse. Pour le premier, les simulations ont été effectuées en 0D avec le package « Equilibrium calculations » dans le but de calculer les températures à l'équilibre thermodynamique. Tandis que pour le second, des calculs en 1D avec le package « freely propagating flame » ont été réalisés afin de modéliser les vitesses de flamme laminaire.

3.2.1 Mode de fonctionnement

Le mode de fonctionnement des codes « Equilibrium calculations » et « One-dimensional freely propagating flame » du logiciel COSILAB repose sur une architecture commune schématisée sur la Figure 3.1.

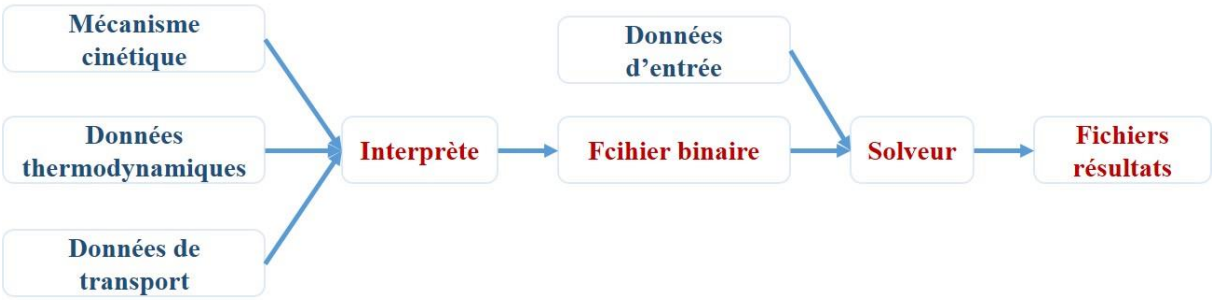


Figure 3.1 : Schéma du fonctionnement des codes de calcul COSILAB, en bleu : les paramètres définis par l'utilisateur ; en rouge : les systèmes contrôlés ou fichiers générés par le programme.

Le logiciel analyse et vérifie dans un premier temps la bonne syntaxe des trois fichiers d'entrée renseignés par l'utilisateur. Ces trois fichiers regroupent :

- Le mécanisme réactionnel qui regroupe toutes les réactions chimiques élémentaires et toutes les espèces chimiques impliquées. Le fichier comporte également les paramètres cinétiques (A, β, Ea) pour chaque réaction élémentaire sous la forme d'Arrhenius ($k = A.T^{\beta}.\exp(-Ea/RT)$). Avec A, le facteur exponentiel, β le terme de dépendance en température et Ea l'énergie d'activation.
- Les données thermodynamiques où sont renseignés les polynômes permettant d'obtenir, pour deux domaines de températures définis, l'enthalpie, l'entropie et la chaleur spécifique de chaque espèce déclarée dans le mécanisme réactionnel.
- Les données de transport où sont répertoriés les paramètres moléculaires des espèces déclarées tels leur moment dipolaire, leur potentiel de Lennard-Jones ou encore leur géométrie (simple atome, molécule linéaire ou non linéaire).

Après vérification, le programme COSILAB compile ces trois derniers fichiers en un seul fichier binaire utilisable par les différents solveurs du logiciel. À ce stade, l'utilisateur spécifie les données d'entrée (composition du mélange, conditions thermodynamiques initiales (T et P) et le type du réacteur (isochore, isobare, etc…) afin de résoudre un système d'équations différentielles représentant l'évolution du système réactif. Une fois l'étape de résolution des équations effectuée, un fichier résultat rassemblant les solutions obtenues est généré.

3.2.2 Résultats et discussions

Dans le but de modéliser les effets de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur une flamme CH_4/air enrichie à l'oxygène, nous avons utilisé le mécanisme réactionnel GRI-mech [92]. Dans un premier temps, nous avons réalisé les calculs avec GRI-mech sur une flamme CH_4-air afin de valider le mécanisme. La Figure 3.2 illustre la vitesse de flamme laminaire CH_4-air calculée en fonction de la richesse dans les conditions standards de température et de pression (300K, 1bar). Les calculs sont comparés aux mesures obtenues de la littérature. Une bonne concordance entre la vitesse calculée par le mécanisme GRI-mech et les résultats de la littérature est observée. Notons que les résultats sont meilleurs dans la gamme de richesse 0,8-1,2, gamme qui nous intéresse particulièrement dans ce travail.

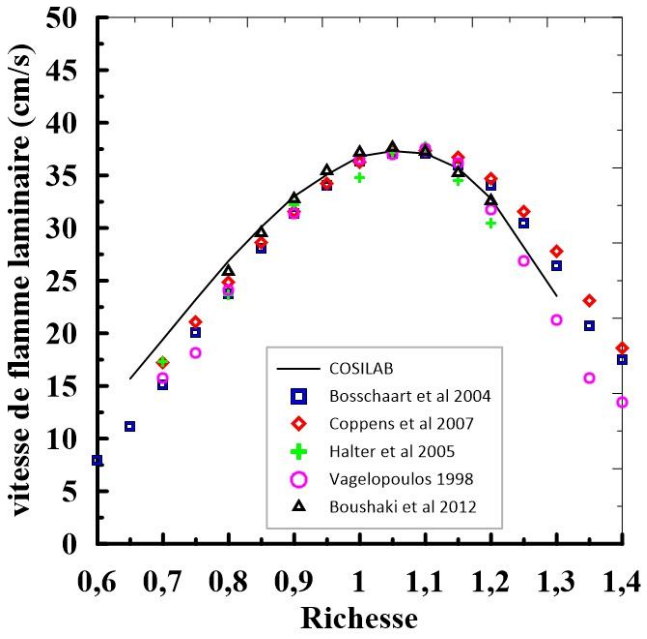


Figure 3.2 : Vitesse de flamme laminaire CH_4-air calculée avec COSILAB et comparaison avec les résultats expérimentaux issus de la littérature [124,155–158].

La Figure 3.3 présente la vitesse de flamme laminaire CH_4-air en fonction de l'enrichissement à l'oxygène O_2 pour une richesse ϕ = 0,8. Nous remarquons que l'augmentation du taux d'oxygène dans le mélange favorise la combustion ce qui se traduit par une augmentation significative de la vitesse de flamme laminaire.

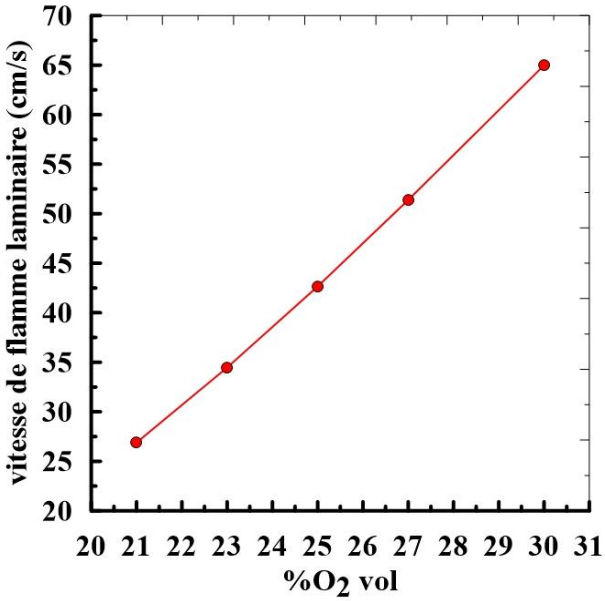


Figure 3.3 : Effet de l'enrichissement à l'oxygène O_2 sur la vitesse de flamme laminaire CH_4-air pour ϕ=0,8 à T=300 K et P=1 bar .

Pour un taux d'enrichissement en oxygène de 25% O_2 vol., nous avons comparé sur la Figure 3.4 l'effet de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur la vitesse de flamme laminaire pour un taux de dilution fixe de 10 % vol. Nous pouvons noter un écart d'environ 10 cm/s entre le cas de dilution en CO_2 et le cas de dilution en vapeur d'eau notamment pour le mélange riche. Pour le mélange pauvre à ϕ = 0,8, nous notons une augmentation d'environ 6 cm/s.

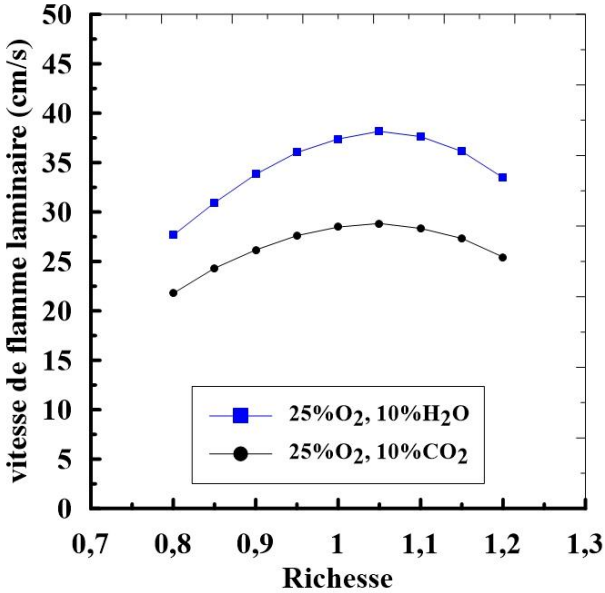


Figure 3.4 : Vitesse de flamme laminaire en fonction de la richesse pour une dilution de 10% en CO_2 et H_2O et un enrichissement à l'oxygène de 25% vol. à T=300 K et P = 1 bar.

Les évolutions de la température à l'équilibre et la vitesse de flamme laminaire en fonction du taux de dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sont illustrées dans la Figure 3.5. Nous observons une chute de température de combustion avec la dilution. La température de flamme diluée au CO_2 décroît plus rapidement par rapport à celle de la dilution en vapeur d'eau. Cette différence est probablement liée à la plus grande capacité calorifique du CO_2. En ce qui concerne la vitesse de flamme laminaire, nous pouvons observer également une diminution de la vitesse avec la dilution. Cette baisse est liée à la diminution de la quantité des réactifs dans le mélange avec la dilution donc à une puissance plus faible. Nous pouvons constater d'après ces premiers résultats que la dilution en EGR est dominée par le CO_2.

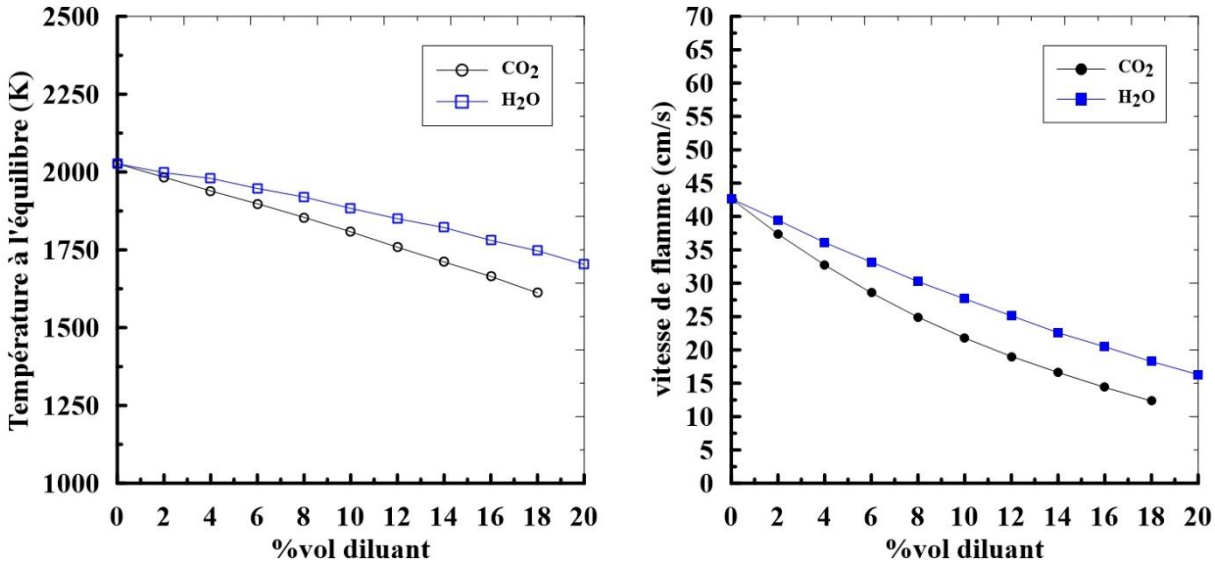


Figure 3.5 : Effet de la dilution en CO_2 et H_2O sur (a) la température de combustion et (b) la vitesse de flamme laminaire pour ϕ=0,8, 25% O_2 vol, à T=300 K et P = 1 bar.

3.3 Limites de stabilité des flammes

Afin de caractériser les zones de stabilité de la flamme et distinguer les différents régimes de stabilisation rencontrés dans le cas du brûleur coaxial à swirler utilisé, nous présentons dans la première partie de cette section les diagrammes des limites de stabilité des flammes sous plusieurs conditions, réalisés auparavant par Merlo [97]. Les cartographies sont présentées en fonction du couple débit du méthane et débit d'air. Elles ont été élaborées en fixant le débit de méthane et en augmentant le débit d'air afin de déterminer les zones de transition, matérialisées par les points d'observation, caractérisant les différents modes de

stabilisation. Trois paramètres ont été abordés durant cette étude, la richesse globale à l'injection, le nombre de swirl Sn, et l'enrichissement à l'oxygène.

Quatre régimes de stabilisation de la flamme ont été distingués dans cette étude :

Flamme accrochée : flamme accrochée à la partie supérieure de l'injecteur radial, ou bien sur les côtés au niveau de la sortie du méthane pour les cas avec un enrichissement en O_2 élevé.

Flamme décrochée (liftée) stable : la base de flamme est loin du brûleur, ce régime apparaît lorsque le débit de CH_4 augmente à débit d'oxydant constant. La flamme se décroche graduellement du brûleur en générant des points de rupture proches de la sortie du brûleur.

Flamme décrochée instable : La base la flamme fluctue notablement, la flamme présente parfois des extinctions locales suivant les conditions des débits d'oxydant et de méthane. Ces fluctuations sont liées au trois phénomènes suivants : le mouvement de précession de l'écoulement, le vortex à grande échelle et le déplacement instationnaire de la zone de réaction.

Flamme soufflée : La flamme est soufflée brusquement soit à partir de l'état lifté instable ou bien l'état accroché stable. Nous rencontrons ce type de flamme fréquemment dans les cas de grands débits de méthane ou de forts taux de dilution en CO_2 suivant les conditions opératoires.

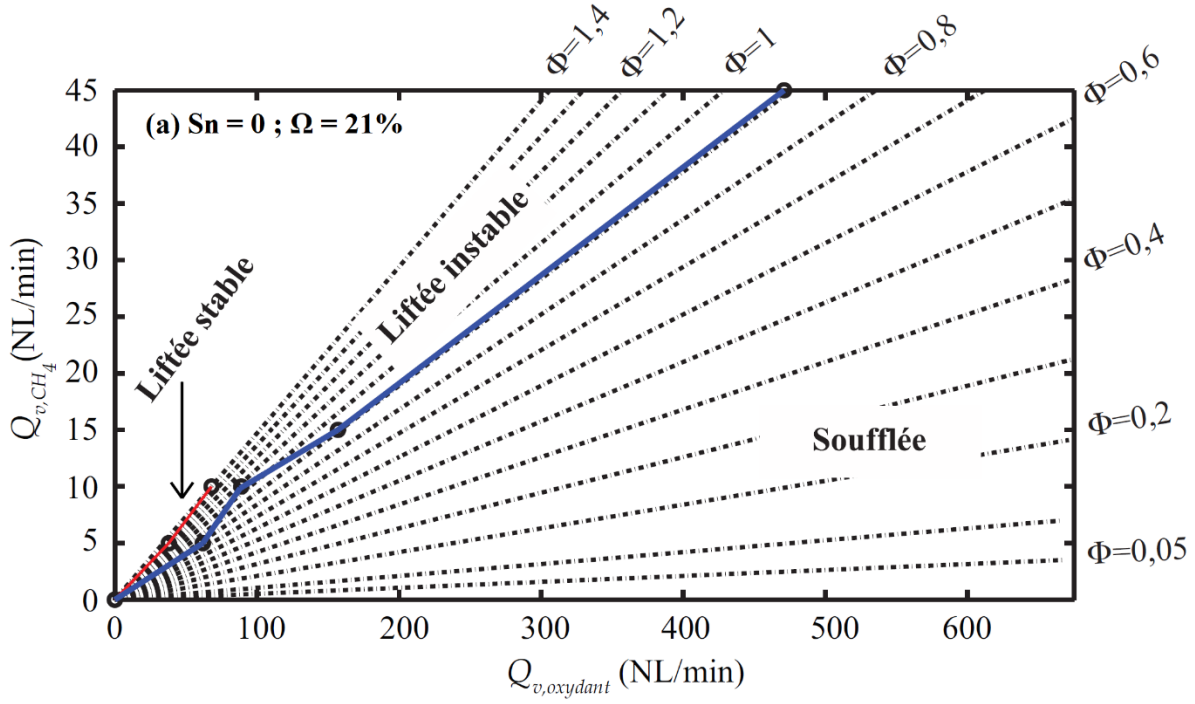
3.3.1 Cartographie des limites de stabilité des flammes sans et avec swirler

La mise en rotation du jet permet à la flamme d'élargir sa zone de stabilité comme le montre la Figure 3.6 (b). Ceci souligne l'impact du swirl sur l'amélioration de la stabilité de la flamme. Dans le cas de notre brûleur coaxial, en l'absence du swirler (Figure 3.6 (a)), le domaine où la flamme est liftée stable reste très restreint et se limite à une richesse globale de 1,4 à un très faible débit d'air (< 10 NL/min). Les limites de soufflage de flammes dans les jets annulaires avec bluff-body peuvent être liées à plusieurs paramètres : l'angle d'injection du combustible [159], le rapport vitesse du combustible sur vitesse du comburant [160,161] ainsi que la géométrie du bluff body [162,163]. Tong et al [160] soulignent que l'injection d'un jet d'air central atténue la charge thermique vers la surface du corps du bluff-body, mais l'injection du jet d'air favorise le soufflage de la flamme.

En effet, la zone de recirculation créée par le swirler permet de ramener les intermédiaires réactionnels à haute température à la base de la flamme qui favorisent la stabilisation de celle-

ci. Cet effet est accentué pour les débits d'air supérieurs à 400 NL/min. Contrairement aux jets annulaires avec bluff-body, la stabilisation des flammes swirlées est accrue lorsque le débit d'air augmente, ce qui permet à la zone de recirculation de se déplacer en amont de l'écoulement comme le décrivent Kroner et Sattelmayer [164] suite au phénomène d'éclatement tourbillonnaire induit par la combustion. Nous pouvons noter aussi que le swirler génère une zone où la flamme passe de l'état lifté instable à un état soufflé pour les débits de méthane supérieurs à 25 NL/min et des richesses globales supérieures à 1. La présence du swirler permet d'accroître la zone où la flamme est liftée stable et instable et aussi de permettre l'accrochage de la flamme pour une large gamme de puissance et de forts débits d'air, typiquement supérieurs à 200 NL/min.

Les Figure 3.6 (b) et Figure 3.6 (c) présentent les effets de l'augmentation du nombre de swirl de 0,8 à 1,4 sur la stabilisation de la flamme. Nous constatons à partir de cette comparaison que l'intensité du swirl joue un rôle très important sur la stabilisation de la flamme. Pour les débits d'air inférieurs à 400 NL/min, l'augmentation de Sn induit un élargissement de la zone où la flamme est accrochée. Le cas du Sn = 1,4 présente un domaine, dans lequel la flamme est soufflée, qui apparaît plus tôt lorsque le débit de méthane augmente à débit d'air fixé supérieur à 300 NL/min. Par contre, nous observons la présence d'une zone soufflée pour de faibles débits de CH_4 et des débits d'air supérieurs à 500 NL/min.



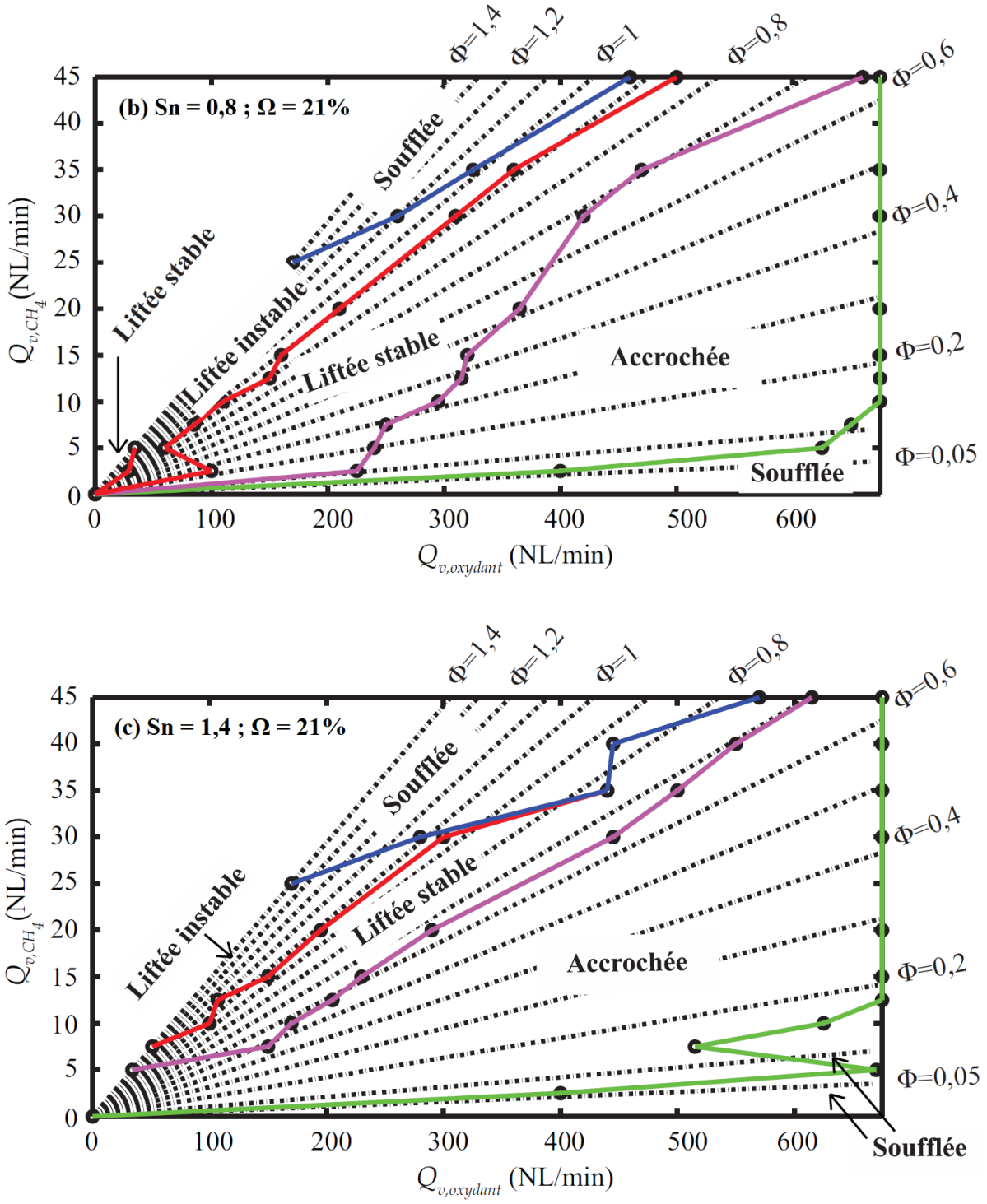


Figure 3.6 : Cartographies des limites de stabilité des flammes non-prémélangées issues du brûleur coaxial à swirler en fonction du débit d'air et de méthane : (a) sans swirler ; (b) avec swirler Sn=0,8 ; (c) avec swirler Sn=1,4 [97].

3.3.2 Cartographie des limites de stabilité des flammes sans et avec enrichissement en oxygène

La Figure 3.7 présente les zones de stabilisation de la flamme pour le cas avec l'enrichissement à l'oxygène à 25% vol. pour un nombre de swirl de 1,4. Les résultats montrent une extension du domaine dans lequel la flamme est accrochée en comparaison avec le cas sans enrichissement à l'oxygène (Figure 3.6 (c)). Ceci résulte de l'élargissement des limites d'inflammabilité et une augmentation de la vitesse de combustion laminaire, les deux sont liés à l'enrichissement à l'oxygène. Dans ce cas, la flamme peut se stabiliser dans les régions où le mélange local est soit pauvre soit riche en combustible, mais loin de la stœchiométrie, et où les gradients de fraction de mélange et de vitesse sont plus élevés. Nous observons aussi un rétrécissement de la zone liftée instable pour les régimes de combustion laminaires et des richesses globales supérieures à la stœchiométrie.

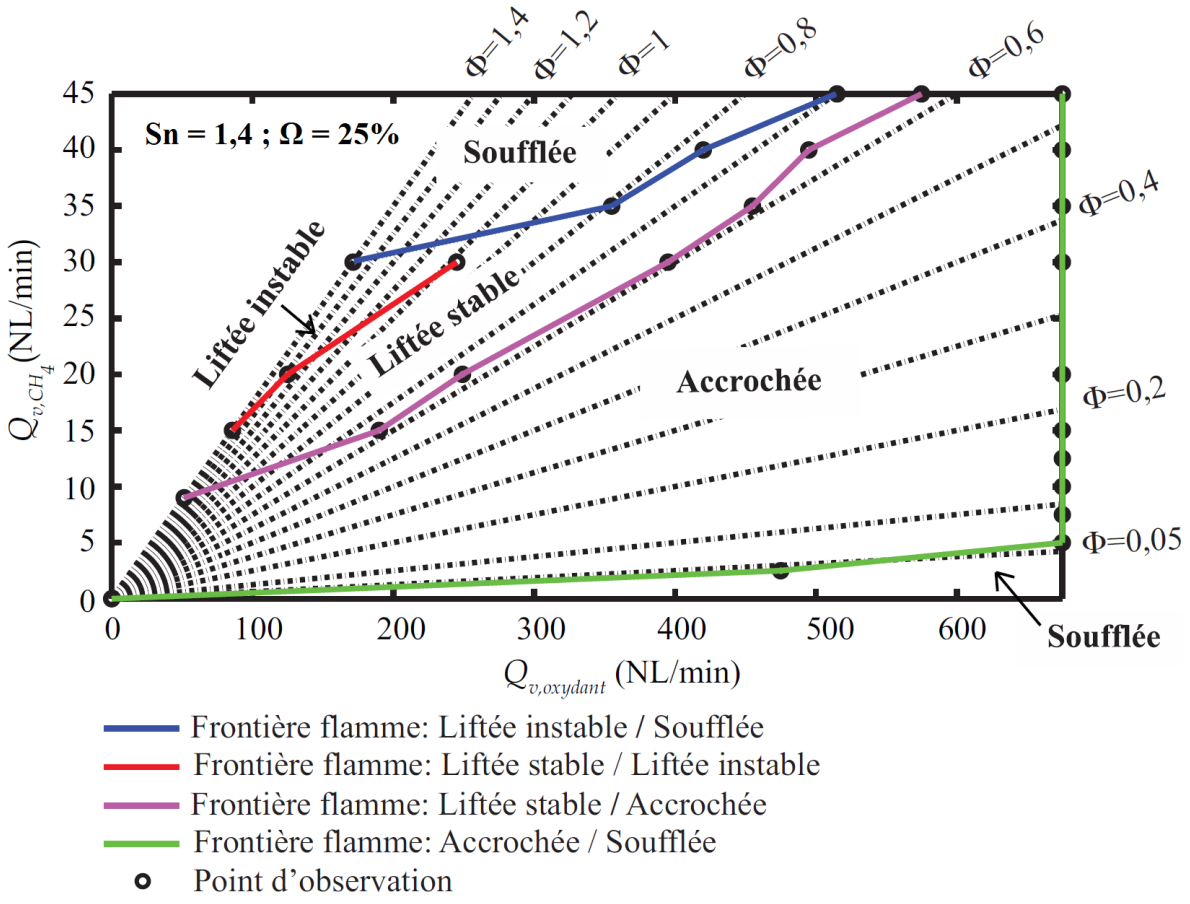


Figure 3.7 : Cartographies des limites de stabilité des flammes nonprémélangées issues du brûleur coaxial à swirler en fonction du débit d'oxydant et de méthane avec un enrichissement de 25% O_2 [97].

3.3.3 Choix de la zone d'étude lors de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau

Pour étudier les effets de la dilution en CO_2 et H_2O, nous avons choisi la zone de flamme liftée stable à partir des diagrammes de stabilité précédents. Ce choix est justifié par deux raisons. La suspension de la flamme permet d'éviter la détérioration thermique du brûleur, notamment avec l'enrichissement en dioxygène qui augmente significativement la température de la flamme. Le cas stable est pris comme référence, ce qui permet de voir la réponse de la flamme sous l'effet de la dilution en termes de perte de stabilité, voire du soufflage de flamme. Nous pouvons ainsi déterminer les limites d'utilisation des taux de dilution en CO_2, H_2O et en EGR (CO_2 + H_2O). Suite à cette étude, nous avons fixé un débit d'oxydant de 150 NL/min pour toutes les configurations étudiées. Les images moyennes de chimiluminescence OH* présentées dans la section suivante nous permettent de caractériser les zones d'accrochage et de décrochage de la flamme dans le cas de la dilution. Les fluctuations de la flamme sont représentées ensuite sous forme de barres d'erreurs afin d'identifier les régimes de stabilité et d'instabilité des flammes.

3.4 Localisation spatiale de la flamme

Pour mieux discerner la position spatiale de la flamme, il est nécessaire d'étudier les processus thermiques et chimiques qui se produisent dans la zone de réaction. Dans cette perspective, les mesures de OH* vont être exploitées pour une large gamme de conditions opératoires. Comme nous l'avons noté dans la section 2.3.2 du deuxième chapitre, OH* est un bon marqueur de la zone de réaction. Cependant, une bonne interprétation des mesures issues de la chimiluminescence requiert une bonne connaissance de la cinétique menant à la formation de cette espèce électroniquement excitée. Rappelons que l'intensité de OH* est principalement proportionnelle aux concentrations locales de CH et O_2. Les cas étudiés sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.1 : Tableau récapitulatif des conditions opératoires traitées par chimiluminescence OH.*

Sn	ϕ	Ω	% vol. CO_2 dans l'oxydant	% vol. H_2O dans l'oxydant	% vol. EGR dans l'oxydant	Ω	% EGR dans l'oxydant
0.8	0.8	21 25	0 4 8 12 16 20	0 4 8 12 16 20	10 CO_2 + 10 H_2O 5 CO_2 + 15 H_2O 15 CO_2 + 5 H_2O	21 23 25 27 30	0 CO_2 + 0 H_2O 10 CO_2 + 10 H_2O
1.1	0.8	25	0 4 8 12 16 20	0 4 8 12 16 20	10 CO_2 + 10 H_2O 5 CO_2 + 15 H_2O 15 CO_2 + 5 H_2O	21 23 25 27 30	0 CO_2 + 0 H_2O 10 CO_2 + 10 H_2O
1.4	0.8	25	0 4 8 12 16 20	0 4 8 12 16 20	10 CO_2 + 10 H_2O 5 CO_2 + 15 H_2O 15 CO_2 + 5 H_2O	21 23 25 27 30	0 CO_2 + 0 H_2O 10 CO_2 + 10 H_2O

3.4.1 Effets de l'enrichissement à l'oxygène sur la position spatiale de la flamme

L'effet de l'enrichissement à l'oxygène sur le positionnement des flammes de diffusion turbulentes swirlées est décrit dans cette section. La Figure 3.8 présente la localisation spatiale et la structure de la zone de réaction dans l'espace à travers les images moyennes de chimiluminescence OH* de la flamme pour cinq teneurs en oxygène 21, 23, 25, 27 et 30 % vol. et trois nombres de swirl différents 0,8, 1,1 et 1,4 pour une richesse globale avant l'injection de 0,8. Il faut noter que la richesse globale et le débit de l'oxydant sont maintenus fixes à 0,8 et 150 NL/min respectivement, en présence de l'enrichissement pour toute l'étude. Par conséquent, seul le débit du méthane augmente avec l'augmentation du taux d'enrichissement dans le mélange oxydant. Notons que les images moyennes sont réalisées à partir de 300 images instantanées. En ce qui concerne la forme de la flamme, nous pouvons observer une structure relativement asymétrique sous forme de tulipe [145], qui s'ouvre progressivement lorsqu'on s'éloigne de la sortie du brûleur, pour toutes les conditions. Nous rappelons que la transformée d'Abel ne peut pas être appliquée à notre flamme avec l'absence d'axisymétrie du signal OH*. En effet, le couplage dans le positionnement des pales du

swirler avec l'axe des trous d'injection radiale du méthane ne peut pas être pris en compte dans la vision 2D intégrée dans la ligne de visée. Nous pouvons distinguer à partir des images moyennes de la flamme la présence de deux lobes plus intenses qui résultent de l'intégration du signal de chimiluminescence sur la ligne de visée. Nous observons à partir des images moyennes que l'enrichissement à l'oxygène a tendance de rapprocher, voire accrocher la base de la flamme au brûleur. Nous pouvons constater que l'enrichissement à l'oxygène atténue la séparation distinctive des zones réactionnelles de la flamme et ayant pour origine les huit trous d'injection radiale du méthane. La combinaison d'une augmentation de l'intensité du swirl et l'augmentation de l'enrichissement à l'oxygène induit l'accrochage complet de la flamme sur le nez du brûleur en formant une flamme complètement jaune, témoignant la présence des suies dans les flammes. Notons que la partie centrale jaune de la flamme pour les cas où la flamme est complètement accrochée (généralement $\geq$ 27 % O_2 vol.) n'émet que très peu de OH*. L'enrichissement à l'oxygène semble réduire la longueur de la flamme qui se traduit par une flamme compacte et complètement accrochée.

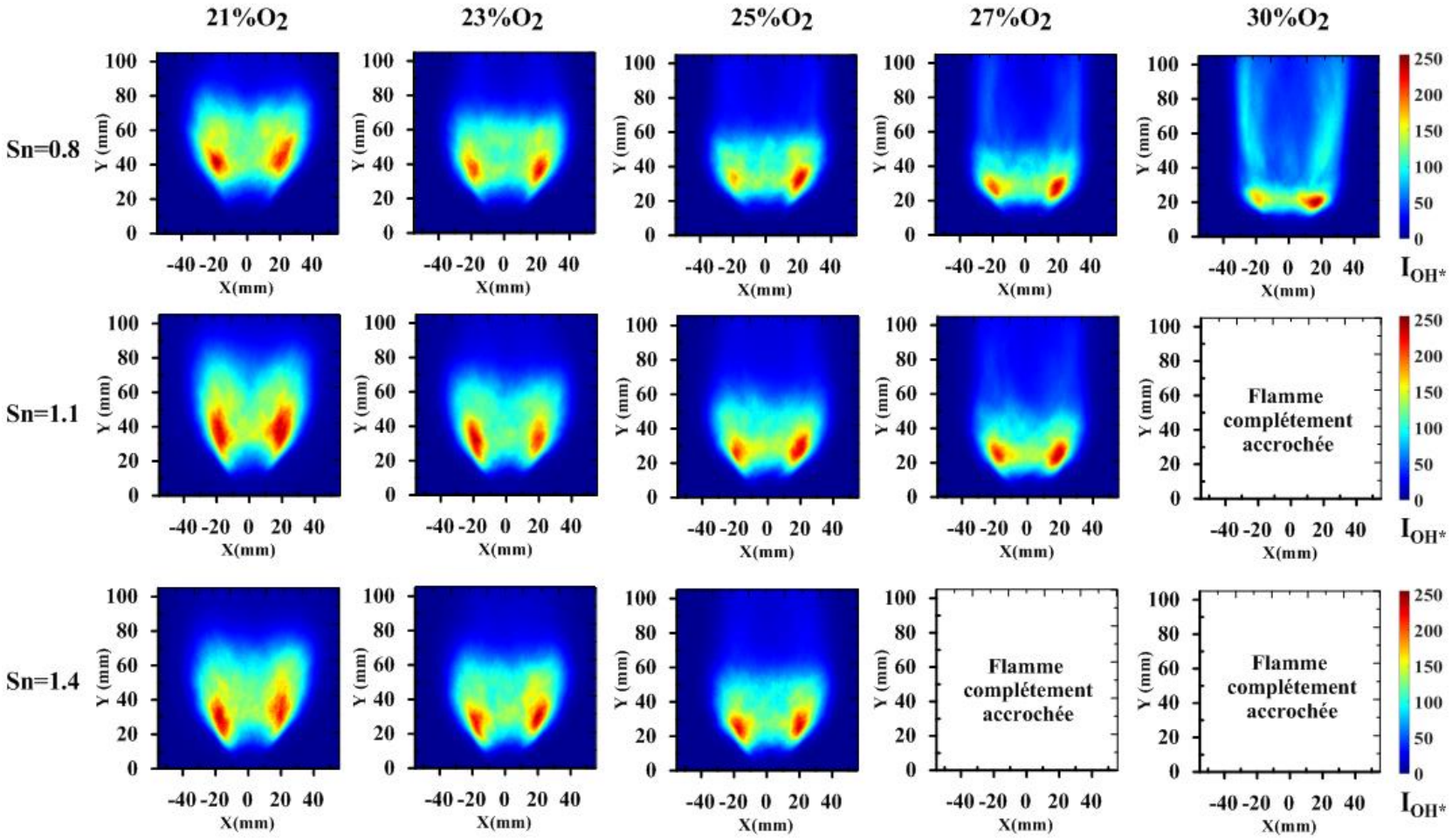


Figure 3.8 : Images moyennes de chimiluminescence OH pour cinq teneurs en oxygène 21, 23, 25, 27 et 30 % vol. pour trois nombres de swirl 0,8, 1,1 et 1,4 et une richesse globale de 0,8.*

La Figure 3.8 illustre quantitativement l'effet de l'enrichissement à l'oxygène sur la hauteur d'accrochage d'une flamme méthane/air pour un nombre de swirl Sn = 0,8 et une richesse globale ϕ = 0,8. Nous pouvons définir la hauteur d'accrochage de la flamme comme étant le point le plus bas du contour inférieur de la flamme. Nous observons une diminution de la hauteur d'accrochage avec l'augmentation du taux d'oxygène dans l'oxydant. Nous constatons aussi une forte diminution de l'amplitude des fluctuations avec l'enrichissement à l'oxygène. Ces diminutions soulignent l'effet stabilisant de l'enrichissement à l'oxygène sur la flamme.

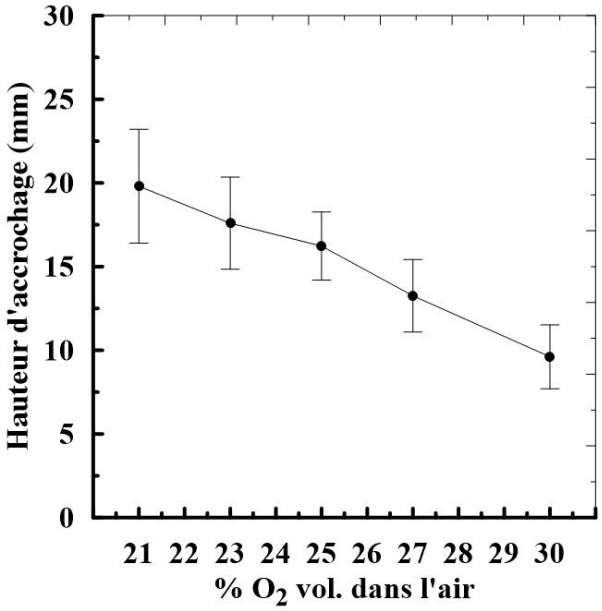


Figure 3.8 : Influence de l'enrichissement à l'oxygène sur la hauteur d'accrochage de la flamme et leurs fluctuations RMS pour un nombre de swirl 0,8 et une richesse globale de 0,8.

3.4.2 Effets de la dilution en CO_2 et H_2O sur la position spatiale de la flamme

Après avoir étudié à travers la chimiluminescence OH* l'effet de l'intensité du swirl et l'enrichissement à l'oxygène sur la flamme méthane/air turbulente swirlée, nous allons passer maintenant à la caractérisation des effets de la dilution en gaz de combustion (CO_2 ou/et H_2O) sur la position spatiale de la flamme. Dans un premier temps nous allons présenter l'effet de la dilution en CO_2, ensuite celui de la dilution à la vapeur d'eau et enfin l'effet de la dilution en EGR (H_2O+CO_2). Les mesures ont été effectuées pour des mélanges méthane/ air et méthane / air enrichis à 25% d'O_2. Nous présentons via l'ensemble des photographies de la Figure 3.9, l'aspect réel des flammes en fonction du couple teneur en diluant dans l'oxydant et type de diluant (CO_2 ou H_2O), pour un mélange CH_4/air enrichi à 25% O_2 vol., à une richesse globale

à l'injection ϕ =0,8 et un nombre de swirl Sn = 0,8. Ces images montrent clairement l'effet de la dilution sur la forme et le comportement de la flamme, notamment la zone de stabilisation.

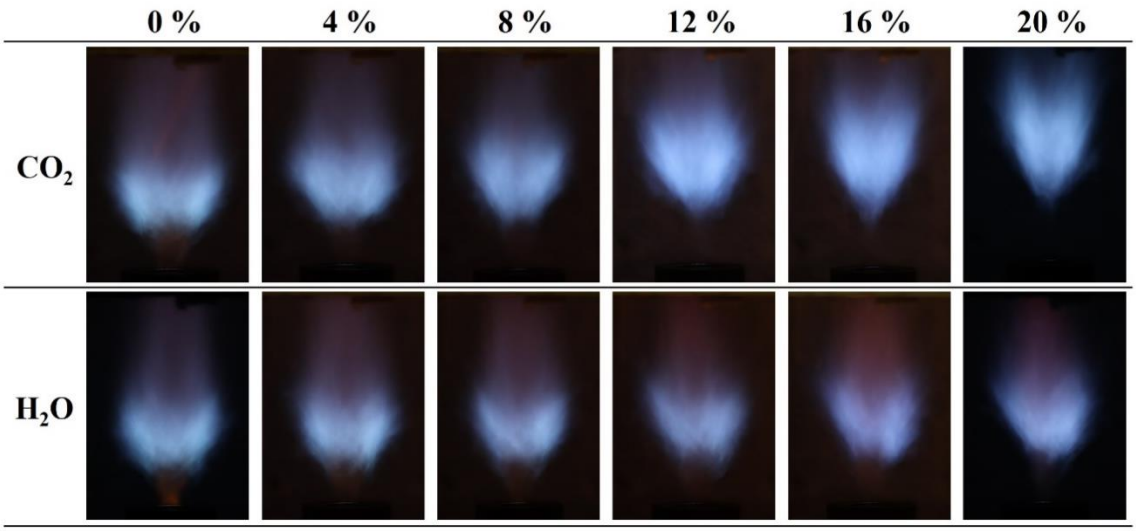


Figure 3.9 : Images réelles de flammes avec la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau pour un mélange CH_4/air enrichi à 25% O_2 vol. pour ϕ =0,8 et Sn = 0,8.

3.4.2.1 Effets du CO_2

Nous présentons dans la Figure 3.10 les images instantanées et moyennes des flammes obtenues par la technique de chimiluminescence OH* pour quatre taux de dilution en CO_2 : 0%, 4%, 12% et 20% vol. et deux teneurs en O_2 : 21% et 25% vol. pour une richesse globale de 0,8 et un nombre de swirl Sn=0,8. Dans le cas sans enrichissement en dioxygène, nous observons un changement important de la structure de la flamme ; la flamme passe d'une forme W à une forme V en augmentant le taux du CO_2 dans l'oxydant à 20 %. Par conséquent, la base de flamme devient très mince, ce qui peut provoquer un soufflage de flamme pour des pourcentages légèrement plus importants que 20%. Avec enrichissement en dioxygène de 25 % en volume dans l'air, la structure de la flamme change également, mais la conversion de la forme W en V est moins prononcée. Pour la gamme de dilution étudiée (0 - 20 % vol.), notons que la base de la flamme rétrécit, mais reste plus large que dans le cas sans enrichissement à l'oxygène. Nous pouvons remarquer que les deux lobes deviennent plus intenses et plus homogènes pour les taux de CO_2 très élevés, cette intensité a été largement étudiée dans la littérature [165,166]. Xie *et al.* [165] ont étudié les effets d'une forte dilution de CO_2 sur la réaction chimique de combustion, l'instabilité de la flamme et le rayonnement de flamme de mélanges $CH_4/CO_2/O_2$. Ils ont montré que le CO_2 participe directement à la réaction chimique par la réaction élémentaire OH + CO = H + CO_2 [117] qui explique

l'impact du rôle chimique du CO_2 sur l'intensité de combustion. Ils ont constaté que le rayonnement de la combustion du mélange $CH_4/CO_2/O_2$ est beaucoup plus fort que celui de la combustion CH_4/air principalement en raison de l'existence d'une grande fraction de CO_2 dans les flammes $CH_4/CO_2/O_2$, qui influence la température de la paroi et la distribution de la température dans la turbine à gaz ou la chambre de combustion. Ils ont expliqué ce fort rayonnement aussi par le coefficient d'absorption moyen de Planck. Ils ont montré que celui-ci est beaucoup plus élevé pour le CO_2 que ceux des autres espèces dans la plage de température de la flamme. Ainsi, le rayonnement de flamme augmente avec l'augmentation de la fraction CO_2. Watanabe *et al.*[166] ont étudié la structure d'une flamme turbulente swirlée CH_4/air et $CH_4/CO_2/O_2$ en utilisant la technique de fluorescence planaire induite par laser (PLIF) du radical OH. Ils ont étudié l'augmentation de l'intensité de combustion à l'aide des mesures par capture de plissement de la flamme à l'échelle micrométrique exprimé en termes de densité de surface de flamme et de rayon de courbure. La densité de la surface de la flamme $CH_4/CO_2/O_2$ s'est avérée supérieure à celle des flammes CH_4/air en aval de la zone d'expansion, en raison de la formation de segments avec des rayons de courbure plus petits. La formation des plissements plus petits dans les flammes $CH_4/CO_2/O_2$ peut être expliquée par les effets du nombre de Lewis. En effet, le nombre de Lewis, défini comme étant le rapport entre la diffusivité thermique et la diffusivité de masse, décroît en diluant le mélange avec le CO_2. Par conséquent, la flamme devient instable à cause des effets thermodiffusifs. En d'autres termes, le front de flamme devient de plus en plus plissé résultant en une densité de surface de flamme plus élevée. Par ailleurs, les résultats de Jourdaine *et al.* [120] ont confirmé qu'il était possible de stabiliser des flammes CH_4/O_2 diluées au CO_2 avec la même topologie et les mêmes caractéristiques thermiques que les flammes CH_4/air sans modification de la conception de l'injecteur.

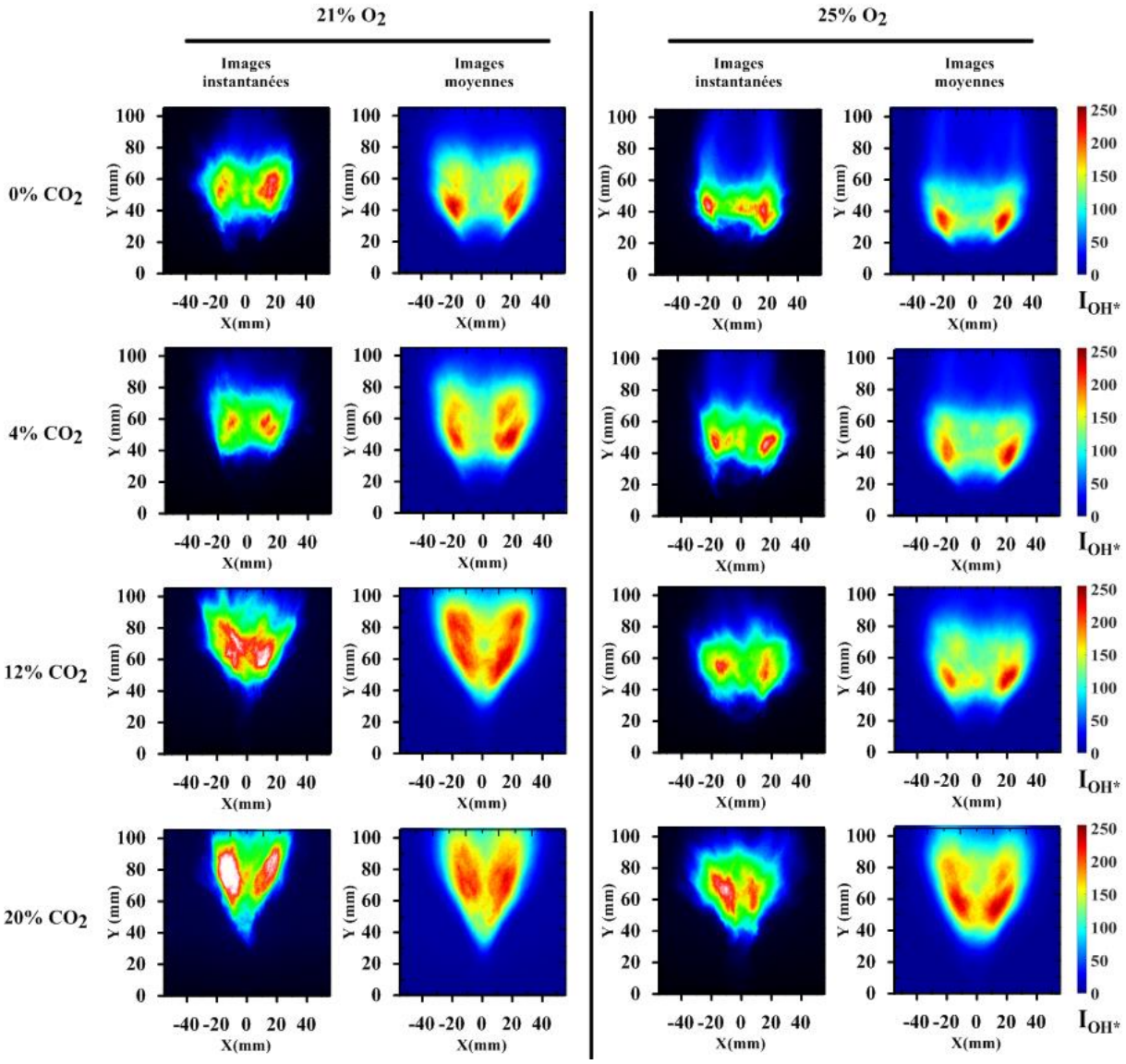


Figure 3.10 : Images instantanées et moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH pour quatre taux de dilution en CO_2 : 0%,4%,12% et 20% vol et deux teneurs en O_2 : 21% et 25% vol. pour ϕ=0,8 et Sn=0,8.*

3.4.2.2 Effets de la vapeur d'eau

Nous présentons dans cette section les résultats obtenus par chimiluminescence OH* dans le cas de dilution en vapeur d'eau. La Figure 3.11 illustre les images instantanées et moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH* pour quatre taux de dilution en H_2O : 0%, 4%, 12% et 20% vol. et deux teneurs en O_2 : 21% et 25% vol. pour une richesse globale ϕ de 0,8 et un nombre de swirl Sn=0,8. Nous remarquons qu'au fur et à mesure de l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau, la flamme à l'air change de forme d'une manière moins prononcée que le cas de dilution en CO_2, la flamme garde une forme W ou aussi appelée une

structure de tulipe. Nous pouvons noter une diminution de la taille de la base de la flamme en augmentant la teneur en vapeur d'eau dans l'oxydant. À 20% de vapeur d'eau, la base de la flamme devient convexe au lieu d'une forme concave observée dans les cas 0%, 4% et 12% en vapeur d'eau. Pour le cas enrichi en O_2, nous constatons une baisse d'intensité de OH* en augmentant la teneur en vapeur d'eau dans l'oxydant avec un décollement de la flamme sur le côté correspondant à l'arrivée de vapeur d'eau dans le brûleur. Ceci est probablement lié à l'effet de collision très prononcé de H_2O et O_2 sur la désexcitation collisionnelle du radical OH* comparé à celui du CO_2. La dilution en vapeur d'eau tend à éloigner la base de la flamme du nez du brûleur. Nous pouvons expliquer cette distance par la diminution de la vitesse de combustion observée dans la Figure 3.5, qui déplace en aval la flamme et augmente ainsi sa hauteur d'accrochage. Comme pour la dilution en CO_2, les images de chimiluminescence OH* dans le cas de la dilution en vapeur d'eau, illustrent une augmentation de la surface de la flamme pour un débit massique d'oxydant constant du fait de la diminution de la vitesse de la flamme lorsque de la vapeur est ajoutée [167]. Mazas *et al.* [122] ont montré que l'ajout de la vapeur d'eau a un effet chimique important sur la vitesse de combustion des flammes méthane-air. Cet impact se révèle plus important dans des conditions pauvres et proches de la stœchiométrie que dans des conditions riches, et diminue fortement lorsque la concentration en oxygène augmente. Par contre dans le cas de mélanges réactifs fortement enrichis en oxygène, la vapeur peut être considérée comme un diluant inerte, même à des concentrations de vapeur élevées.

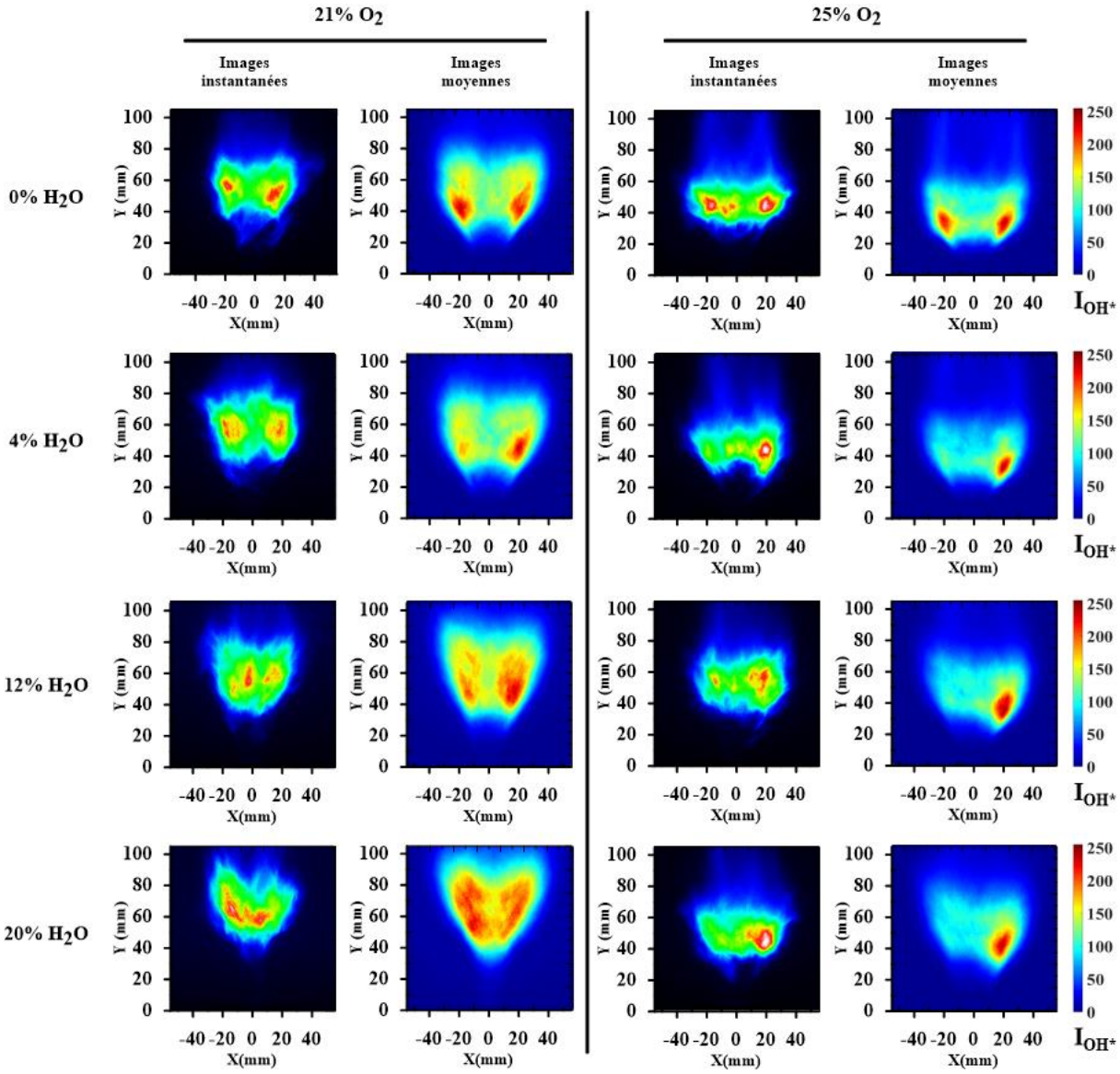


Figure 3.11 : Images instantanées et moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH pour quatre taux de dilution en H_2O : 0%,4%,12% et 20% vol et deux teneurs en O_2 : 21% et 25% vol. pour ϕ=0,8 et Sn=0,8.*

La Figure 3.12 présente des hauteurs d'accrochage de la flamme en fonction de la teneur des deux diluants, CO_2 et H_2O, pour deux teneurs en O_2 : 21% et 25% O_2 vol. pour le cas d'un nombre de swirl Sn = 0,8 et de richesse globale ϕ = 0,8. La figure 3.12 permet de quantifier les tendances relatées à partir des Figure 3.10 et Figure 3.11 pour ce qui est les hauteurs d'accrochage et les amplitudes de fluctuations correspondantes. Nous observons une augmentation de la hauteur d'accrochage avec la dilution accompagnée d'une augmentation d'amplitude de fluctuations en augmentant le taux de diluant dans le mélange. L'effet de l'enrichissement à l'oxygène (25% O_2 vol.) dans le cas de la dilution se traduit par une forte diminution de la hauteur d'accrochage de la flamme comparé au cas CH_4/air. Nous pouvons

noter aussi une diminution d'amplitude de fluctuations en rajoutant de l'oxygène dans l'air pour les taux de dilution faibles, notamment pour la dilution en vapeur d'eau. Par ailleurs, pour les taux de dilution élevés en CO_2 (>12% CO_2 vol.) et en vapeur d'eau (>16% H_2O vol.), les fluctuations restent assez importantes quelle que soit la teneur en oxygène.

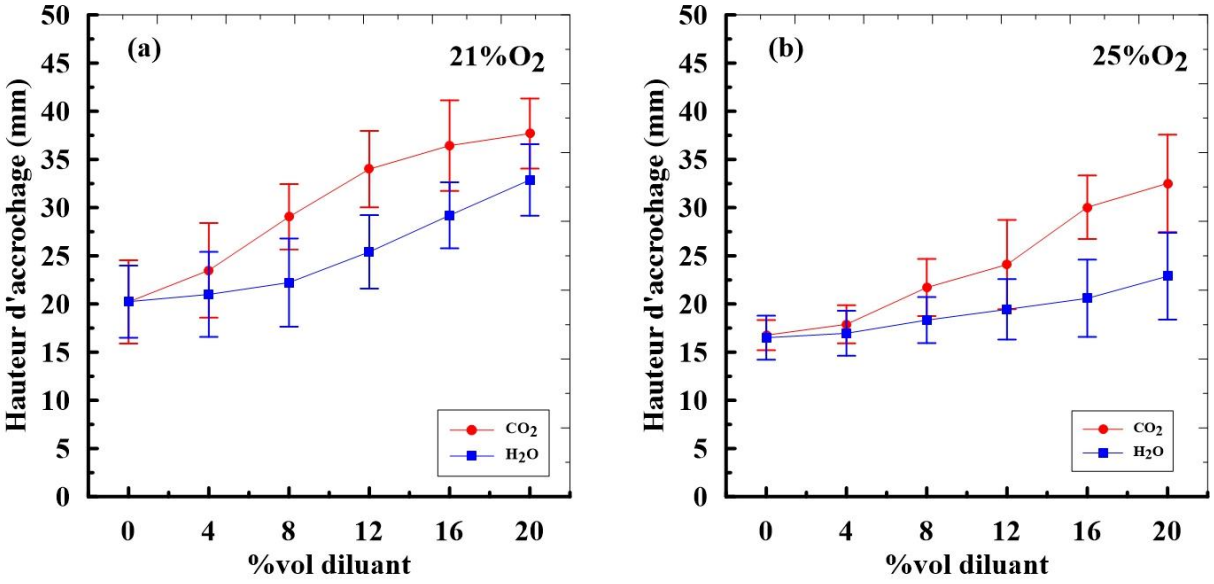


Figure 3.12 : Hauteurs d'accrochage de la flamme en fonction de la teneur du diluant : CO_2 et H_2O pour deux teneurs en O_2 : (a) 21% O_2 vol. ; (b) 25% O_2 vol. pour un nombre de swirl Sn=0,8 et une richesse globale ϕ=0,8.

La Figure 3.13 ci-dessous compare les longueurs de flammes pour une flamme CH_4/air enrichi à 25% vol. d'oxygène pour les deux diluants (CO_2 et H_2O), pour un nombre de swirl de 0,8 et une richesse globale à l'injection de 0,8. Nous observons une augmentation de la longueur de flamme avec l'augmentation du taux de dilution. Cette augmentation, observée qualitativement sur les images moyennes de chimiluminescence OH* ainsi que sur les images réelles des flammes, est liée à l'expansion des gaz avec la dilution. Par ailleurs, l'étude de Watanabe *et al* [166] montre que les longueurs des flammes CH_4/air sont généralement plus grandes que celles des flammes CH_4/O_2 diluées en CO_2, avec une augmentation allant jusqu'à 17% de la surface de la flamme. Ils ont lié cette évolution à l'effet chimique de la dilution en CO_2 sur le taux de réaction du mélange réactif qui influe directement la zone d'expansion de la flamme. Le CO_2 a un effet plus important sur la longueur de flamme que celui de la vapeur d'eau, la longueur de flamme passe d'une valeur de 56 mm à 4 % CO_2 vol. dans l'oxydant à une longueur maximale d'environ 69 mm à 16 % CO_2 vol., soit une augmentation de 23%. Tandis que pour la vapeur d'eau, la longueur de flamme passe d'environ 56 mm pour 4% H_2O

vol. dans l'oxydant à une longueur maximale d'environ 61 mm à 16 % H_2O vol., soit une augmentation de 10%.

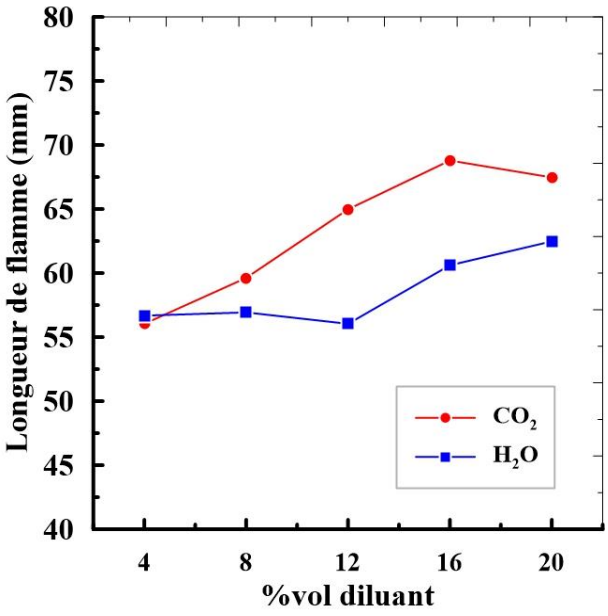


Figure 3.13 : Longueurs de flamme L_f en fonction de la teneur du diluant : CO_2 et H_2O pour 25% O_2 vol. pour un nombre de swirl Sn=0,8 et ϕ=0,8.

3.4.2.3 Effets des EGR

Nous présentons ensuite les effets des gaz de combustion (CO_2 + H_2O) sur la structure de la flamme pour les trois nombres de swirl étudiés. À partir des images moyennes de chimiluminescence OH* des flammes présentées dans la Figure 3.14, nous pouvons obtenir une quantification des hauteurs moyennes d'accrochage de la flamme ainsi qu'un positionnement moyen de fin de la flamme. Nous pouvons remarquer à partir de ces images que l'effet du CO_2 est dominant dans les cas de la dilution en EGR pour les différentes intensités de swirl. Pour les cas de dilution de 10% CO_2+10% H_2O et celui de 15% CO_2+5% H_2O, nous remarquons une forte ressemblance sur la forme et les hauteurs d'accrochage. Par contre, pour le cas de dilution de 5% CO_2+15% H_2O, la forme de la flamme ainsi que la position de la base de la flamme sont différentes.

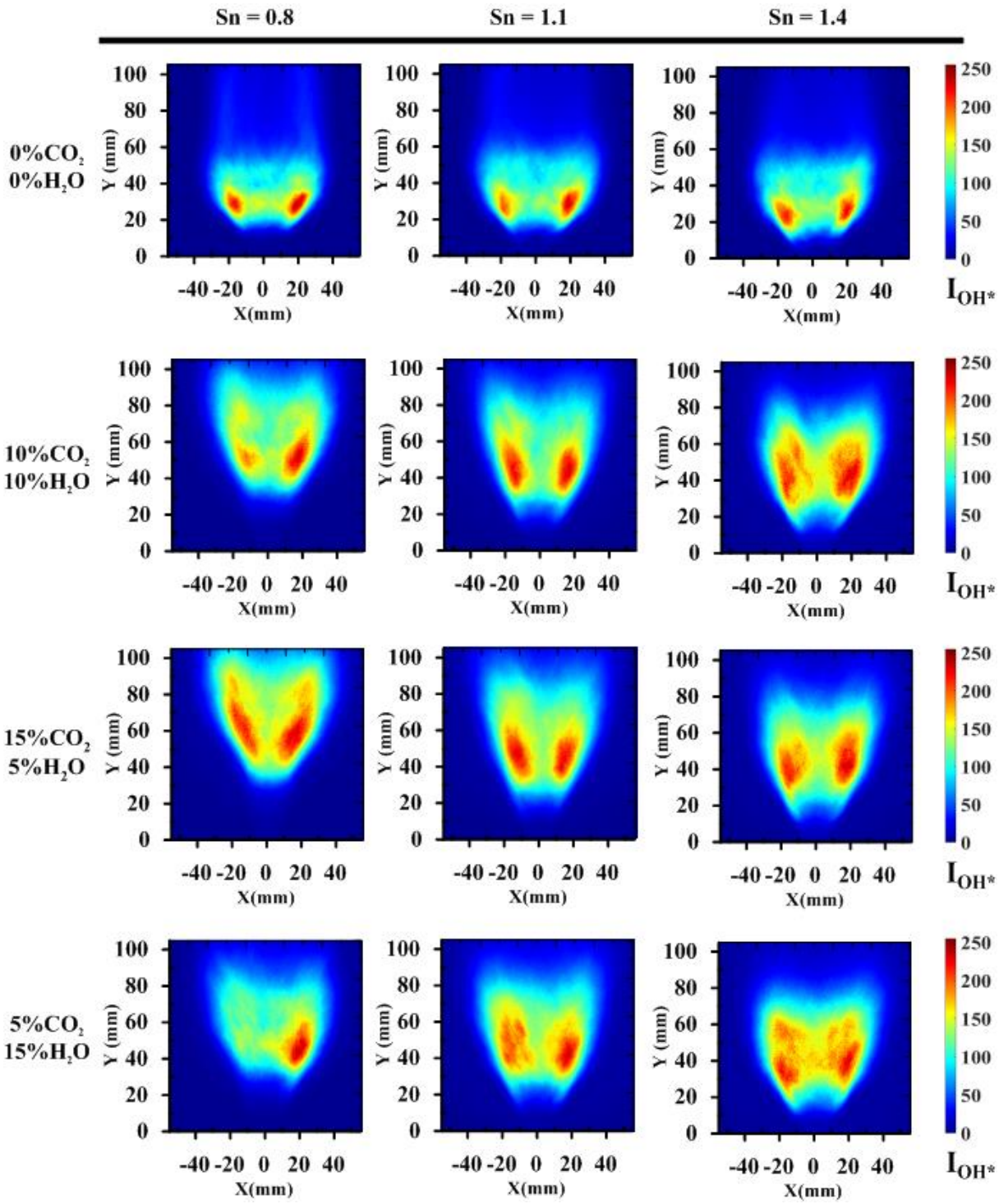


Figure 3.14 : Images moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH pour quatre différents taux de dilution en EGR pour trois nombres de swirl Sn=0,8, 1,1 et 1,4, à 25% O_2 vol. et ϕ=0,8.*

La Figure 3.15 illustre l'effet de la dilution à 20% vol. (10% CO_2 + 10% H_2O) pour cinq différentes teneurs en oxygène pour un nombre de swirl de Sn = 0,8 et une richesse globale ϕ = 0,8. Nous pouvons remarquer à partir des images de chimiluminescence OH* qu'avec la dilution la forme de la flamme passe d'une forme W à une forme V dans le cas sans

enrichissement, tandis que la flamme reprend sa forme W et perd en intensité en augmentant le taux d'enrichissement dans le mélange.

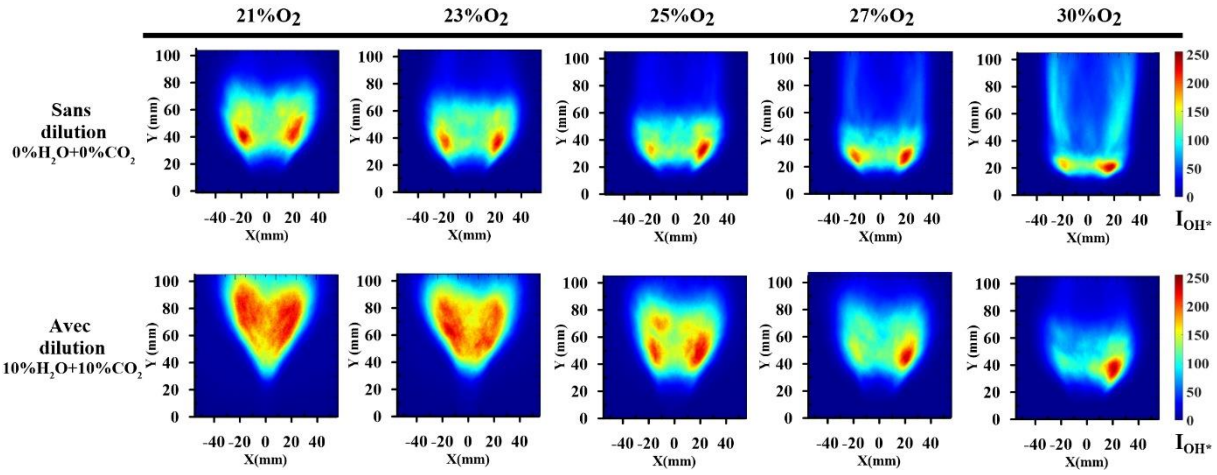


Figure 3.15 : Images moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH pour cinq taux d'enrichissement à l'oxygène avec et sans dilution en EGR pour Sn=0,8 et ϕ=0,8.*

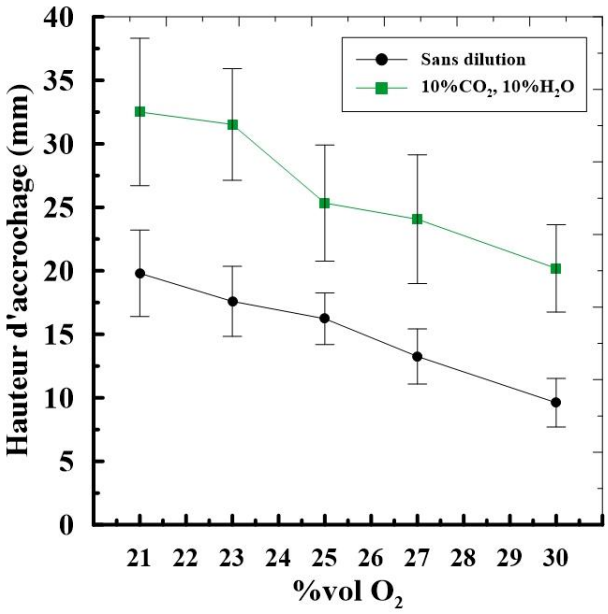


Figure 3.16 : Influence de l'enrichissement à l'oxygène sur la hauteur d'accrochage de la flamme et leurs fluctuations RMS avec et sans dilution en EGR pour cinq taux d'enrichissement à l'oxygène avec et sans dilution en EGR pour Sn=0,8 et ϕ=0,8.

Les hauteurs d'accrochage et les hauteurs de la flamme dans le cas de la dilution en EGR à 20% vol. sont illustrées dans la Figure 3.16. Nous pouvons remarquer pour la hauteur d'accrochage de la flamme un écart quasi constant d'environ 12 mm en comparant les cas avec et sans dilution en EGR, pour les différentes teneurs en O_2. La Figure 3.17 permet de quantifier les tendances relatées à partir de la Figure 3.15 pour ce qui est des hauteurs de lift H_{acc}, de fin de flamme H_f et des longueurs de flamme L_f. Même pour un taux de dilution élevé

(10 % CO_2 +10 % H_2O), la flamme se stabilise davantage lorsque le taux d'enrichissement à l'oxygène dans l'air augmente, ce qui se traduit par une diminution de la hauteur d'accrochage de la flamme avec le % O_2 dans l'air. Nous observons aussi une diminution de la hauteur H_f et de la longueur de la flamme L_f ainsi que de l'amplitude des fluctuations avec l'enrichissement de l'air à l'oxygène.

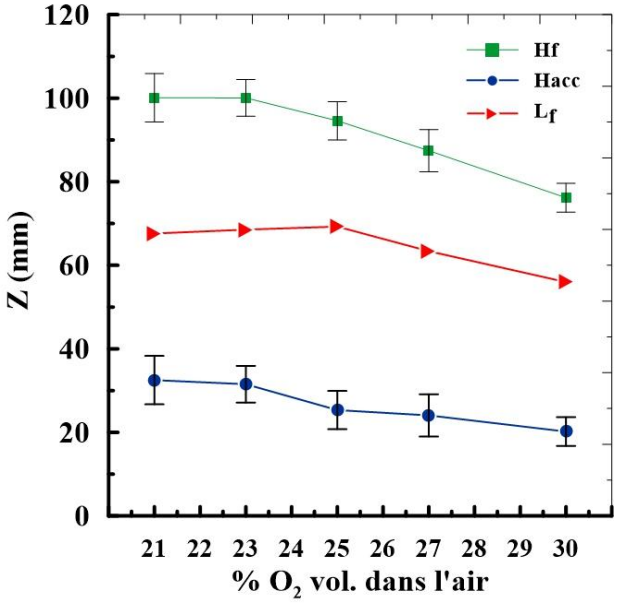


Figure 3.17 : Influence de l'enrichissement à l'oxygène sur la hauteur d'accrochage H_{acc}, la hauteur de la flamme H_f et leurs fluctuations RMS ainsi que la longueur de flamme Lf avec la dilution en EGR (10 % CO_2 +10 % H_2O), pour un nombre de swirl 0,8 et une richesse globale de 0,8.

3.4.3 Effets de l'intensité du swirl sur la position spatiale de la flamme

L'effet de l'intensité du swirl sur la position spatiale est décrit dans cette partie. La Figure 3.18 montre trois images moyennes de chimiluminescence OH* de la flamme pour trois différents nombres de swirl 0,8, 1,1 et 1,4 pour une flamme méthane/air et une richesse globale de 0,8. Nous constatons aussi que l'augmentation de l'intensité du swirl induit une diminution de la hauteur d'accrochage, ce qui permet d'améliorer la stabilité de la flamme.

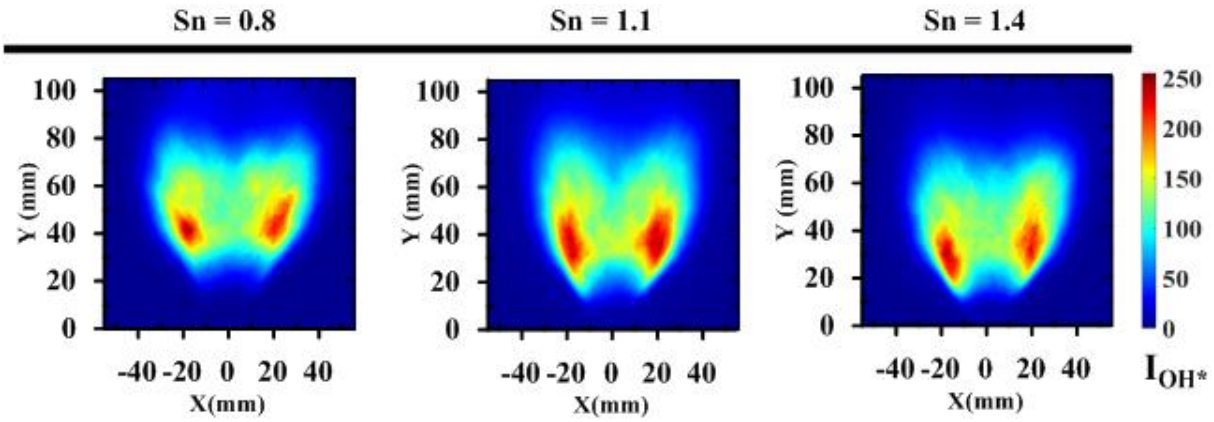


Figure 3.18 : Images moyennes de OH pour trois nombres de swirl Sn =0,8, 1,1 et 1,4 pour un mélange CH_4/air et une richesse globale ϕ = 0,8.*

L'effet de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau en fonction de l'intensité de swirl sur les hauteurs d'accrochage de la flamme est illustré dans la Figure 3.19. Les mesures ont été effectuées pour un enrichissement de 25% vol. en oxygène pour trois swirlers différents. Quel que soit le diluant, nous pouvons noter que l'augmentation de l'intensité du swirl permet de baisser la hauteur d'accrochage de la flamme. Nous pouvons constater que l'effet de la dilution est beaucoup plus prononcé sur la hauteur du lift de la flamme pour le faible nombre de swirl (Sn = 0,8).

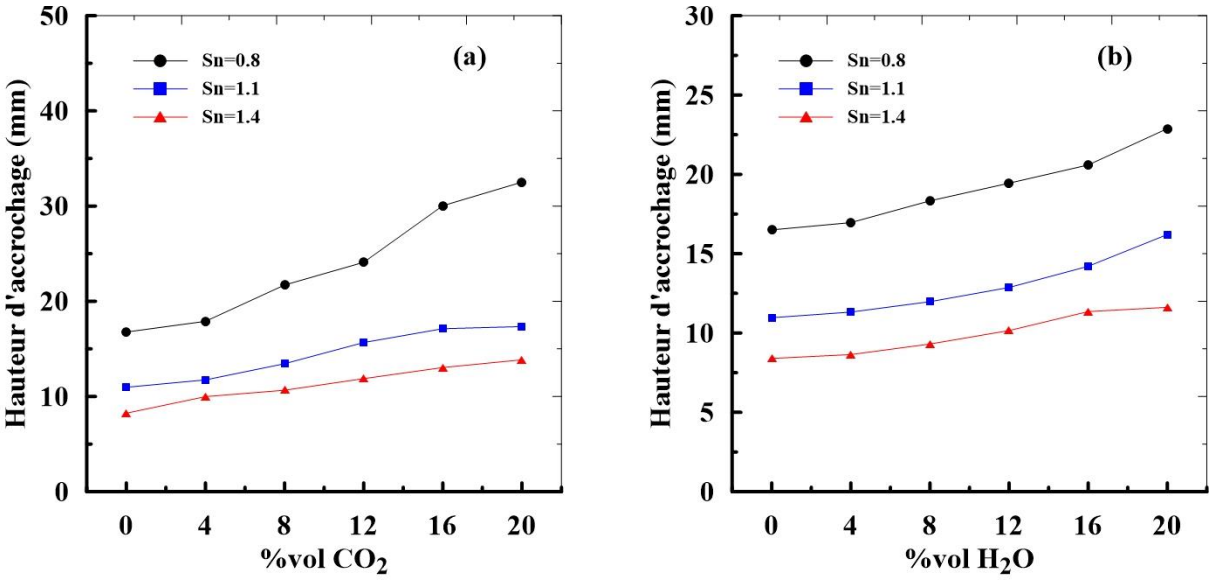


Figure 3.19 : Hauteurs d'accrochage de la flamme en fonction de la teneur du diluant : (a) CO_2 et (b) H_2O pour une teneur en O_2 de 25% et ϕ=0,8 pour trois différents nombres de swirl Sn=0,8, 1,1 et 1,4.

3.4.4 Effets de plasma sur la stabilité et la position spatiale de la flamme

Comme il s'agit d'une étude préliminaire sur les effets du plasma sur la stabilisation de la flamme, nous ne présentons dans cette partie que quelques résultats initiaux portant sur l'effet de plasma de type Arc glissant « glidarc » sur la position spatiale de la flamme par chimiluminescence de OH*. Les objectifs de cette étude étaient de plusieurs ordres. Dans un premier lieu, il s'agissait de montrer la faisabilité et la viabilité de l'utilisation du Glidarc pour influencer la flamme dans des régimes variés de mélange réactif. La difficulté de cette installation était d'ordre technologique en ce qui concerne l'implantation des électrodes en amont de la flamme sans que ces dernières perturbent l'écoulement, ainsi que l'adaptation d'une alimentation électrique convenable et ajustée. Le contrôle et la limitation des perturbations électromagnétiques inhérentes à l'utilisation de source plasma étaient source de plusieurs instabilités logicielles. Dans un second lieu, l'étude a porté sur la caractérisation chimique de la combustion assistée par plasma, qui sera discutée dans les prochaines sections, afin de fournir des données expérimentales permettant d'améliorer la compréhension des interactions flamme/plasma, étape nécessaire pour une meilleure maîtrise de cette technologie. Un exemple de flamme avec plasma est illustré dans la Figure 3.20 (b).

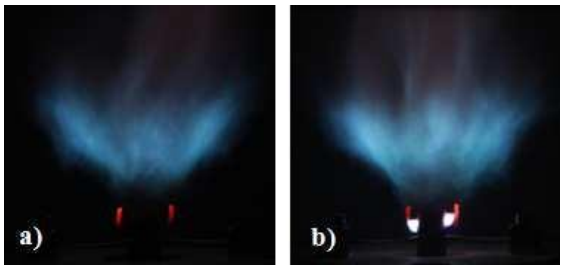


Figure 3.20 : Exemples de photos de flammes sans plasma a) et avec plasma b).

La Figure 3.21 illustre des images instantanées et moyennes de chimiluminescence OH* sans arc glissant pulsé (colonne de gauche) et avec arc glissant (colonne de droite). Ce cas correspond à un plasma ayant les caractéristiques suivantes : 15 kHz de fréquence de plasma et 100 W de consommation d'alimentation. Les mesures ont été réalisées avec un nombre de swirl de 1,4, un débit d'air de 150 NL/min à une richesse ϕ=1,2. Les images moyennes sont déterminées à partir de 200 images instantanées pour chaque cas. Ces images montrent clairement l'influence du plasma, en particulier sur la base de la flamme, comme cela a été indiqué ci-dessus. Deux liaisons entre la flamme et le plasma, proches de la zone du plasma, sont clairement visibles sur les images. Ces résultats sont très importants en raison du gain de

stabilité de la flamme. Nous pouvons aussi noter à partir de ces premiers essais que la présence du plasma dans la flamme peut réduire ou empêcher la création de points d'extinction de la flamme dans les mélanges très riches ou dilués grâce notamment à la décharge électrique.

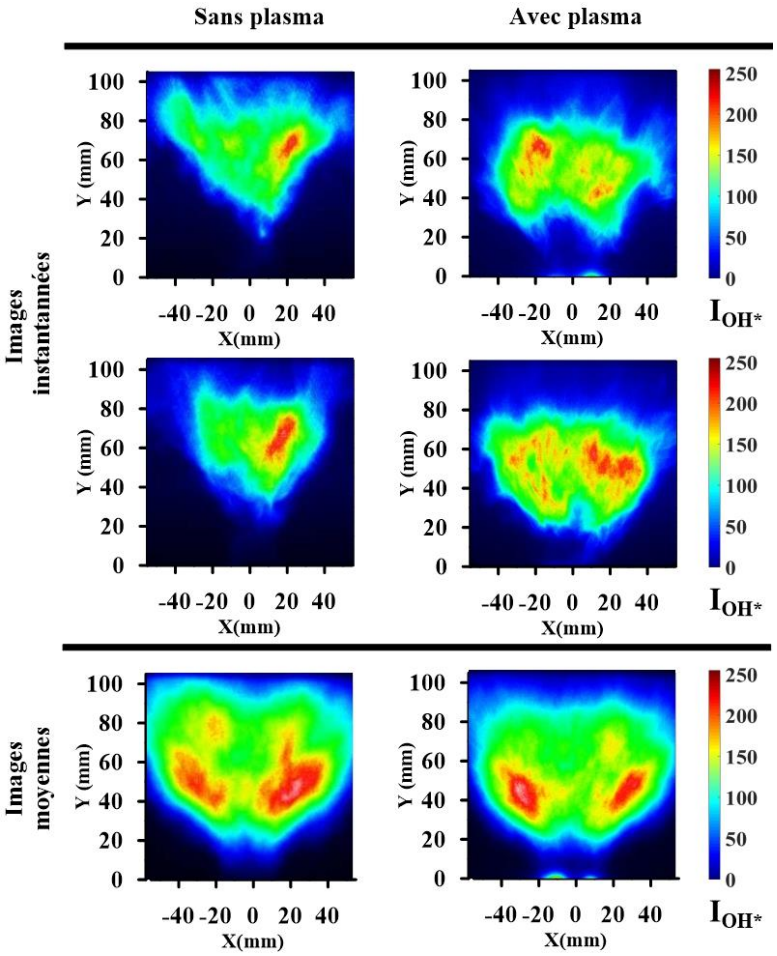


Figure 3.21 : Imageries instantanées et moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH avec et sans Glidarc à 15 kHz de fréquence plasma et 100 W de consommation d'alimentation plasma.*

3.5 Formation des émissions polluantes et évolution des températures des fumées.

Nous évoquons dans cette section l'évolution des produits de combustion, notamment les oxydes d'azote NO_X et le monoxyde de carbone CO, en fonction des différents paramètres utilisés durant cette étude (la richesse globale à l'injection, l'intensité du swirl, l'enrichissement à l'oxygène et la dilution en gaz de combustion). L'objectif ici est de retirer les principales tendances, notamment dans le cas de la dilution.

Pour pouvoir comparer les expériences entre elles, il est impératif de s'affranchir de la variabilité des teneurs en O_2 résiduel dans les gaz brûlés secs suivant les conditions opératoires. Dans cette optique, nous ramenons les concentrations des émissions à une même référence en teneur d'O_2 résiduel dans les gaz brûlés secs via la formule suivante [168]:

$$\boldsymbol{E_R = \frac{21 - O_R}{21 - O_M} * E_M} \qquad (68)$$

Avec E_R la concentration des émissions corrigée en fonction du niveau d'oxygène de référence, O_R le niveau d'oxygène de référence, O_M le niveau d'oxygène mesuré et E_M la concentration des émissions rapportée au niveau d'oxygène mesuré O_M. Dans le cas de notre étude, nous avons ramené les concentrations à une teneur de référence de 3% O_2 en volume dans les gaz brûlés à l'état sec. Cette valeur correspond à la limite supérieure généralement applicable aux installations de combustion de type fours industriels et chaudières reportée par la directive du parlement européen et du conseil relatif aux émissions industrielles [168]. La formule pour calculer la concentration des émissions des espèces [XX] à un niveau d'oxygène de référence de 3% dans le cas de l'enrichissement de l'air à l'oxygène s'écrit :

$$\boldsymbol{[XX]_{3\%\, O_2} = [XX]_{y\%\, O_2, gaz\ brûlés} \frac{[O_2]_{\%\, oxydant} - 3\%}{[O_2]_{\%\, oxydant} - y\%}} \qquad (69)$$

Avec $\boldsymbol{y}$ le niveau d'oxygène mesuré dans les gaz brûlés secs et $\boldsymbol{[O_2]_{\%\, oxydant}}$ le niveau d'oxygène dans l'oxydant. Notons que l'oxydant correspond au mélange (air + oxygène + diluants). Par ailleurs, les mesures sont exprimées en ppm.

Le tableau suivant rassemble les cas effectués durant cette étude

Tableau 3.2 : Conditions opératoires des cas étudiés par mesure des concentrations des émissions polluantes sur fumées sèches.

Sn	ϕ	Ω	% vol. CO_2 dans l'oxydant	Ω	% vol. H_2O dans l'oxydant	Ω	% EGR dans l'oxydant
1.4	0.8	21 23 25 27 30	0 4 8 12 16 20	21 23 25 27 30	0 4 8 12 16 20	21 25	0 CO_2 + 0 H_2O 10 CO_2 + 10 H_2O 5 CO_2 + 15 H_2O 15 CO_2 + 5 H_2O
	0.9	21 23 25 27 30	0 4 8 12 16 20	21 23 25 27 30	0 4 8 12 16 20	-	-
	1	21 25	0 4 8 12 16 20	21 23 25 27 30	0 4 8 12 16 20	-	-
0.8	0.8	25	0 4 8 12 16 20	25	0 4 8 12 16 20	25	0 CO_2 + 0 H_2O 10 CO_2 + 10 H_2O 5 CO_2 + 15 H_2O 15 CO_2 + 5 H_2O

3.5.1 Effets de la richesse globale et de l'enrichissement à l'oxygène

Nous allons commencer par présenter dans cette section l'influence de la richesse globale à l'injection et de l'enrichissement à l'oxygène sur les émissions polluantes. Nous conservons le même swirler et nous faisons varier la richesse globale pour deux taux d'oxygène dans l'oxydant : 21 et 25% en volume. Les Figure 3.22 (a) et 3.22 (b) montrent respectivement l'évolution des NO_X et du CO en fonction de la richesse globale ϕ pour les deux taux d'oxygène.

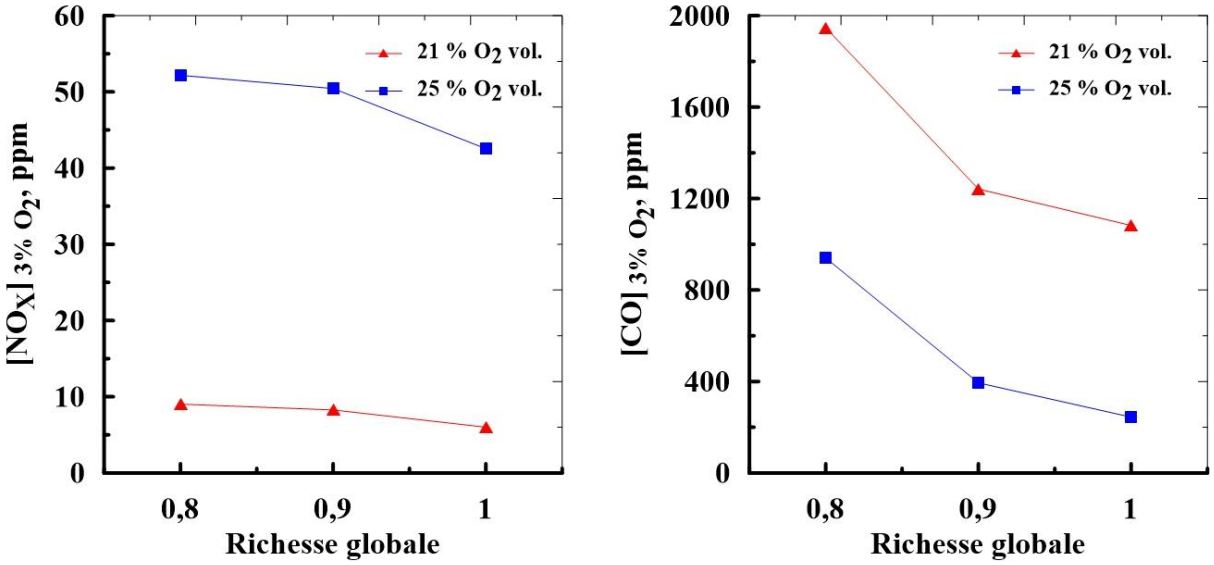


Figure 3.22 : Influence de la richesse globale et l'enrichissement de l'air à l'oxygène sur les évolutions de (a) $[NO_X]_{3\%\ O_2}$ et (b) $[CO]_{3\%\ O_2}$ dans les gaz brûlés pour un nombre de swirl Sn = 1,4.

D'après les Figure 3.22 (a) et 3.22 (b), l'augmentation du taux d'enrichissement à l'oxygène conduit à une augmentation significative de la formation des NO_X et permet de réduire davantage le CO. Nous rappelons que l'enrichissement à l'oxygène se fait à débit d'oxydant constant dans le but de conserver une dynamique identique avant le front de flamme tout en préservant la richesse globale à l'injection. Si nous supposons dans ce cas que la dynamique pilote le mélange et ne change pas avec l'enrichissement, les évolutions des NO_X et du CO sont alors d'ordre chimique.

L'augmentation des NO_X avec l'enrichissement à l'oxygène s'explique par l'augmentation de la température de la flamme lorsque le taux d'oxygène augmente [133,169]. Cette augmentation de température favorise la formation des NO_X par la voie thermique, notamment pour les mélanges pauvres, comme nous l'avons mentionné dans la section 1.4.1.1. La réduction du CO avec l'enrichissement à l'oxygène est liée principalement à l'augmentation des vitesses des réactions d'oxydation. L'illustration de cet effet est observée dans la section 3.2.2 via l'évolution des vitesses de flammes laminaires qui évoluent de 27 cm/s à 65 cm/s lorsque le taux d'oxygène passe de 21 à 30 % vol. dans l'air à une richesse globale de 0,8, soit une augmentation d'un facteur d'environ 2,4. L'élévation de la température de la flamme avec l'enrichissement à l'oxygène présente également un paramètre majeur qui permet de favoriser l'oxydation du méthane et aussi la conversion rapide du CO en CO_2. Par ailleurs, tout comme les fluctuations des hauteurs d'accrochage présentées dans la

section 3.4.1, les fluctuations (RMS) du CO tendent à diminuer avec l'enrichissement à l'oxygène.

En ce qui concerne l'effet de la richesse globale à l'injection, nous pouvons observer une diminution des émissions des NO_X et CO quand la richesse passe de 0,8 à 1. Nous rappelons ici que la flamme se stabilise loin du brûleur en augmentant la richesse globale à l'injection comme cela a été mentionné dans les travaux de Merlo [97]. Cette tendance est liée à la stabilisation de la flamme dans les zones où la fraction de mélange locale est meilleure et proche de la stoechiométrie notamment pour les cas à l'air. Ceci explique la diminution de la formation des émissions du CO qui représentent généralement des imbrûlés de la combustion. La diminution des émissions des NO_X quand la richesse globale à l'injection augmente est a priori associée à l'effet de la dilution en CO_2 favorisé par l'augmentation de la richesse globale. Le CO_2 recircule par le biais des zones de recirculation centrales et externes. Cette diminution est encore plus visible dans le cas enrichi à l'oxygène. En effet, les émissions des NO_X diminuent de 9 ppm à 6 ppm dans le cas air, soit une diminution de 30% et diminuent de 52 ppm à 42 ppm dans le cas enrichi à 25% d'O_2 dans l'air, soit une diminution de 20%, en passant d'une richesse globale de 0,8 à 1. L'effet de la dilution en CO_2 va être discuté plus en détail dans la section suivante.

3.5.2 Effets de la dilution en CO_2 et H_2O

Après avoir étudié l'influence de l'enrichissement à l'oxygène et celle de la richesse globale à l'injection sur les émissions des NO_X et du CO, nous allons analyser maintenant les évolutions de ces émissions en fonction de la dilution. Nous rappelons ici que les gaz de combustion n'ont pas été recirculés à partir des fumées, mais injectés avec l'air enrichi ou non à l'oxygène, le CO_2 provient d'une bouteille de gaz haute pression de type B50 et la vapeur d'eau à partir du générateur de vapeur CEM présenté dans la section 2.2.3. Nous rappelons aussi que les lignes de gaz, le mélangeur et le brûleur ont été chauffés pour maintenir une température d'environ 378 ± 5 K à la sortie du brûleur pour les deux diluants. Ceci nous permet de comparer les évolutions des émissions dans le cas de la dilution.

- **Évolution des émissions des NO_X**

Les Figure 3.23 (a) et 3.23 (b) illustrent respectivement l'évolution des NO_X en fonction de la dilution en CO_2 et la dilution en vapeur d'eau pour une richesse globale ϕ=0,8 et un nombre de swirl de 1,4 pour plusieurs taux d'enrichissement à l'oxygène.

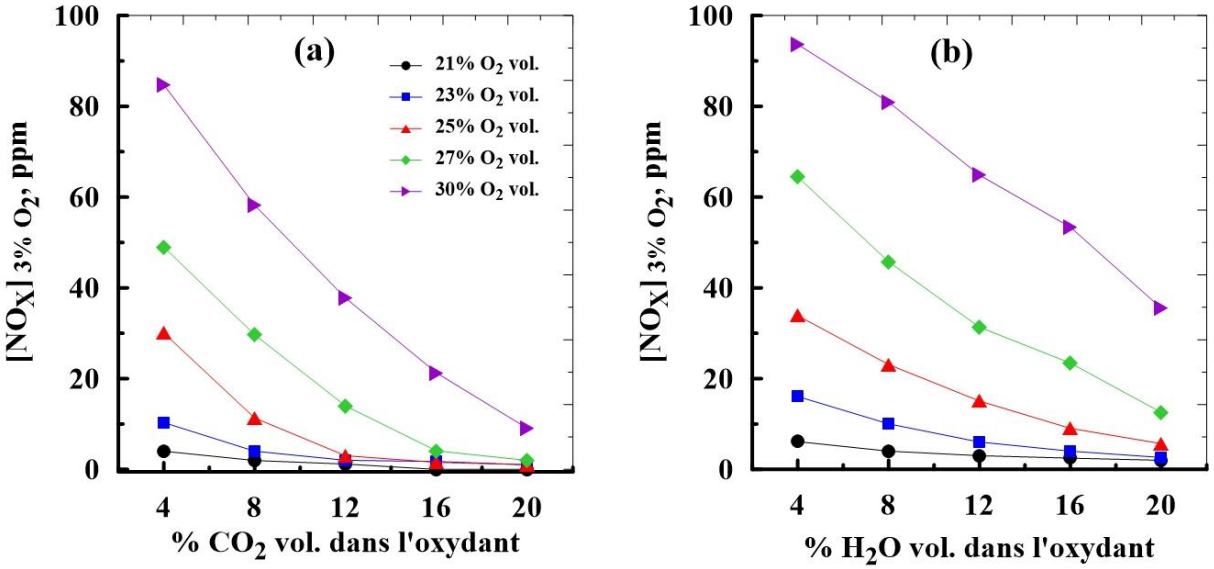


Figure 3.23 : Influence de la dilution en CO_2 (a) et en vapeur d'eau (b) sur la formation des NO_X pour 5 taux d'enrichissement à l'oxygène : 21, 23, 25, 27 et 30% vol. dans l'air pour un nombre de swirl de 1,4 et une richesse globale de 0,8.

D'après la Figure 3.23 (a), les émissions des NO_X diminuent considérablement avec l'ajout du CO_2 dans l'oxydant. Cette forte baisse est attribuée à la capacité calorifique importante du CO_2 capable d'absorber la chaleur des gaz ce qui permet de baisser la température de la flamme. L'évolution de la température des fumées en fonction de la dilution en CO_2, illustrée dans la Figure 3.24 (a) explique la baisse de température de flamme avec la dilution en CO_2 présentée dans la section 3.2.2. En effet, la baisse de température de flamme engendre une limitation de la formation des NO_X par la voie thermique, la principale voie de formation des NO_X à haute température. L'importante capacité calorifique du CO_2 dans le mélange met également en évidence l'effet des zones de recirculation internes et externes responsables de la dilution et le refroidissement de la flamme et par conséquent la diminution des émissions des NO_X. L'étude de Yang et Shih [170] portant sur les effets de la vitesse de réaction et la dilution en N_2, CO_2 et H_2O sur la formation des NO_X pour une flamme syngas à jets opposés confirme ces résultats et montre qu'à haute température, la voie thermique domine et la dilution en CO_2 fait que la température et le taux de production de NO sont les plus bas. Même pour les cas d'enrichissement à l'oxygène les plus importants, 27 % et 30 % O_2 vol., l'augmentation de la fraction volumique du CO_2 diminue fortement les émissions des NO_X en passant de 49 ppm, à 4% CO_2, à 2 ppm à 20% CO_2 dans les cas de 27% O_2, soit une diminution de 96%, et de 85 ppm à 4% CO_2, à 9 ppm à 20% CO_2, soit une diminution de 90%. Cette forte diminution des NO_X pour les fortes teneurs d'O_2 et CO_2 dans le mélange oxydant est liée à la forte diminution de la fraction d'azote dans le mélange. Nous rappelons

qu'en termes de stabilité, pour les taux d'enrichissement importants, la flamme reste stable même à fort taux de dilution en CO_2.

En ce qui concerne la dilution en vapeur d'eau, nous observons une diminution importante des émissions des NO_X avec l'ajout de la vapeur d'eau dans le mélange oxydant pour les différents taux d'enrichissement de l'air à l'oxygène. Comme pour la dilution en CO_2, cette baisse est principalement due à la diminution des températures de flammes, comme le montre la Figure 3.24 (b) et aussi à la diminution de la fraction de N_2 pour un débit du mélange oxydant fixe. Nous observons des émissions de NO_X assez élevées à forts taux d'enrichissement à l'oxygène contrairement au cas de dilution en CO_2. Ceci souligne l'effet chimique de l'ajout de la vapeur d'eau au mélange. Tingas *et al* [171] ont montré que la dilution en H_2O diminue significativement les températures des flammes et surtout les concentrations des espèces N et O responsables de la formation des NO_X ; N est important pour la voie thermique et prompt alors que O est important que pour la voie thermique. Ils ont montré également que les collisions moléculaires de H_2O avec H_2O_2 sont très efficaces pour produire les radicaux OH via la réaction H_2O_2 (+H_2O) → OH + OH (+H_2O) ce qui réduit les délais d'inflammations. Cet effet chimique explique la stabilité de la flamme proche du brûleur avec la dilution en vapeur d'eau évoquée dans la section 3.4.2.

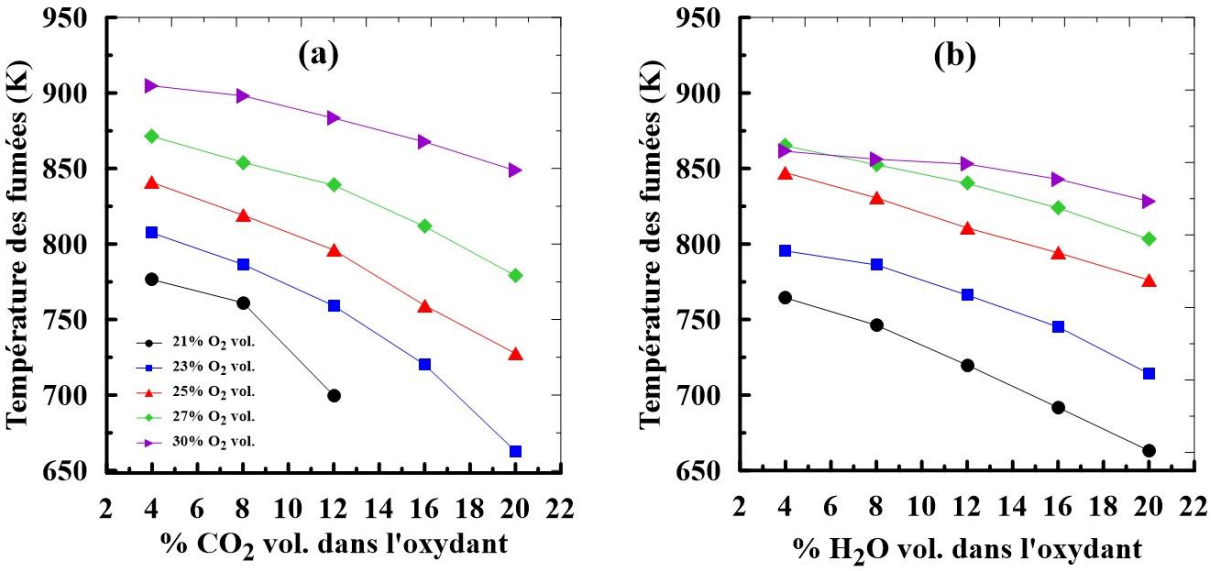


Figure 3.24 : Influence de la dilution sur la température des fumées : (a) en CO_2 à ϕ=0,8 et (b) en vapeur d'eau à ϕ=0,9, pour 5 taux d'enrichissement à l'oxygène : 21, 23, 25, 27 et 30% vol. dans l'air pour un nombre de swirl de 1,4.

- **Évolution des émissions du CO**

Après avoir étudié l'effet de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur la formation des émissions des NO_X, nous allons maintenant traiter l'évolution de la formation des émissions du CO en fonction de la dilution. Les Figure 3.25 (a) et 3.25 (b) illustrent l'évolution des émissions du CO en fonction des deux diluants pour 5 teneurs en oxygène dans l'air pour une intensité de swirl de 1,4 et une richesse globale de 0,8.

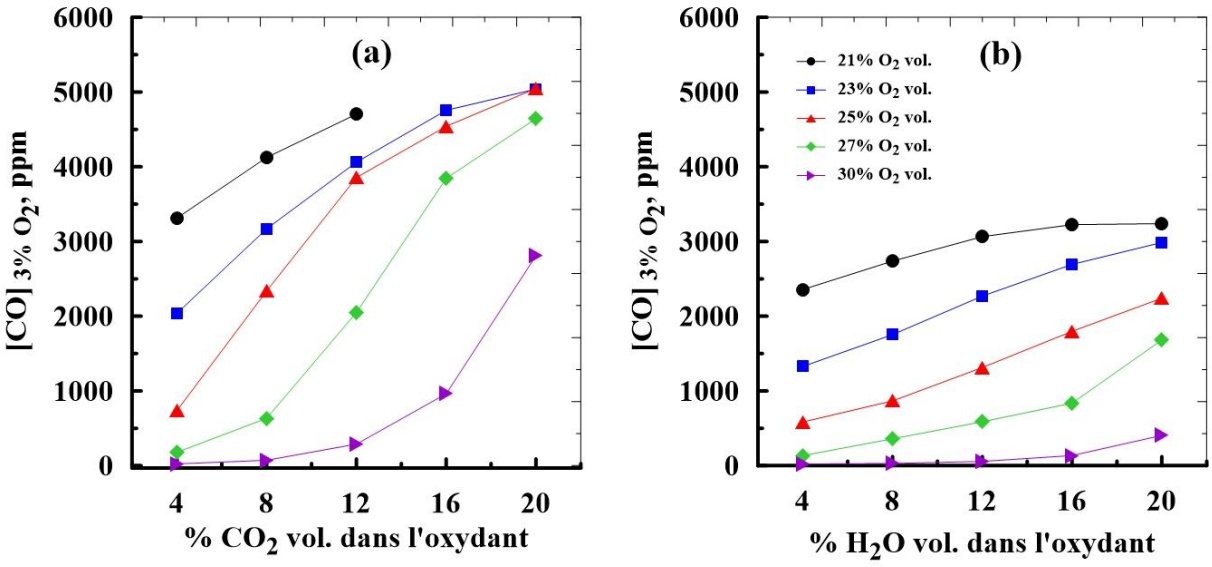


Figure 3.25 : Influence de la dilution sur la formation du CO : (a) en CO_2, (b) en vapeur d'eau pour 5 taux d'enrichissement à l'oxygène : 21, 23, 25, 27 et 30% vol. dans l'air pour un nombre de swirl de 1,4 et une richesse globale de 0,8.

Nous pouvons noter d'après les deux figures que les émissions en CO augmentent avec la dilution. La Figure 3.25 (a) présente l'influence de l'ajout du CO_2 dans le mélange oxydant sur l'augmentation de la teneur du CO dans les fumées. Nous pouvons constater que la présence d'une concentration élevée de CO_2 conduit à une forte augmentation de la concentration de CO après le début de la réaction. Les niveaux élevés de CO_2 empêchent l'oxydation complète du carburant à des températures élevées, malgré la présence d'un excès d'oxygène, suite à la perturbation du mélange et la déstabilisation de la flamme comme nous l'avions évoqué dans la section 4.4.2. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de Glarborg et Bentzen [117]. Ils ont montré que le CO devrait maintenir un équilibre partiel avec du CO_2 jusqu'à environ 1400 K. En dessous de cette température, l'équilibre partiel de CO ne peut plus être maintenu et en dessous d'environ 1200 K, l'oxydation de CO en CO_2 n'a plus lieu. Comme évoqué précédemment dans la section 3.4.2, la réaction $CO_2 + H \rightleftharpoons CO + O$, ainsi que les réactions de CO_2 avec des radicaux hydrocarbonés, contribuent à la formation

de CO dans la région proche du brûleur dans des conditions d'oxycombustion. Le CO_2 présent va concurrencer l'O_2 pour l'hydrogène atomique et va conduire à la formation du CO, et va inhiber le processus de combustion par la compétition du radical H entre la réaction inverse de $OH + CO \rightleftharpoons H + CO_2$ et la réaction $H + O_2 \rightleftharpoons O + OH$ [165]. Les niveaux plus élevés de CO dans cette région peuvent vraisemblablement augmenter les problèmes locaux de corrosion et de scories, selon la géométrie du brûleur et les méthodes d'ajout d'oxygène et de gaz de combustion, nous attendons également à ce que l'oxydation complète du CO en CO_2 se produise plus en aval dans le four par rapport à la combustion conventionnelle, car le CO est favorisé à des températures élevées dans l'équilibre CO/CO_2. Cependant, avec les taux de refroidissement typiques des fours des centrales électriques, aucune augmentation des émissions de CO n'est prévue. Dans les fours industriels, les taux de refroidissement sont de l'ordre de quelques centaines de K / s, et à moins que les limitations de mélange n'affectent le taux d'oxydation, la conversion complète du CO en CO_2 ne devrait pas être une préoccupation même dans des conditions d'oxycombustion. Pour conclure, l'augmentation des émissions du CO dans les fumées résulte de la dynamique du mélange et de la géométrie du brûleur ainsi que de la température locale des gaz.

Dans le cas de la dilution en vapeur d'eau (Figure 3.25 (b)), l'augmentation des émissions du CO dans les fumées avec l'augmentation du taux de vapeur d'eau dans les mélanges oxydants est moins prononcée comparé au cas de la dilution en CO_2. Ceci est dans un premier lieu dû à la limitation de la quantité des molécules de carbone dans le mélange contrairement au cas de dilution en CO_2. Dans un second lieu, cette légère augmentation est probablement due à la perturbation du mélange lors de l'injection de la vapeur d'eau en créant des points d'extinction locale, alliés à une combustion incomplète.

La Figure 3.26 donne un aperçu global sur la différence des effets de dilution du CO_2 et H_2O pour un mélange CH_4/ air enrichi à 25% O_2 vol. et un nombre de swirl de 1,4, sur l'évolution des émissions polluantes NO_X et CO.

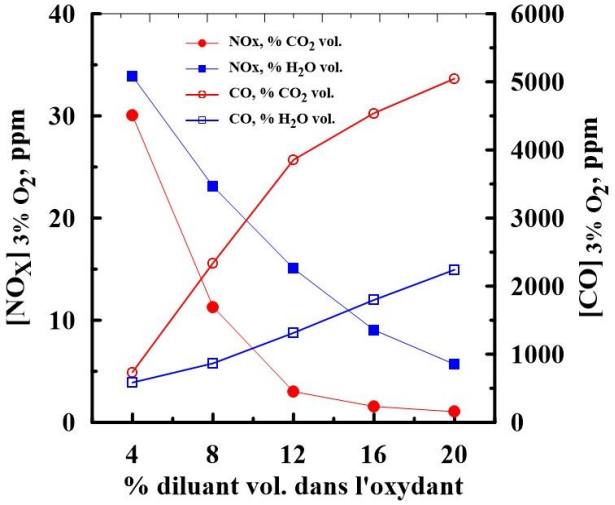


Figure 3.26 : Comparaison de l'influence de la dilution en CO_2 (en rouge) et celle en vapeur d'eau (en bleu) sur les évolutions des NO_X et du CO pour un mélange CH_4/air enrichi à 25% vol. d'O_2, un nombre de swirl de 1,4 et une richesse globale de 0,8.

Nous mettons en évidence à travers cette figure la pertinence de la capacité du CO_2 à baisser les émissions des NO_X jusqu'à une valeur quasiment nulle comparée à la dilution en vapeur d'eau, pour un cas enrichi à l'oxygène (la même tendance a été observée pour un enrichissement d'air en oxygène de 30%). Le taux d'augmentation du CO est relativement faible dans le cas de la dilution en vapeur d'eau contrairement au cas de dilution en CO_2. En conclusion, nous pouvons atteindre un bon compromis entre la dilution en EGR et l'enrichissement à l'oxygène pour à la fois garder un bon rendement de la combustion et en même temps réduire efficacement les émissions polluantes.

3.5.3 Effet de la dilution en gaz de combustion EGR

Après avoir étudié et analysé les effets de la dilution en CO_2 et H_2O indépendamment, nous allons dans cette partie traiter les effets de la dilution de ces derniers gaz combinés (EGR). La Figure 3.27 illustre l'influence de la dilution en gaz EGR sur l'évolution des espèces polluantes NO_X et CO pour deux nombres de swirl différents 0,8 et 1,4. Trois différentes teneurs en gaz de combustion ont été reportées pour un total de 20% vol. de taux de dilution avec différentes proportions des gaz diluants (15% H_2O + 5% CO_2, 10% H_2O + 10% CO_2 et 5% H_2O + 15% CO_2). Les résultats montrent que l'évolution du CO est dominée par le taux du CO_2 dans le mélange EGR. Nous observons une diminution du taux de CO dans les fumées de 5219 ppm jusqu'à 4074 ppm pour les teneurs allant de 15% H_2O + 5% CO_2 au cas 5% H_2O + 15% CO_2 respectivement, soit une diminution de 22% pour le nombre de swirl de 1,4 et de 13% pour le nombre de swirl de 0,8. Les émissions des NO_X restent assez faibles

pour les trois cas. La proportion des émissions des NO_X dans le cas du mélange dominé par la vapeur d'eau (15% H_2O + 5% CO_2) est plus importante pour le nombre swirl de 1,4 (3 ppm) comparée à celle obtenue dans le cas d'un nombre de swirl de 0,8 (2 ppm). Néanmoins, quelles que soient l'intensité du swirl et les proportions des gaz diluants, les émissions des NO_X sont comprises entre 1,7 et 3 ppm. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de Xie *et al* [172] qui ont montré que lorsque le taux d'EGR augmente à 20% dans un moteur essence GDI (« Gasoline Direct Injection » en anglais), les NO_X diminuent de 36%, le nombre de particules diminue de 87% et l'économie du carburant atteint 7%. Nous pouvons conclure à partir de ces résultats et des résultats concernant la stabilité de la flamme (section 3.4.2), que le meilleur moyen de dilution en EGR est la combinaison des deux principaux gaz avec des proportions volumiques égales dans le mélange diluant. L'effet de l'intensité du swirl va être discuté dans la section suivante.

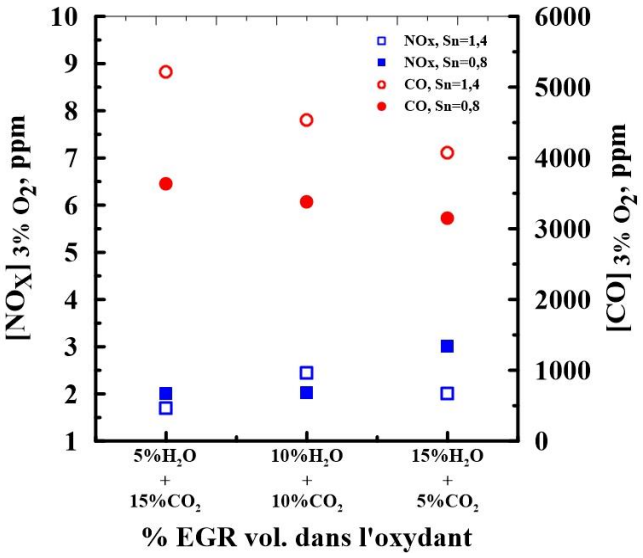


Figure 3.27 : Influence de la dilution en gaz de combustion EGR sur la formation des émissions des NO_X et du CO pour deux nombres de swirl 0,8 et 1,4, un taux d'oxygène de 25% vol. dans l'air et une richesse globale de 0,8.

3.5.4 Effets de l'intensité du swirl

Nous allons étudier dans cette section, l'influence de deux intensités de swirl différentes sur la formation des émissions polluantes NO_X et CO en fonction de la dilution comme l'illustre les Figure 3.28. Nous observons que la formation des émissions des NO_X est généralement indépendante de l'intensité du swirl. Une légère différence est observée dans le cas de la dilution en CO_2, ceci est a priori dû à l'élargissement de la zone de recirculation en augmentant l'intensité du swirl, ce qui favorise la diminution des températures avec la

dilution en CO_2. En ce qui concerne la formation du CO (Figure 3.28 (c,d)), nous constatons une différence des évolutions de la formation du CO en fonction de l'intensité du swirl pour les deux diluants. Cette différence souligne l'impact de la dynamique et du mélange, évoqué dans la section précédente, sur la formation du CO dans les fumées. Nous soulignons que les émissions de CO diffèrent pour les deux nombres de swirl en fonction du type de dilution, CO_2 ou H_2O. En effet, le taux de CO est globalement supérieur pour Sn=1,4 avec du CO_2 alors qu'il est inférieur avec H_2O. Ces résultats montrent que la nature du diluant joue un rôle très important sur les évolutions des émissions du CO.

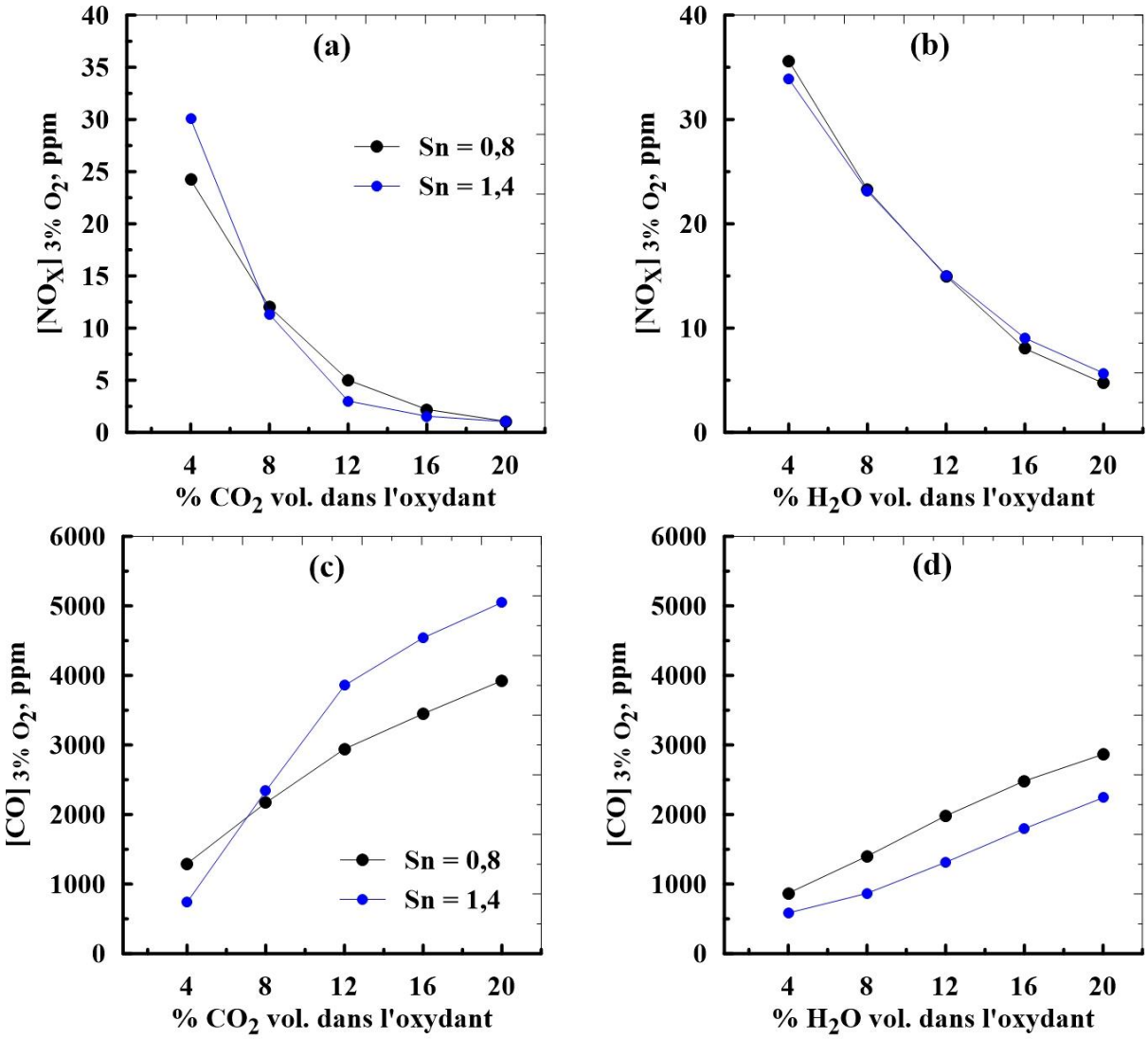


Figure 3.28 : Influence de l'intensité du swirl en fonction de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur la formation des émissions de NO_X (a, b) et sur la formation du CO (c, d) pour un taux d'enrichissement à l'oxygène 25% vol. dans l'air pour deux nombres de swirl 0,8 et 1,4 à une richesse globale de 0,8.

3.5.5 Effets de plasma sur l'évolution des gaz de fumées

Il s'agit dans cette partie de procéder à une analyse couplant la mesure des polluants en sortie de la chambre de combustion et des mesures par Spectroscopie Optique d'Émission (SOE) au niveau de la flamme et du plasma. La Figure 3.29 représente l'évolution de la formation des émissions de NO_X et de CO avec la puissance d'alimentation du PGA « Pulsed Gilding Arc » à une fréquence de 12 kHz. L'effet de la puissance PGA est significatif sur les émissions de CO et relativement faible sur les émissions de NO_X. Sans plasma, le taux de CO est de 290 ppm. En comparaison, avec le plasma, le taux de CO passe de 290 à 160 ppm, soit une diminution de 130 ppm pour une puissance de 120W. En présence de PGA, même à faible consommation d'énergie (23 W), la décroissance du CO reste importante. Pour les émissions de NO_X, le taux augmente de 4 ppm pour une puissance de 120 W. Cependant, sans plasma, le taux de NO_X est de 14 ppm. Nous pouvons noter dans ce cas que la présence de PGA favorise légèrement la formation de NO_X et réduit la production de CO.

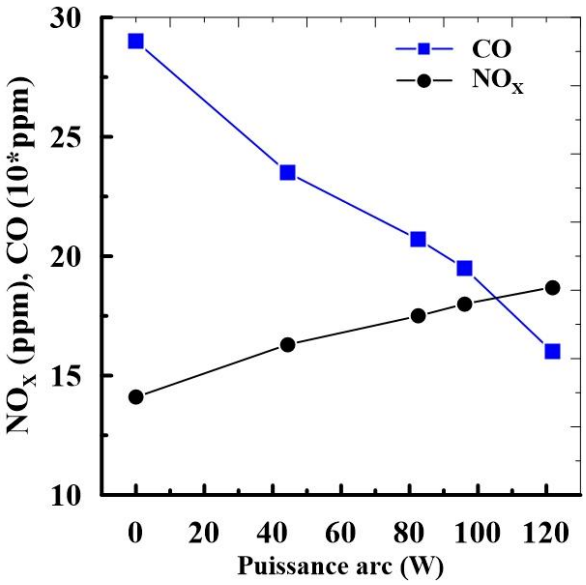


Figure 3.29 : Effet de la puissance du Gliding Arc (PGA) sur l'évolution des émissions NO_X et CO en ppm pour une richesse globale ϕ=1,2 et Sn=1,4.

La réduction du CO prouve que la combustion s'améliore avec le plasma. Ceci est probablement dû à la production d'espèces chimiques réactives par le plasma Arc glissant (PGA) qui favorise les réactions. L'augmentation des NO_X est éventuellement liée à l'augmentation de la température locale par le plasma, qui conduit à la formation de NO_X par le mécanisme thermique. Des mesures spectroscopiques ont été effectuées pour expliquer et analyser ces résultats.

Suite à ces premiers résultats démontrant la possibilité de mise en œuvre de PGA sur le brûleur avec seulement de faibles modifications mécaniques, nous avons testé l'intérêt de la génération de plasma en mesurant les spectres d'émission de flamme avec et sans plasma. Un exemple des résultats préliminaires obtenus est présenté sur la Figure 3.30 pour les mêmes conditions que la Figure 3.29. Le point rouge proche de la sortie du brûleur correspond à la position des mesures spectroscopiques.

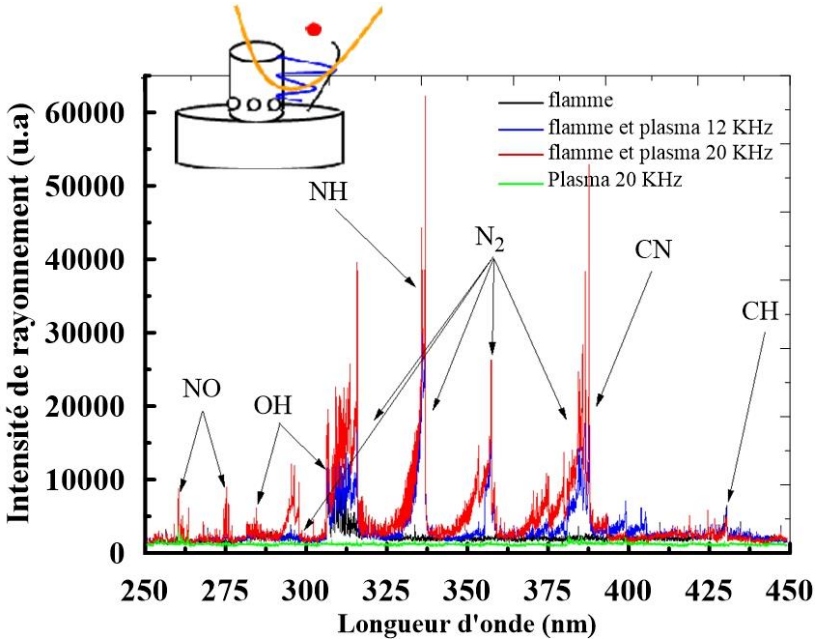


Figure 3.30 : Effet de plasma au bord de l'électrode pour Q_{TOTAL} =169 NL/min, ϕ=1,2 et Sn=1,4.

Nous avons observé une très forte influence du plasma dans cette zone contrairement à la flamme seule caractérisée par une faible émission de radicaux OH et CH. L'identification des spectres moléculaires [173] met en évidence la formation de plusieurs radicaux tels que OH (306 nm), CN (388 nm), CH (431,5 nm), NH (337 nm), NO ou C_2 (512 nm). Seuls les spectres atomiques H (656,3 nm) sont clairement distingués, à l'exception de certains spectres métalliques dus à l'érosion des électrodes. En conséquence, le plasma apporte certains avantages sur la production de radicaux tels que le CN ou le NO, augmentant considérablement avec la fréquence. Néanmoins, le plasma ne semble pas affecter de manière significative la quantité d'espèces clés impliquées dans les processus de combustion comme le CH, H, O ou OH comme le montre la faible augmentation de leurs spectres d'émission. Bien que l'observation du rayonnement N_2 n'est pas primordiale (car il est considéré comme gaz inerte pour la chimie de la combustion), la structure des bandes vibratoires est suffisamment résolue pour être utilisée pour des mesures de température au sein du plasma ou de l'interface plasma/flamme. Par conséquent, les températures du plasma ont été déterminées par une

procédure d'ajustement entre les spectres expérimentaux et théoriques utilisant Specair Software [174]. Un exemple de résultats obtenus dans le front de flamme (à la frontière avec la phase plasma) avec une assistance plasma (f = 20 kHz) est illustré dans la Figure 3.31.

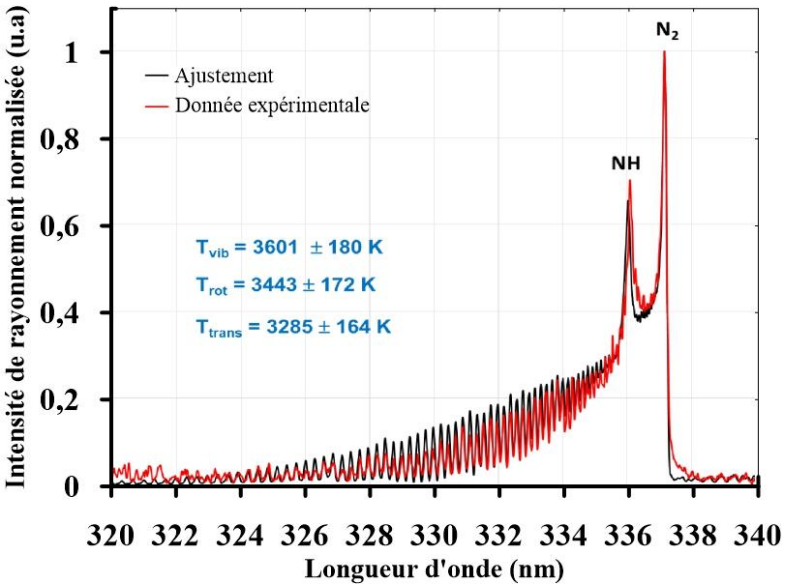


Figure 3.31 : Exemple d'ajustement sur le spectre d'émission de 320 à 340 nm en combustion assistée par plasma. Q_{TOTAL} = 169 NL / min, ϕ = 1,2, Sn = 1,4, f_{PLASMA} = 20 kHz.

Les températures de vibration et de rotation obtenues par la procédure d'ajustement sont respectivement proches de 3601K et 3443 K dans cette condition contre 2812K et 2757 K pour un plasma à f = 12 kHz (non représenté). Par conséquent, le plasma semble générer un léger effet thermique tout au long de la formation de radicaux à la frontière entre le front de flamme et la phase plasma. Ce phénomène est nettement renforcé avec l'augmentation du dépôt d'énergie par ajustement de fréquence conduisant à une production locale plus élevée de radicaux (principalement NH et CN) avec des températures plus élevées. Cette évolution de températures justifie a priori l'évolution de la formation du NO présentée sur la Figure 3.29.

3.5.6 Effet de la géométrie du brûleur

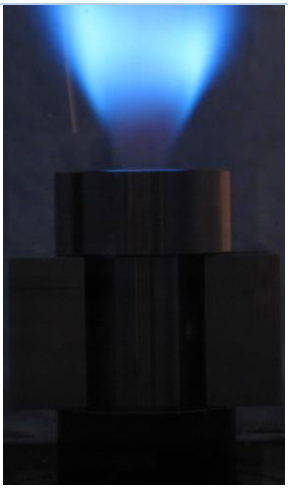
Position du swirler, divergent, avec et sans injection radiale

Dans le but d'étudier les effets de la position du swirler et l'injection radiale du méthane sur l'évolution des formations des espèces et la stabilisation de la flamme dans le cas de notre brûleur, nous avons fabriqué à l'atelier mécanique du laboratoire une pièce métallique en acier inoxydable, qu'on va nommer « couronne ». Cette pièce nous permet un prolongement de la partie coaxial du brûleur, à défaut de placer le swirler plus en amont de la sortie du

brûleur. Le swirler est placé généralement à la distance : D_s = 55 mm de la sortie du brûleur, avec la couronne, il est à 100 mm. En rajoutant les deux cales à la couronne afin de la maintenir, Ds devient 130 mm. Nous avons aussi utilisé un divergent conçu auparavant durant la thèse de Merlo et nous avons également testé un cas sans injection radiale du méthane. Le tableau ci-dessous regroupe les images réelles des flammes et les valeurs des émissions des NO_X et CO correspondantes pour un nombre des swirl de 1,4, une richesse globale à l'injection de 0.8 et un débit d'air fixe de 150 NL/min.

Tableau 3.3 : Photos de flammes et émissions polluantes pour différentes configurations du brûleur.

Composants	Image réelle	NO_X (ppm)	CO (ppm)	Commentaires
Brûleur seul avec diffusion radiale **D_s = 55 mm**		**6**	**2603**	Flamme bleue ± dérochée stable
Brûleur sans diffusion radiale **D_s = 55 mm**		**23**	**1120**	Flamme couronne attaché à l'injecteur du méthane bleue /jaune

Couronne + cales **D_s = 130 mm**		**7**	**2936**	Flamme bleue décrochée stable
Couronne **D_s = 100 mm**		**6**	**3068**	Flamme bleue stable et plus intense
Divergent		**8**	**2398**	Flamme bleue moins décrochée stable

On peut tirer à partir de ces résultats plusieurs conclusions :

- L'injection radiale du méthane favorise la formation du CO et réduit la formation des NO_X d'un facteur de 3 pour les deux polluants.
- Placer le swirler loin de la sortie du brûleur favorise la formation du CO.

- Placer le swirler loin de la sortie décroche davantage la flamme en la maintenant stable.
- L'utilisation d'un divergent diminue légèrement la formation du CO mais favorise la formation des NO_X.
- Pour les cas d'enrichissement d'air à l'oxygène très importants (non présenté ici), placer le swirler loin de la sortie du brûleur favorise la stabilité de ce type de flamme loin du brûleur en la maintenant bleue et intense même pour les mélanges riches.

Nombre, diamètre et angle de trous de la tête de l'injecteur du CH_4

Toujours dans le but de réduire les émissions du CO, et pour les mêmes conditions opératoires, nous allons nous intéresser dans cette partie à l'injection radiale du carburant, qui s'est avéré un élément majeur responsable de la quantité de CO émise par la flamme. Pour ce faire, nous avons fabriqué différentes têtes d'injecteur avec différents diamètres de trous et un injecteur avec le même diamètre de trou que celui utilisé durant cette étude, mais avec un angle d'inclinaison des trous d'injection de 45° au lieu d'une injection radiale de 90°. Le tableau ci-dessous présente les différentes configurations et les résultats obtenus sur les évolutions des émissions des NO_X et du CO.

Tableau 3.4 : Résultats obtenus avec les différentes têtes d'injecteur.

Nombre de trous	Diamètre du trou (mm)	Angle °	NO_X (ppm)	CO (ppm)
8	**3**	90	5	2623
8	**3**	45	2	2167
8	**4**	90	3	2040
6	**5**	90	3	1342

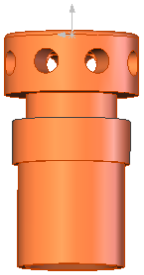


Figure 3.32 : Représentation 3D de l'injecteur de méthane utilisé dans l'étude.

Ces résultats montrent que la géométrie du brûleur joue un rôle très important sur la qualité du mélange et par conséquent la qualité de la combustion. Nous constatons à partir du tableau une baisse des NO_X et une forte baisse des émissions du CO avec l'augmentation des diamètres des trous. Nous observons une diminution d'environ 23% des émissions du CO en passant de 3 mm à 4 mm avec 8 trous, et une diminution d'environ 50% en diminuant le nombre de trous à 6 et en augmentant le diamètre jusqu'à 5 mm. Pour le cas d'une injection incliné de 45° avec 3 mm de diamètre et 8 trous, nous notons une baisse d'environ 18%. En effet, l'augmentation de la taille des diamètres des trous réduit la vitesse d'injection du méthane et permet de réduire le gradient de vitesse, entre la vitesse d'injection du méthane et la vitesse de l'oxydant dans le tube coaxial, favorisant ainsi le mélange et la combustion. Nous pouvons déduire à partir de ces données qu'une légère modification de la géométrie de la tête d'injecteur, peut améliorer nettement le mélange à la sortie du brûleur et réduire ainsi les imbrûlés responsables de la formation des émissions du CO.

3.6 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre la structure, la stabilité et les évolutions des émissions polluantes en fonction de plusieurs paramètres : l'enrichissement en dioxygène, la dilution en CO_2, H_2O et EGR, la richesse globale, l'intensité du swirl et aussi l'utilisation d'un arc glissant (plasma), d'une flamme turbulente swirlée CH_4-air.

Dans un premier temps, une étude numérique portant sur les effets de l'enrichissement et de la dilution en dioxygène nous a permis d'avoir un aperçu sur les effets chimiques des gaz de combustion et aussi ceux de l'augmentation du taux d'oxygène dans l'air. Les résultats montrent que :

- L'ajout du dioxygène augmente significativement la vitesse de flamme à pression atmosphérique.
- Pour le CO_2, comme pour H_2O, la dilution diminue les vitesses de flammes et les températures de flamme à l'équilibre thermodynamique à pression atmosphérique.
- L'effet de la dilution en CO_2 est plus prononcé que celui de la dilution en H_2O.

Les diagrammes de stabilité de la flamme nous ont permis par la suite de choisir le type de flamme pour lequel l'étude a été menée (flamme liftée stable). Nous avons constaté à partir de ces derniers que la présence du swirler permet d'atteindre des régimes de turbulence très

élevés (Re= 12000) et que dans le cas contraire (sans swirler), pour un débit de méthane donné, l'augmentation du débit d'air conduit au soufflage complet de la flamme pour des nombres de Re < 2000. L'enrichissement en dioxygène favorise davantage la stabilisation de la flamme.

Les mesures des émissions directes de la flamme par chimiluminescence OH* ont permis d'étudier la localisation spatiale de la flamme. Les résultats sont regroupés dans les points suivants :

- L'enrichissement à l'oxygène conduit à une baisse de la hauteur d'accrochage de la flamme et une augmentation de la longueur de flamme jusqu'à un accrochage complet de la flamme au brûleur pour des taux d'oxygène supérieure à 27 % pour les fortes intensités de swirl 1,1 et 1,4.
- La dilution en CO_2 induit une forte augmentation de la hauteur d'accrochage et une forte augmentation de la longueur de flamme.
- La dilution en vapeur d'eau tend à augmenter légèrement la hauteur d'accrochage de la flamme et aussi la longueur de flamme à partir d'un taux de dilution de 12%.
- La dilution en EGR augmente la hauteur d'accrochage de la flamme. Plus le taux de CO_2 est important dans le mélange EGR, plus la hauteur d'accrochage est importante. Il est possible de diminuer considérablement cette hauteur avec l'enrichissement en dioxygène.
- L'augmentation de l'intensité du swirl permet de diminuer la hauteur d'accrochage de la flamme ce qui permet d'améliorer sa stabilité.
- L'utilisation d'arc glissant pulsé favorise la stabilisation de la flamme en étant une source d'allumage, ce qui permet de réduire ou empêcher la création de points d'extinction de la flamme, notamment pour les mélanges très riches, ce qui paraît un élément prometteur dans le cas de la dilution.

Les évolutions des émissions polluantes, notamment les NO_X et le CO, ainsi que les températures de fumées ont été abordées ensuite en fonction des différents paramètres de l'étude. Les résultats sont rassemblés ci-dessous :

- L'enrichissement en dioxygène conduit à une forte diminution de la concentration du CO dans les fumées en favorisant la combustion, mais contribue à la formation des émissions des NO_X par la voie thermique en augmentant les températures des flammes. Les mesures de températures de fumées confirment cette tendance.

- L'augmentation de la richesse globale induit une diminution considérable des taux de CO et une diminution modérée des NO_X dans les fumées.
- La dilution en CO_2 conduit à une diminution des émissions des NO_X suite à la capacité calorifique importante du CO_2 à absorber la température et réduire ainsi le taux de production de NO. Ceci est confirmé par les évolutions des températures de fumées. Le taux de formation du CO augmente avec l'augmentation du CO_2. Le CO_2 présent concurrence l'O_2 pour l'hydrogène atomique et conduit à la formation du CO principalement par la réaction inverse de $OH + CO \rightleftharpoons H + CO_2$.
- La dilution en vapeur d'eau conduit également à une diminution des NO_X suite à la diminution des températures de flammes. Comme pour la dilution en CO_2, l'ajout de la vapeur d'eau diminue la fraction d'azote pour un débit d'oxydant fixe, ce qui diminue les concentrations des espèces N et O responsables de la formation des NO_X. La dilution en vapeur d'eau induit une légère augmentation du CO, liée probablement à la création des points d'extinction dans la flamme avec l'injection de la vapeur d'eau.
- L'ajout des EGR à 20% induit à une forte diminution des NO_X quelles que soient les proportions des diluants. Une augmentation des teneurs du CO est observée. Des proportions volumiques égales des diluants dans le mélange EGR restent le meilleur compromis dans ce type de dilution.
- L'intensité du swirl a un effet très négligeable sur la formation des émissions de NO_X quel que soit le diluant. En ce qui concerne le CO, l'effet de l'intensité du swirl dépend du type de diluant considéré (CO_2, H_2O ou EGR).
- La réduction du CO prouve que la combustion s'améliore avec le plasma et la légère augmentation des NO_X est éventuellement liée à l'augmentation de la température locale par la décharge électrique locale générée par le plasma.
- La géométrie du brûleur joue un rôle très important sur les taux émissions polluantes, notamment les émissions du CO.

Les aspects dynamiques de la flamme étudiés dans le chapitre suivant complètent les présentes approches dans le but de mieux évaluer et comprendre les effets de la dilution sur la dynamique de la flamme swirlée.

Chapitre 4. Dynamique et structure des flammes swirlées enrichies à l'oxygène et diluées en gaz de combustion

4.1 Introduction 133

4.2 Caractéristiques et dynamique des jets swirlés en non réactif et réactif 134

4.3 Influence de la richesse globale à l'injection sur les champs dynamiques..... 141

4.4 Influence de l'intensité du swirl sur les champs moyens dynamiques 144

4.5 Influence de l'enrichissement à l'oxygène sur les champs dynamiques 147

4.6 Influence de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur les champs dynamiques 152

4.6.1 Effet du CO_2 sur les champs dynamiques 152

4.6.2 Effet de la vapeur d'eau sur les champs dynamiques..... 156

4.6.3 Comparaison des effets de CO_2 et H_2O sur les champs dynamiques..... 159

4.7 Influence de la dilution en EGR sur les champs dynamiques 162

4.8 Conclusion 166

4.1 Introduction

Ce chapitre présente une approche expérimentale ayant pour objectif d'étudier l'influence de la flamme, l'intensité du swirl, la richesse à l'injection, l'enrichissement à l'oxygène et la dilution en gaz de combustion sur la dynamique de l'écoulement et de la flamme swirlée. Les résultats sont principalement obtenus à partir de la technique de Stéréo-PIV. Quelques résultats de LDV-2D seront également présentés.

Dans un premier temps, l'effet de la combustion sur l'écoulement swirlé est évalué afin de distinguer les zones principales de l'écoulement en réactif et en non-réactif. Les évolutions de la décroissance des vitesses longitudinales et azimutales sur l'axe sont présentées. Ensuite l'effet de l'intensité du swirl et l'effet de la richesse globale à l'injection sont décrits. Dans la section suivante est présenté l'effet de l'enrichissement à l'oxygène sur les champs moyens de vitesses et leurs fluctuations. Les trois dernières sections sont consacrées à l'examen des effets de la dilution en gaz de combustion (CO_2, H_2O et EGR) sur la structure et la dynamique de l'écoulement réactif swirlé. L'ensemble des moyennes sont obtenues à partir de 500 champs instantanés Stéréo-PIV. Cette étude permet de mieux comprendre les tendances et les approches dévoilées dans le chapitre précédent. Le tableau suivant regroupe les paramètres opératoires de la présente étude. Le débit de l'oxydant est fixé à 150 Nl/min pour l'ensemble de l'étude.

Tableau 4.1 : Tableau récapitulatif des cas étudiés avec la technique Stéréo-PIV.

	Sn	ϕ	Ω	% vol. diluant
Effet O_2	1,4	1	21 23 25 27 30	-
Effet CO_2	0,8 1,4	0,8	21	0 4 8 10 12 16 20
			25	10
Effet H_2O	0,8 1,4	0,8	21	0 4 8 10 12 16 20
			25	10
Effet EGR	1,4	0,8	21 25 30	$10CO_2 + 10H_2O$

4.2 Caractéristiques et dynamique des jets swirlés en non réactif et réactif

Les Figure 4.1 illustrent l'effet de la flamme sur le jet swirlé à travers les champs moyens des trois composantes de vitesse : radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ. Nous comparons dans un premier temps les champs moyens dynamiques en réactif (R) et en non réactif (NR) pour un nombre de swirl de Sn = 1,4, une richesse globale à l'injection de ϕ = 0,8 et une combustion à l'air (21% d'O_2), dans le plan longitudinal à l'écoulement. Nous rappelons que dans le cas non réactif, le méthane est remplacé par de l'azote afin de conserver des vitesses similaires en sortie de la partie annulaire du brûleur.

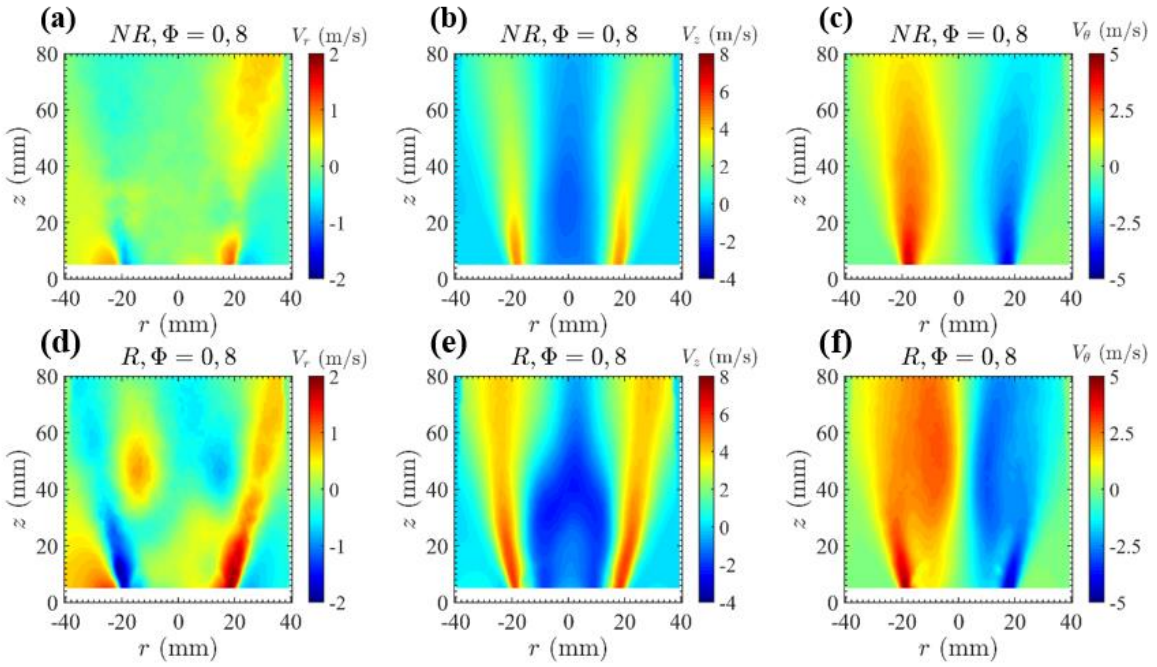


Figure 4.1: Champs moyens de vitesse radiale V_r (a, d), longitudinale V_z (b, e) et azimutale V_θ (c, f) de l'écoulement en non-réactif « NR » (a, b, c) et réactif « R » (d, e, f) pour le cas ϕ = 0,8, Sn = 1,4 et 21 % d'oxygène.

Nous pouvons constater que la présence de la flamme change complètement l'aspect dynamique de la flamme. Généralement, nous remarquons un fort élargissement de l'écoulement avec la combustion, comme le montrent les champs moyens de la vitesse radiale. La Figure 4.3 (j) illustre l'augmentation des maxima de la vitesse radiale dans la zone proche du brûleur, qui se traduit par un élargissement de la base de flamme d'où sa stabilisation. En outre, cette tendance est particulièrement visible au niveau de la zone de recirculation figurant sur les champs moyens de la vitesse longitudinale V_z. Nous notons également une augmentation des vitesses due à l'expansion des gaz avec la combustion. En ce qui concerne la vitesse azimutale, nous remarquons qu'en présence de la flamme,

l'écoulement swirlé envahit l'ensemble de la flamme, y compris la zone de recirculation centrale (ZRC). La présence de la flamme semble entretenir et amplifier le swirl en supprimant la bimodalité de la distribution radiale de V_θ et en ramenant le swirl vers l'axe de l'écoulement.

Les Figure 4.2 illustrent de façon explicite l'influence de la flamme sur la ZRC. Dans les deux cas, l'écoulement dans son ensemble présente une zone de recirculation centrale qui est entourée d'un jet swirlé et qui s'intensifie avec la combustion. Les lignes de courant sont établies à partir des vitesses radiales et longitudinales (V_r, V_z). Celles-ci décrivent parfaitement l'acheminement des gaz recirculés vers le centre de l'écoulement avec la combustion grâce à la ZRC. Par conséquent, des espèces radicalaires sont amenées du cœur de flamme vers la base du brûleur d'où la stabilisation de la flamme, ainsi le mélange qui est amené à la zone réactionnelle subit un préchauffage avec une richesse effective qui est *a priori* différente de la richesse globale à l'injection. Notons également la présence des deux tourbillons au niveau des couches de mélanges internes, qui augmentent considérablement en taille dans le cas de l'écoulement réactif (cf. Figure 4.2 (b)).

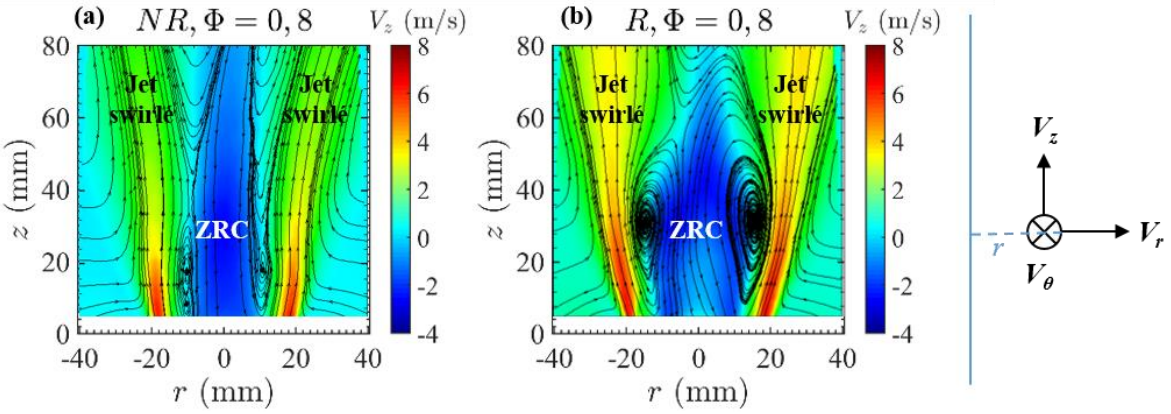


Figure 4.2: Influence de la flamme sur les lignes de courant à partir du couple (V_r, V_z) pour les champs moyens de vitesse longitudinale V_z avec ϕ = 0,8, 21% d'O_2 et Sn = 1,4 : (a) cas non–réactif; (b) cas réactif.

L'ensemble des Figure 4.3 rassemble les profils de V_r, V_z et V_θ extraits des champs moyens à quatre hauteurs dans l'écoulement (z = 10, 30, 60 et 100 mm) dans le cas réactif (R) et non réactif (NR). Dans le cas réactif, l'augmentation des composantes de la vitesse constatée proche de la sortie du brûleur (à z = 10 mm), notamment pour V_r et V_z, pourrait résulter d'un apport massique de gaz issus de la zone de recirculation centrale. En effet, la température des gaz recirculés est plus élevée que celle des gaz frais en provenance du brûleur. Ceci, favorise l'augmentation de la vitesse en sortie du brûleur avec l'augmentation de la température d'où une baisse de la densité des gaz. Plus en aval dans l'écoulement, la

vitesse diminue et l'effet du swirl s'atténue. Notons que le jet swirlé met en rotation également la zone de recirculation par effet visqueux. Les gaz qui la composent sont alors plus visqueux puisque la température de la ZRC est plus élevée que celle du jet swirlé ce qui favorise son entraînement [97]. Loin de la sortie du brûleur, quelle que soit la composante de vitesse, les valeurs de vitesse de l'écoulement réactif sont plus importantes que celles de l'écoulement non réactif.

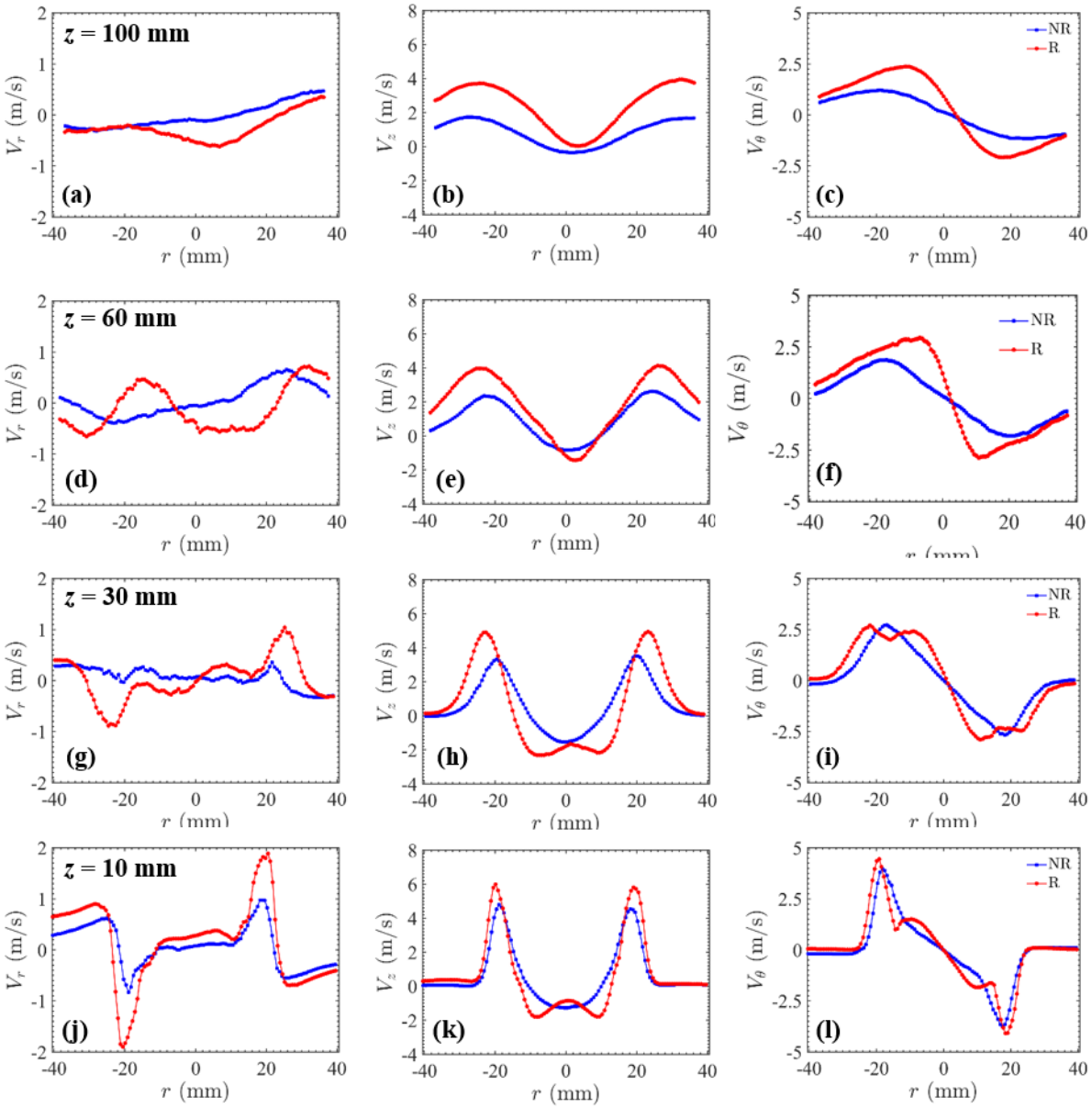


Figure 4.3: Profils de vitesse moyenne radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=1,4 en réactif (R) et en non-réactif (NR).

Nous avons observé les mêmes tendances avec la technique LDV. Nous représentons dans la Figure 4.4 les profils de vitesse longitudinale en réactif et en non-réactif obtenus avec la technique LDV pour le cas d'une combustion à l'air , une richesse globale à l'injection ϕ= 0,8

et un nombre de swirl Sn = 1,4. Les mesures sont effectuées pour cinq différentes hauteurs (*z* = 10, 30, 60, 100 et 180 mm), avec un pas de *r* = 1 mm sauf pour le cas de 18 cm, le pas est de 2 mm.

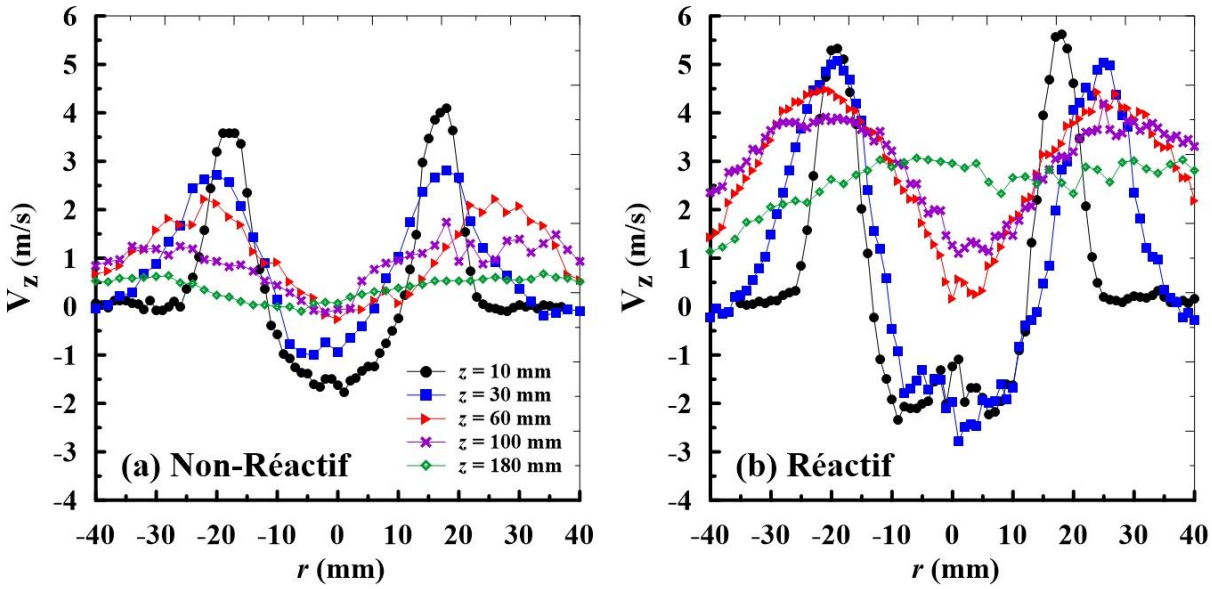


Figure 4.4 : Profils de la vitesse longitudinale obtenus par LDV pour le cas 21 % d'O_2, ϕ= 0,8 et Sn = 1,4 en non-réactif (a) et en réactif (b) à différentes hauteurs z : 10, 30, 60, 100 et 180 mm.

Nous présentons sur les Figure 4.5 les champs des fluctuations de vitesse V'_r, V'_z et V'_θ en conditions réactives et non-réactives pour le cas : Sn = 1,4, ϕ = 0,8 et 21% d'O_2 dans l'air. Nous observons une augmentation des fluctuations, d'où des niveaux de turbulence de l'écoulement, avec combustion par rapport au cas non réactif dans deux régions. La première concerne la zone du jet swirlé située à moins d'un diamètre de la sortie du brûleur, et donc avant la zone réactionnelle. La deuxième se situe sur la partie supérieure de la ZRC dans l'axe central du jet et se prolonge dans la partie réactionnelle. La turbulence, entretenue par la combustion, envahit progressivement l'ensemble du jet lorsque z augmente.

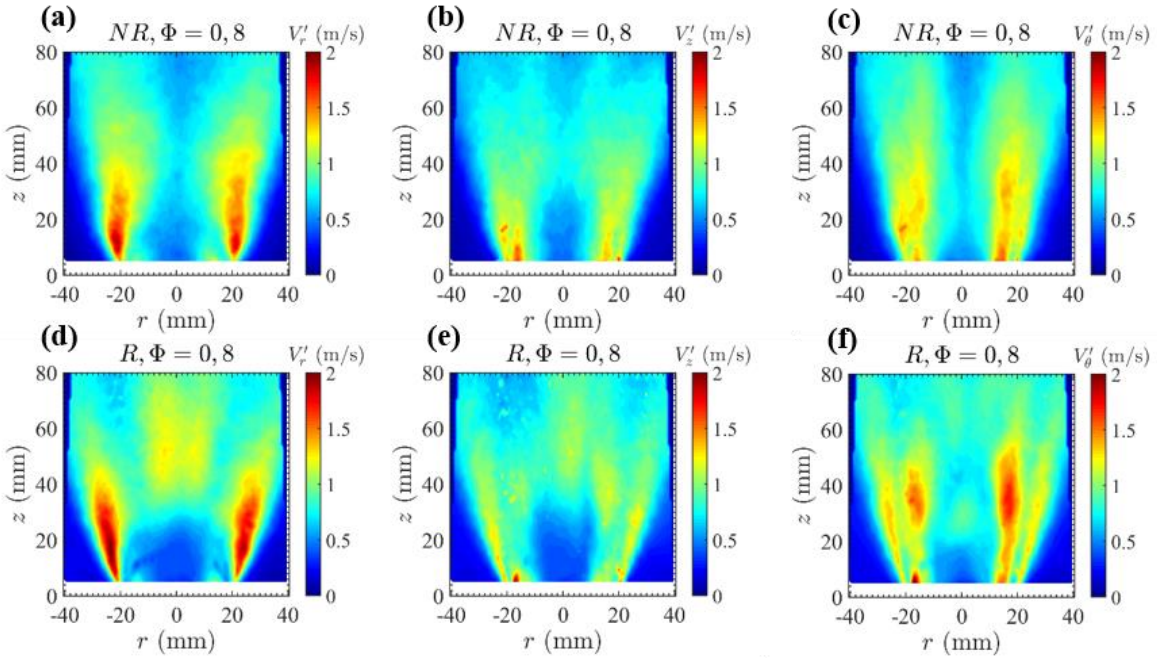


Figure 4.5: Champs des fluctuations de vitesse radiale V_r (a, d), longitudinale V_z (b, e) et azimutale V_θ (c, f) de l'écoulement en non-réactif « NR » (a, b, c) et réactif « R » (d, e, f) pour le cas ϕ = 0,8, Sn = 1,4 et 21 % d'O_2.

La Figure 4.6 rassemble les profils des fluctuations de V_r,V_z et V_θ à différentes hauteurs dans l'écoulement. Des comparaisons entre les profils de vitesses de l'écoulement réactif (R) et l'écoulement non-réactif (NR) sont effectuées à quatre hauteurs de z pour les trois composantes de vitesse. Les profils caractéristiques des fluctuations de vitesse présentent une région centrale faiblement turbulente et une zone annulaire avec des taux de fluctuations plus importants. La zone centrale est associée à la zone de recirculation qui ramène l'écoulement vers le point d'arrêt imposé par le bluff-body. La région annulaire correspond au jet swirlé. Plus en aval dans l'écoulement, les profils s'aplatissent et s'élargissent en non réactif. En réactif, nous observons que cette tendance est modifiée ce qui témoigne de l'effet de la présence de la flamme sur la turbulence. En effet, la combustion tend à diminuer légèrement les fluctuations des différentes composantes de vitesse dans la zone proche du brûleur (z = 10 mm). Après la traversée du front de flamme (z > 20 mm), les fluctuations des différentes composantes de vitesse sont amplifiées par la combustion comme le montre l'ensemble des Figures 4.6 (a) jusqu'à 4.6 (i).

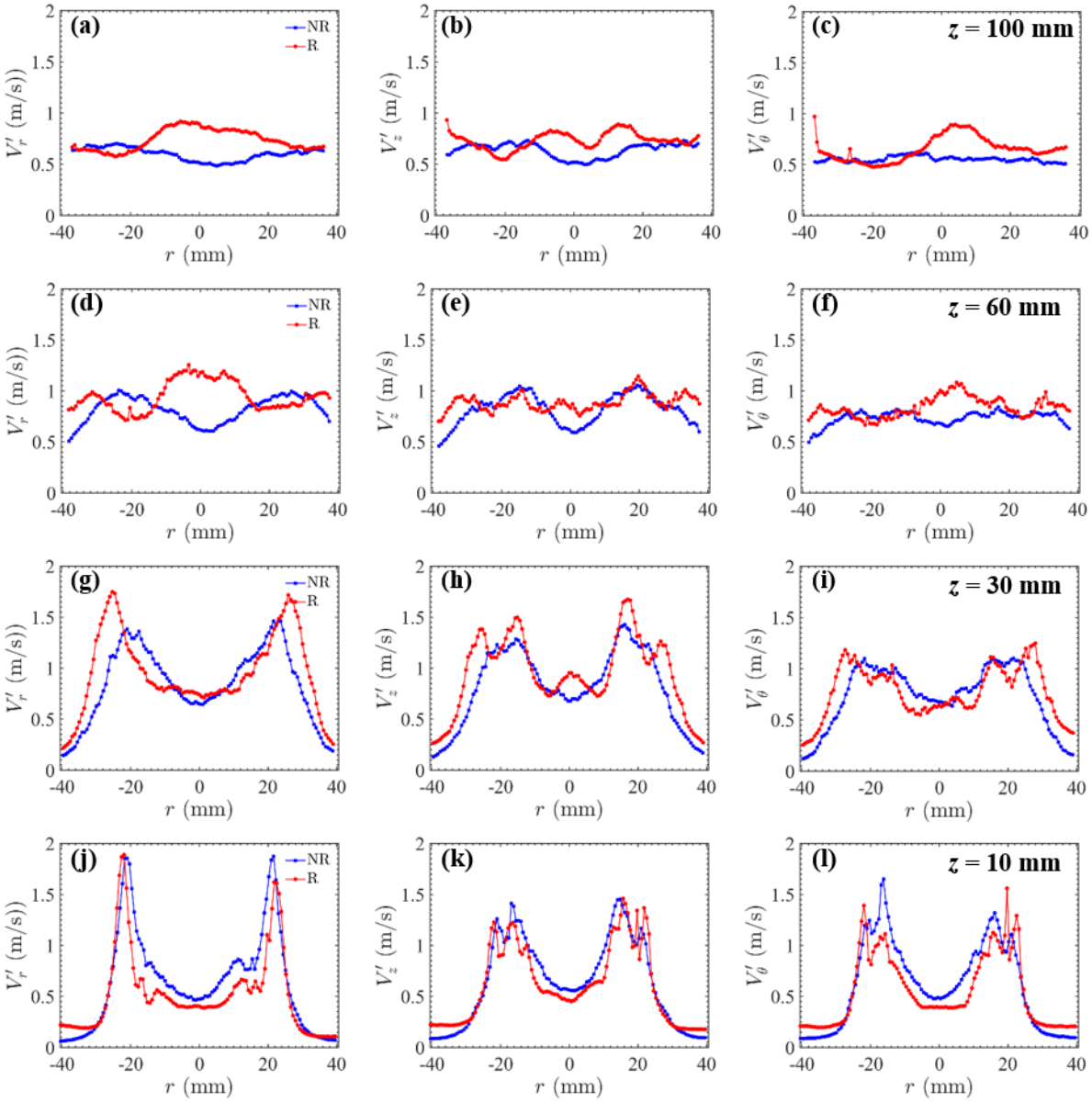


Figure 4.6: Profils des fluctuations de vitesse radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=1,4 en réactif (R) et en non-réactif (NR).

L'ensemble des Figure 4.7 permet d'illustrer la décroissance des vitesses longitudinales et azimutales dans le plan longitudinal à l'écoulement, pour une richesse globale à l'injection de 0,8 et un nombre de swirl de 1,4 et pour une combustion à l'air. Les maxima de la vitesse azimutale, en valeur absolue, sont rapportés par les pointillés en blanc et ceux de la vitesse longitudinale, en valeur absolue, par des tirets en noir. Les flèches grises représentent les maxima des vitesses dans la zone centrale de l'écoulement. Les courbes de décroissance des vitesses sont regroupées dans l'ensemble des Figure 4.8.

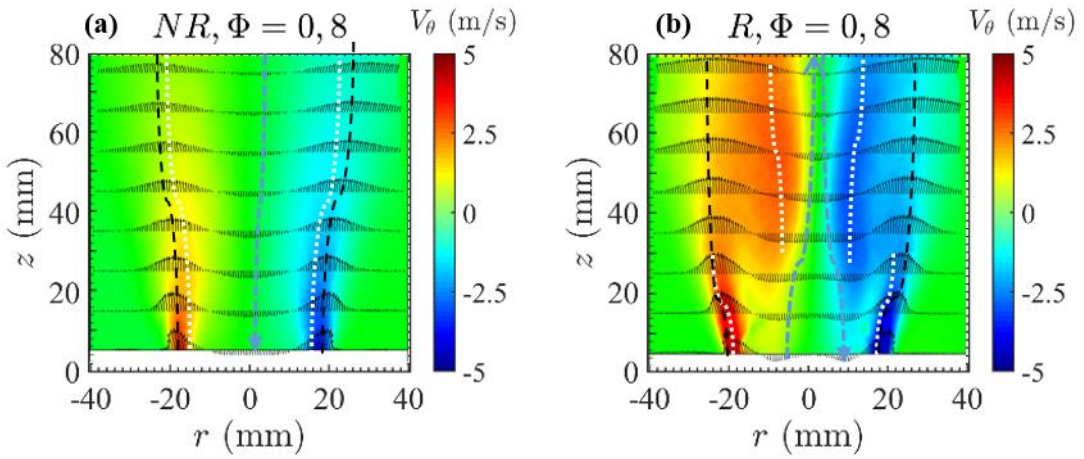


Figure 4.7 : Décroissance axiale de vitesse longitudinale (tirets noirs) et azimutale (points blancs) pour la branche gauche (LB), centrale et droite (RB) pour le cas : Sn= 1,4 et ϕ = 0,8 et 21 % O_2 dans l'air.: (a) en non réactif ; (b) en réactif.

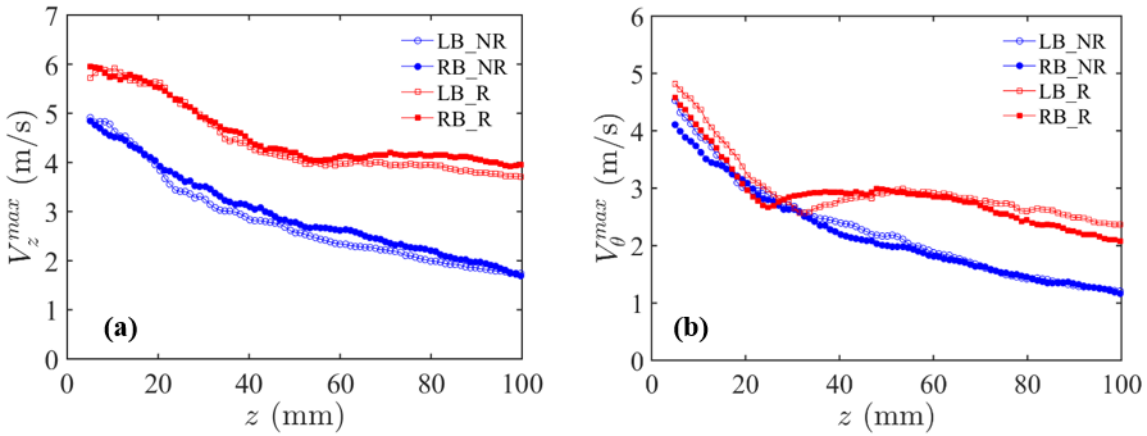


Figure 4.8 : Décroissance axiale des vitesses moyennes pour les branches gauche LB et droite RB, pour le cas Sn = 1,4 et ϕ = 0,8, 21 % O_2 : (a) composante longitudinale (V_z); (b) composante azimutale (V_θ).

L'écoulement réactif présente une décroissance de vitesse longitudinale continue le long de l'écoulement. L'évolution de la vitesse maximale V_z^{max} est quasi similaire pour les deux branches de l'écoulement (LB_NR et RB_NR). La décroissance des maxima de la vitesse azimutale V_θ^{max} de l'écoulement réactif est nettement différente du cas non réactif, en termes de valeur et de forme.

En réactif, la vitesse longitudinale décroît jusqu'à environ z = 55 mm, puis augmente légèrement pour se maintenir quasi-constante ensuite par la présence de la flamme et l'expansion des gaz. En ce qui concerne la vitesse azimutale, la décroissance des vitesses en non-réactif reste similaire au cas réactif jusqu'aux alentours de z = 30 mm. La présence de la

flamme engendre une bifurcation des maxima de vitesse vers l'axe à partir de z = 30 mm. Au-delà, nous observons une augmentation significative de la vitesse azimutale qui commence à décroître légèrement à partir de 60 mm. Cette bifurcation est liée en premier lieu à la différence de la densité des gaz recirculés par rapport à celle du jet swirlé à la sortie du brûleur. Au-delà du front de flamme, le gradient radial de pression et le nouvel équilibre des forces centrifuges conduisent à une rotation des gaz brûlés plus proche de l'axe central. Une autre approche basée sur le phénomène d'éclatement tourbillonnaire « vortex breakdown » peut être considérée. Celui-ci est lié aux instabilités hydrodynamiques provoquées par la ZRC (voir section 1.3.4). Il consiste à estimer la flamme comme source de vorticité d'origine barocline, qui prend en compte le gradient de pression, et qui se redistribue dans les gaz brûlés. Cette vorticité induit une vitesse dans le sens de propagation du front de flamme. En général, plusieurs phénomènes contribuent à l'évolution de vorticité : l'advection (lorsque les tubes vortex se déplacent avec le flux), l'étirement et la rotation ou la torsion (lorsque les tubes vortex sont tirés ou tordus par le flux) et de la génération de vortex barocline, qui se produit chaque fois qu'il y a gradient de densité le long de surfaces de pression constante [175].

4.3 Influence de la richesse globale à l'injection sur les champs dynamiques

Nous comparons dans l'ensemble des Figure 4.9 les champs moyens de vitesse de l'écoulement réactif de deux mélanges différents : mélange pauvre $\phi = 0,8$ et un mélange à la stœchiométrie $\phi = 1$, pour une combustion à l'air et un nombre de swirl Sn = 0,8. Ces résultats nous permettent de compléter les conclusions observées dans le chapitre précédent.

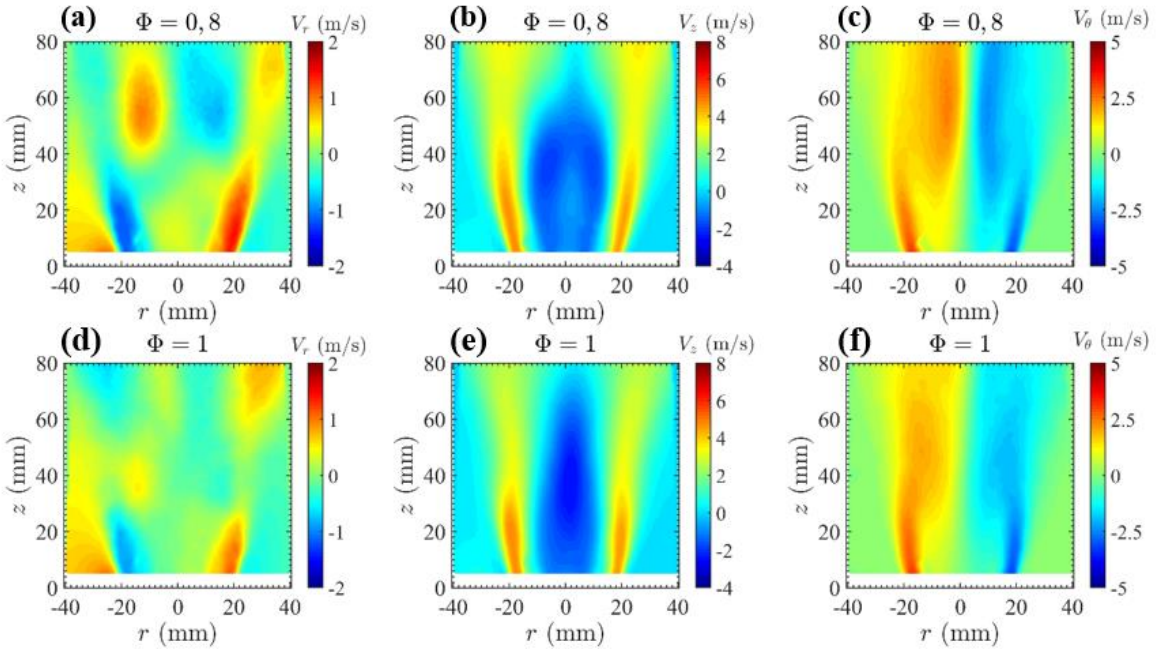


Figure 4.9 : Champs moyens de vitesse radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ de l'écoulement réactif en fonction de deux richesses ϕ = 0,8 (a, b, c) et ϕ = 1 (d, e, f) pour le cas Sn = 0,8 et 21 % d'oxygène.

Les Figure 4.10 et Figure 4.11 rassemblent respectivement les profils de vitesses V_r, V_z et V_θ et des fluctuations de vitesse correspondantes V'_r, V'_z et V'_θ à différentes hauteurs dans l'écoulement.

Pour la composante radiale de la vitesse, les résultats montrent une large différence en valeurs et en forme lorsque la richesse globale à l'injection passe de 0,8 à 1. La Figure 4.10 (j) illustre parfaitement cette différence avec des vitesses plus faibles pour ϕ = 1. En ce qui concerne la composante longitudinale de vitesse, nous remarquons tout d'abord que les formes de la zone de recirculation sont légèrement différentes lorsque la richesse globale à l'injection passe de 0,8 à 1. Il semble que l'augmentation de ϕ augmente sensiblement le gradient axial de pression responsable de la structure de la zone de recirculation centrale, qui se traduit par une diminution plus importante de pression et un rétrécissement de la ZRC lorsque z augmente. Nous pouvons constater une légère augmentation de la vitesse longitudinale de recirculation lorsque la richesse globale à l'injection augmente comme le témoignent les Figure 4.10 (e), (h) et (k). On note également la différence des profils de vitesse longitudinale de la ZRC et la diminution de l'expansion radiale sur ces mêmes profils. Cette dernière tendance favorise la déstabilisation de la flamme. Ainsi, les fluctuations de vitesse augmentent principalement dans la zone de recirculation centrale de l'écoulement suite à l'élévation des vitesses longitudinales de recirculation comme l'illustre l'ensemble des

Figure 4.11. D'après l'évolution du taux d'entraînement en fonction de la richesse globale à l'injection suivant *z* observé dans l'étude de Merlo [97], le mélange des réactifs est dilué davantage par les gaz entraînés (gaz brûlés) lorsque ϕ passe de 0,8 à 1. Il en résulte un préchauffage des gaz avant la combustion, qui influence la température de la flamme et par conséquent l'évolution des NO_X dans les fumées. Enfin, il s'avère que la richesse globale à l'injection a très peu d'influence sur la composante azimutale de vitesse.

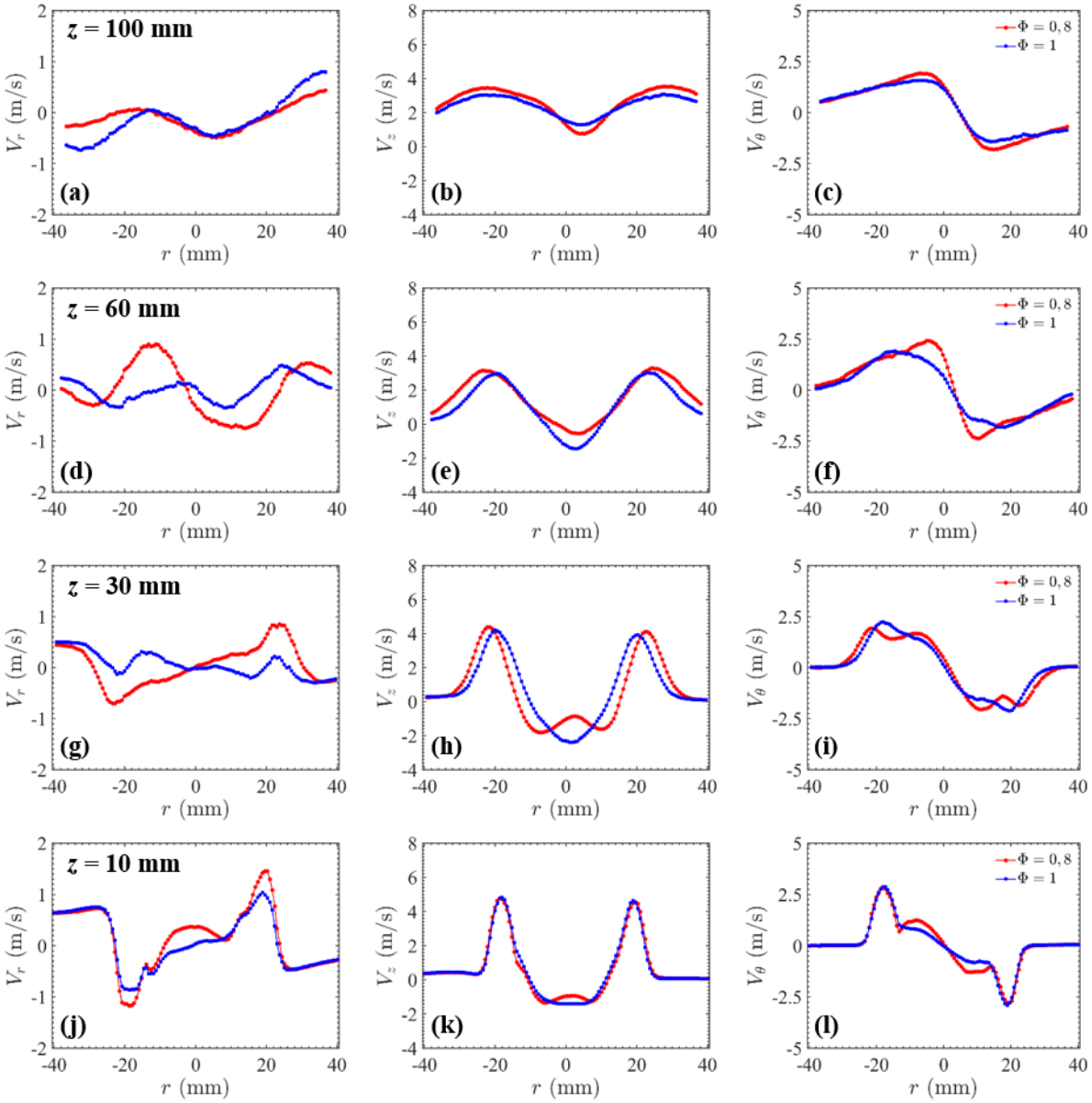


Figure 4.10 : Profils de vitesse moyenne radiale V_r (a, d, g, j), longitudinale V_z (b, e, h, k) et azimutale V_θ (c, f, i, l) à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas Sn=0,8 à 21% d'O_2 pour deus richesses différentes ϕ = 0,8 (en rouge) et ϕ = 1(en bleu).

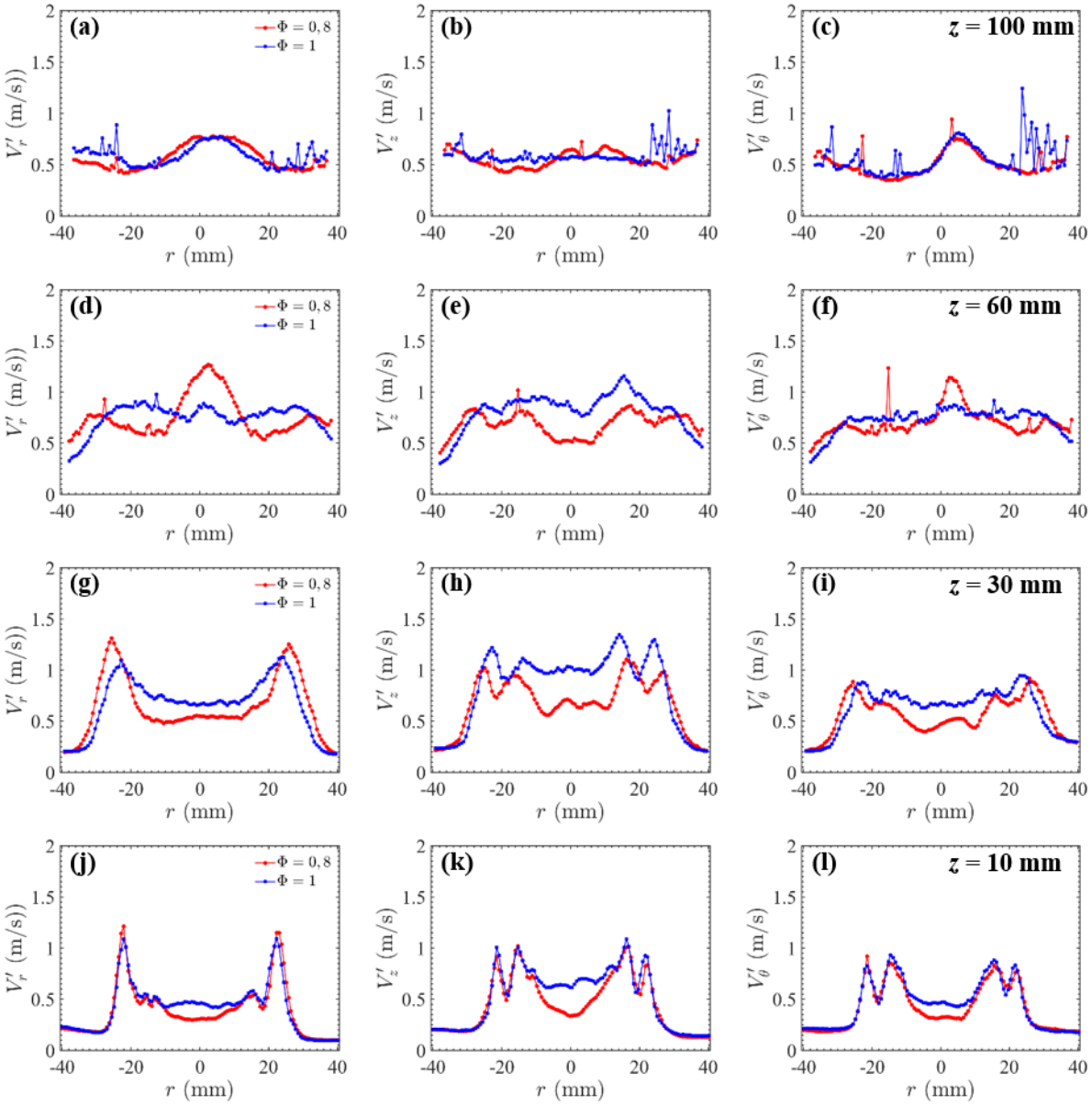


Figure 4.11 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V'_r (a, d, g, j), longitudinale V'_z (b, e, h, k) et azimutale V_θ (c, f, i, l) à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas Sn=0,8 à 21% d'O_2 pour deux richesses différentes ϕ = 0,8 (en rouge) et ϕ = 1(en bleu).

4.4 Influence de l'intensité du swirl sur les champs moyens dynamiques

Nous allons comparer dans cette section les champs dynamiques moyens des trois composantes de vitesse, les profils de vitesse et les profils de fluctuations de vitesse à différentes hauteurs, pour deux différents nombres de swirl Sn = 0,8 et Sn = 1,4, pour une combustion à l'air à une richesse globale à l'injection de ϕ = 0,8.

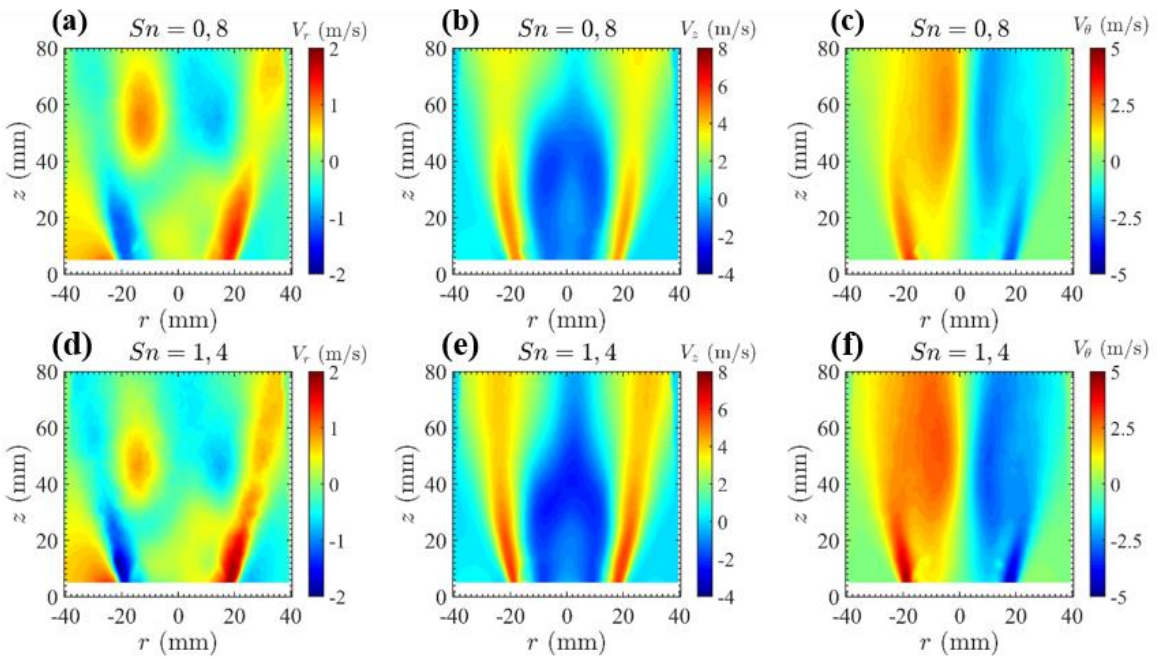


Figure 4.12 : Champs moyens de vitesse (V_r, V_z,V_θ) pour le cas ϕ = 0,8, 21 % d'O_2 et deux nombres de swirl : Sn=0,8 (a, b, c) et Sn=1,4 (d, e, f).

Tout d'abord, nous rappelons que, d'après les résultats sur la stabilité de la section 3.4.3, l'augmentation de l'intensité du swirl conduit à une stabilisation de la flamme qui se traduit notamment par une diminution de la hauteur d'accrochage de la flamme et des fluctuations associées. L'ensemble des champs moyens de vitesse, Figure 4.12, montre que l'augmentation de l'intensité de swirl conduit à une augmentation significative de l'expansion radiale du jet. Pour la composante radiale de vitesse, les Figure 4.12 (a) et (d) illustrent le déplacement des deux zones représentant les gaz brûlés en expansion vers la base du brûleur avec l'augmentation de l'intensité du swirl. Ces zones reflètent l'expansion locale des gaz brûlés produits par le front de flamme. Ce déplacement explique éventuellement la diminution de la hauteur d'accrochage observée par chimiluminescence du radical OH*. Pour la composante longitudinale, nous observons une augmentation notable de la vitesse longitudinale du jet swirlé ainsi que celle de recirculation comme le montrent également les Figure 4.13 (b), (e), (h) et (k). Le champ moyen de la composante de vitesse azimutale montre que la vitesse s'amplifie dans son ensemble en augmentant l'intensité du swirl, plus particulièrement proche du brûleur où l'effet du swirl est important. Les Figure 4.13 (c), (f), (i) et (l) montrent que, quelle que soit la hauteur de z, la composante azimutale augmente clairement lorsque Sn passe de 0,8 à 1,4.

L'ensemble des Figure 4.13 et Figure 4.14 rassemble respectivement les profils de vitesse moyenne V_r, V_z et V_θ et les profils des fluctuations de vitesse V'_r, V'_z et V'_θ à différentes hauteurs dans l'écoulement (z = 10, 30, 60 et 100 mm).

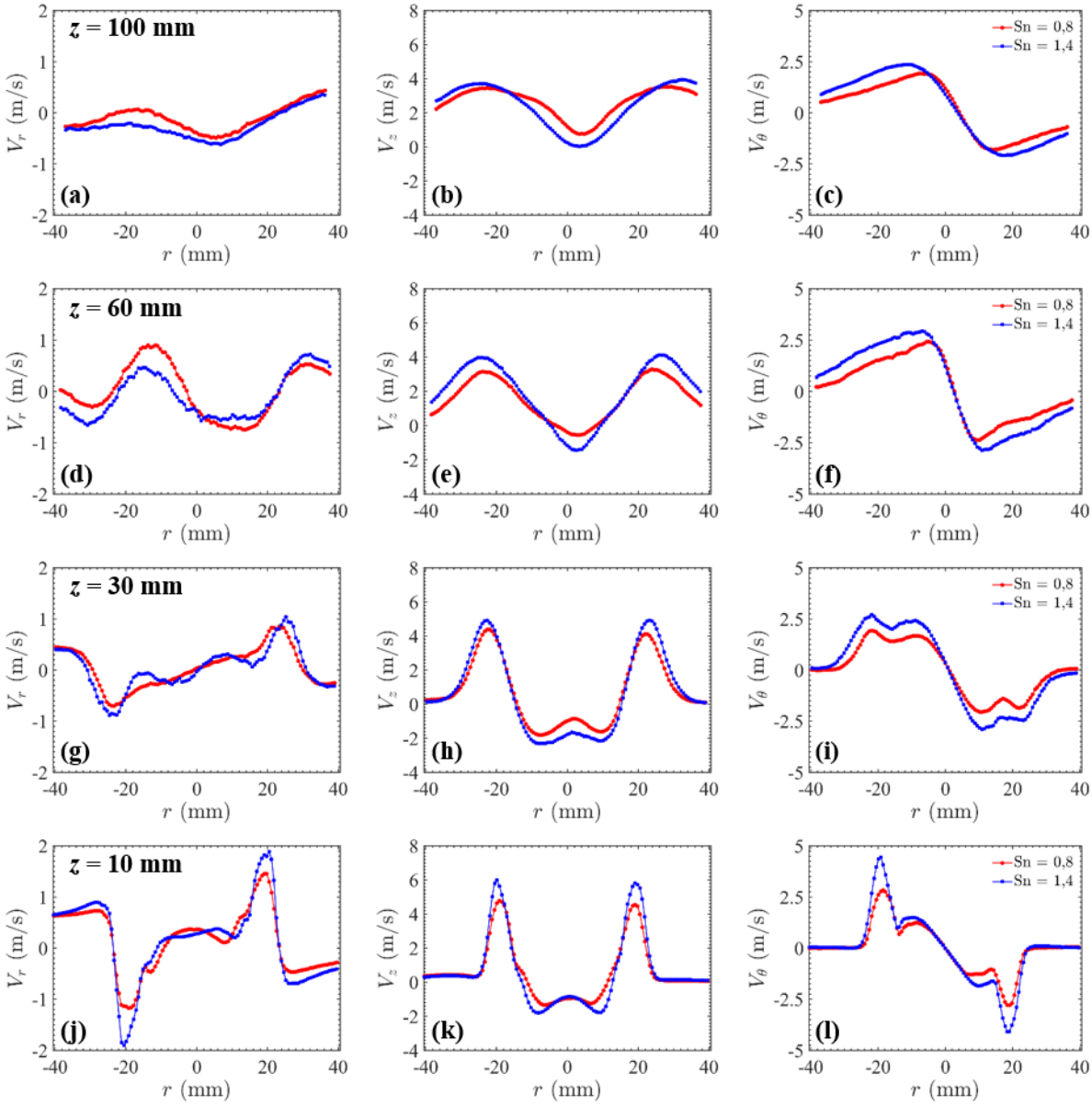


Figure 4.13 : Profils de vitesse moyenne radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ = 0,8, Sn = 0,8 (en rouge) et Sn = 1,4 (en bleu).

Globalement, les Figure 4.14 montrent que l'augmentation de l'intensité de swirl entraîne une augmentation des fluctuations des trois composantes de vitesse, notamment dans les zones du jet swirlé. Cette tendance est particulièrement observée dans la zone proche du brûleur (z = 10 et 30 mm). L'augmentation des fluctuations de vitesse sur l'ensemble du jet témoigne de l'augmentation de la turbulence. Ceci induit une amélioration du mélange des

réactifs pour une combustion non prémélangée et peut permettre sous certaines conditions d'améliorer la stabilité de la flamme, comme évoqué précédemment.

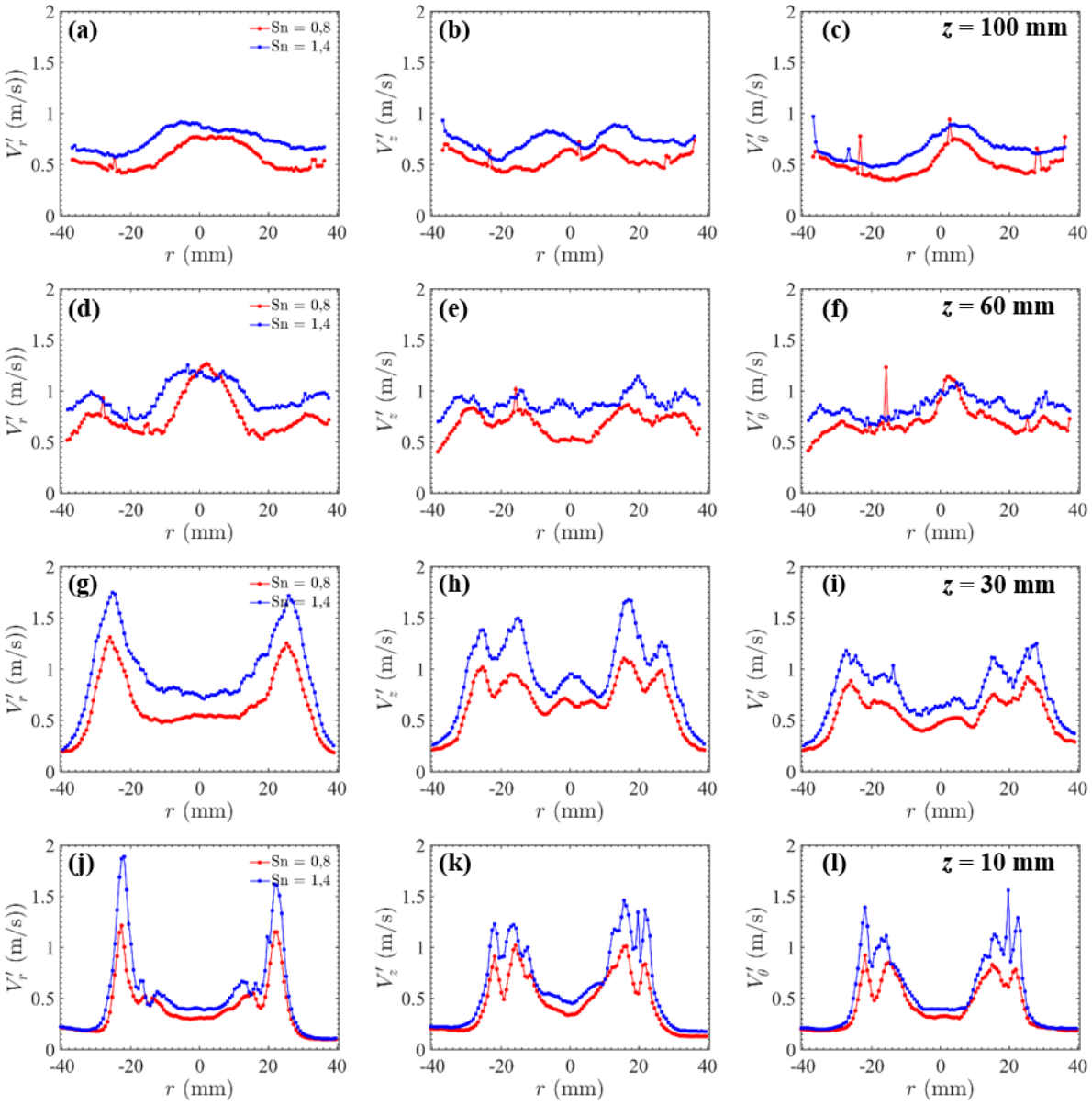


Figure 4.14 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V'_r, longitudinale V'_z et azimutale V'_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, 21% d'O_2 et deux nombres de swirl Sn = 0, 8 (en rouge) et Sn = 1,4 (en bleu).

4.5 Influence de l'enrichissement à l'oxygène sur les champs dynamiques

Nous allons présenter dans cette section l'effet de l'enrichissement à l'oxygène sur les champs moyens (V_r, V_z et V_θ). Nous comparons sur la Figure 4.15 les champs moyens de vitesse en réactif lorsque l'enrichissement à l'oxygène varie de 21 à 30 % d'O_2 dans l'air. Les

mesures ont été effectuées à la stœchiométrie pour cinq teneurs en oxygène 21, 23, 25, 27 et 30 % et un nombre de swirl Sn = 1,4.

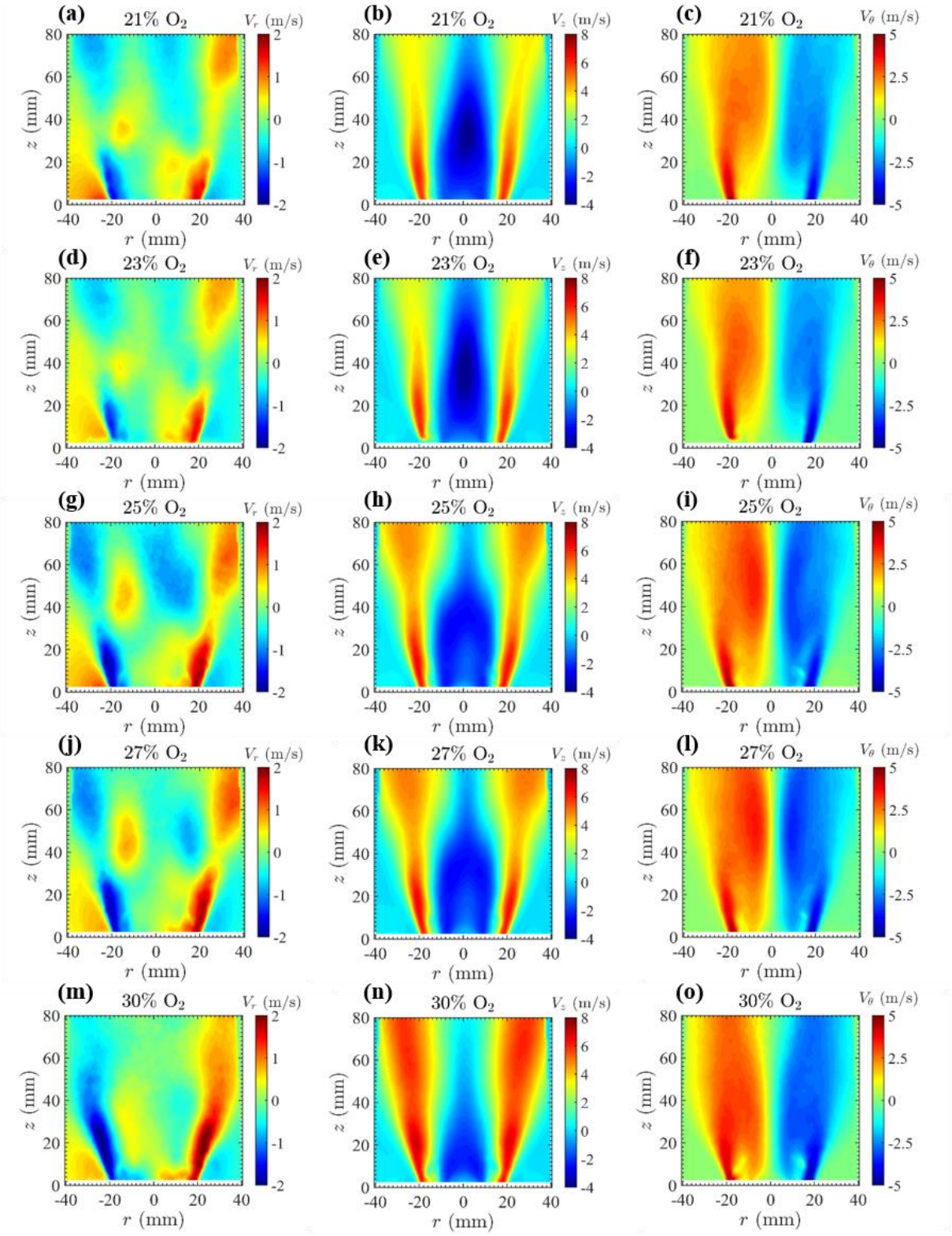


Figure 4.15 : Champs moyens de vitesse radiale V_r, vitesse longitudinale V_z et azimutale V_θ de l'écoulement réactif pour le cas ϕ=1, Sn=1,4 et cinq taux d'enrichissement à l'oxygène : 21 % d'O_2 (a, b, c); 23 % d'O_2 (d, e, f); 25 % d'O_2 (g, h, i); 27 % d'O_2 (j, k, l); 30 % d'O_2 (m, n, o).

Nous avons montré dans le chapitre précédent que l'enrichissement à l'oxygène rapproche le front de flamme de la base du brûleur, ce qui se traduit par une baisse de la hauteur d'accrochage H_{acc}. Nous pouvons repérer cette tendance dans la distribution du champ de la composante radiale de vitesse qui montre le déplacement des zones d'expansion des gaz brûlés vers la base du brûleur lorsque l'enrichissement à l'oxygène augmente. Ceci témoigne de l'effet de l'enrichissement à l'oxygène sur la stabilisation de la flamme. Nous observons également une expansion radiale de la flamme avec l'ajout d'O_2 dans l'air comme le confirment les Figure 4.17 (g) et (j). Cette expansion provient de l'élévation de la température de flamme avec l'enrichissement à l'oxygène.

Pour la composante longitudinale, nous observons un changement de la forme géométrique et la taille de la ZRC lié au rapprochement de la flamme au plan de sortie du brûleur et une augmentation significative de la vitesse du jet swirlé avec l'enrichissement à l'oxygène. Proche de la sortie du brûleur, la Figure 4.17 (k) montre qu'il y a peu d'influence de l'enrichissement à l'oxygène sur les profils de la vitesse longitudinale du jet swirlé. Ceci a également été observé avec la technique LDV comme le montre la Figure 4.16 (a). Notons que les résultats LDV ont été obtenus dans le plan longitudinal perpendiculaire à celui de la SPIV pour un nombre de swirl 0,8 et une richesse globale à l'injection 0,8. Plus en aval de l'écoulement et après la traversée du front de flamme (z = 30 mm), nous observons une augmentation de la vitesse longitudinale du jet swirlé et une diminution de la vitesse longitudinale de recirculation avec l'augmentation de la teneur de l'oxygène dans l'air. La diminution de la taille de la zone de recirculation pourrait contribuer à la formation des NO_X avec l'augmentation du taux d'enrichissement à l'oxygène évoqué dans la section 3.5.2.

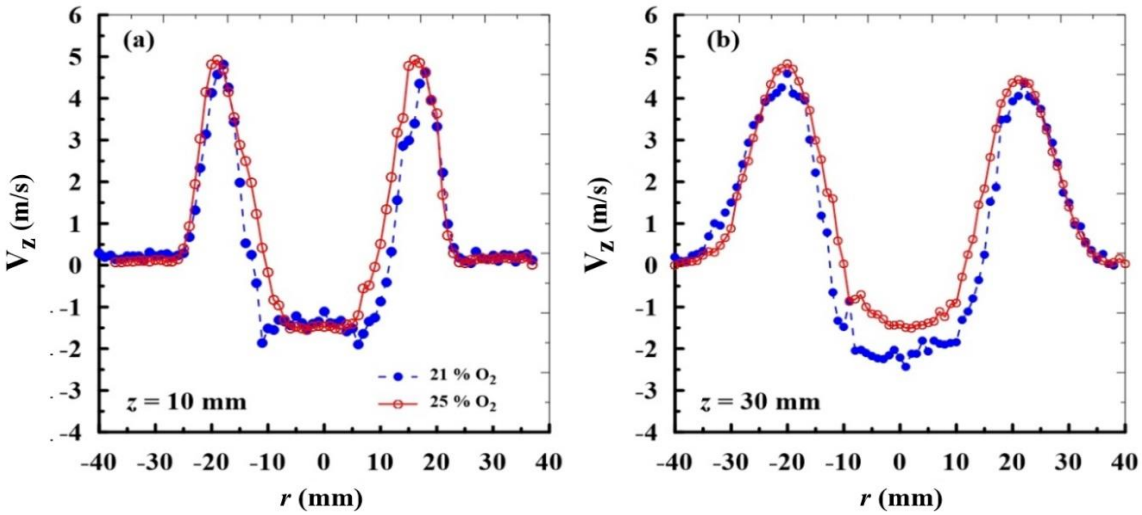


Figure 4.16 : Profils de vitesse longitudinale V_z pour deux taux d'enrichissement 21 et 25 % d'O_2 dans l'air à z = 10 mm (en noir) et z = 30 mm (en bleu) pour ϕ = 0,8 et Sn = 0,8.

En ce qui concerne la composante azimutale, la bifurcation de zones de vitesse azimutale se passe plus en amont dans l'écoulement avec l'enrichissement à l'oxygène à partir de 25% d'O_2. Cette tendance favorise le déplacement de la base de flamme vers le plan de sortie du brûleur. À z = 10 mm, la vitesse azimutale ne semble être affectée que dans la zone centrale de l'écoulement, lorsque r est entre -20 et 20 mm. Plus on augmente le taux d'O_2 dans l'oxydant, plus V_θ augmente. Au-delà de z = 10 mm, la composante azimutale est généralement plus importante lorsque le taux d'O_2 dans l'air augmente.

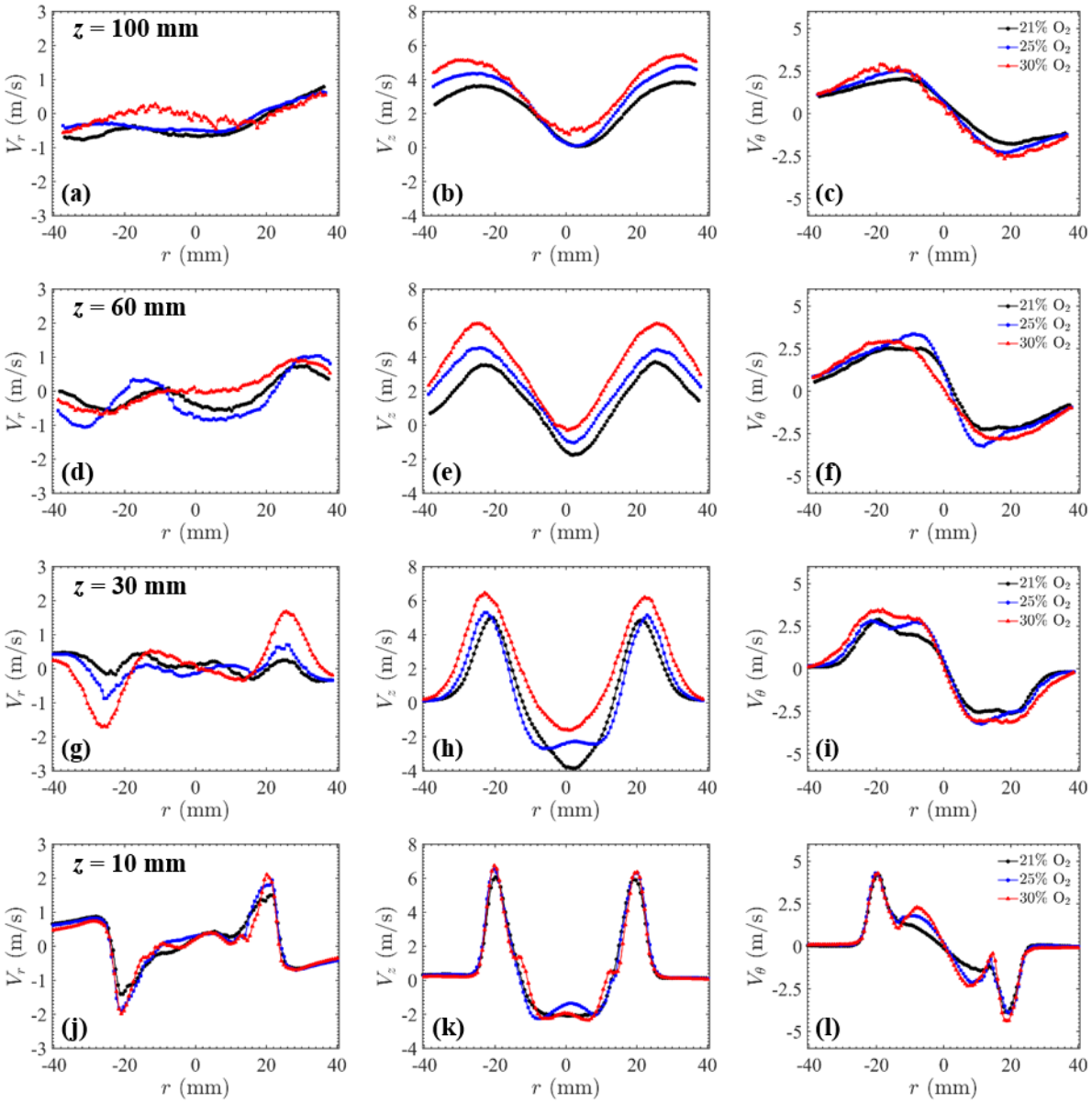


Figure 4.17 : Profils de vitesse radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=1, Sn=1,4 pour trois taux d'enrichissement à l'oxygène dans l'oxydant 21%, 25% et 30% d'O_2.

Les profils des fluctuations des trois composantes de vitesse à différentes hauteurs sont présentés sur la Figure 4.18. Nous observons une augmentation significative des fluctuations au centre du jet lorsque le taux d'enrichissement augmente. Nous pouvons constater qu'à 25% d'O_2 les profils des fluctuations des trois composantes de vitesse restent relativement similaires au cas de la combustion à l'air, tandis qu'à 30% d'O_2, les fluctuations de vitesses augmentent considérablement, plus particulièrement dans la zone centrale de l'écoulement. Les fluctuations de la composante radiale dans la couche du mélange (combustible/oxydant) jouent un rôle important dans l'amélioration de la qualité du mélange et de la combustion. Des pics élevés de fluctuations sont observés pour z = 100 mm à 30 % d'O_2 dans l'air. Ceci correspond probablement aux vecteurs de vitesse qui ont été moins bien identifiés, car proche de la frontière de la nappe laser.

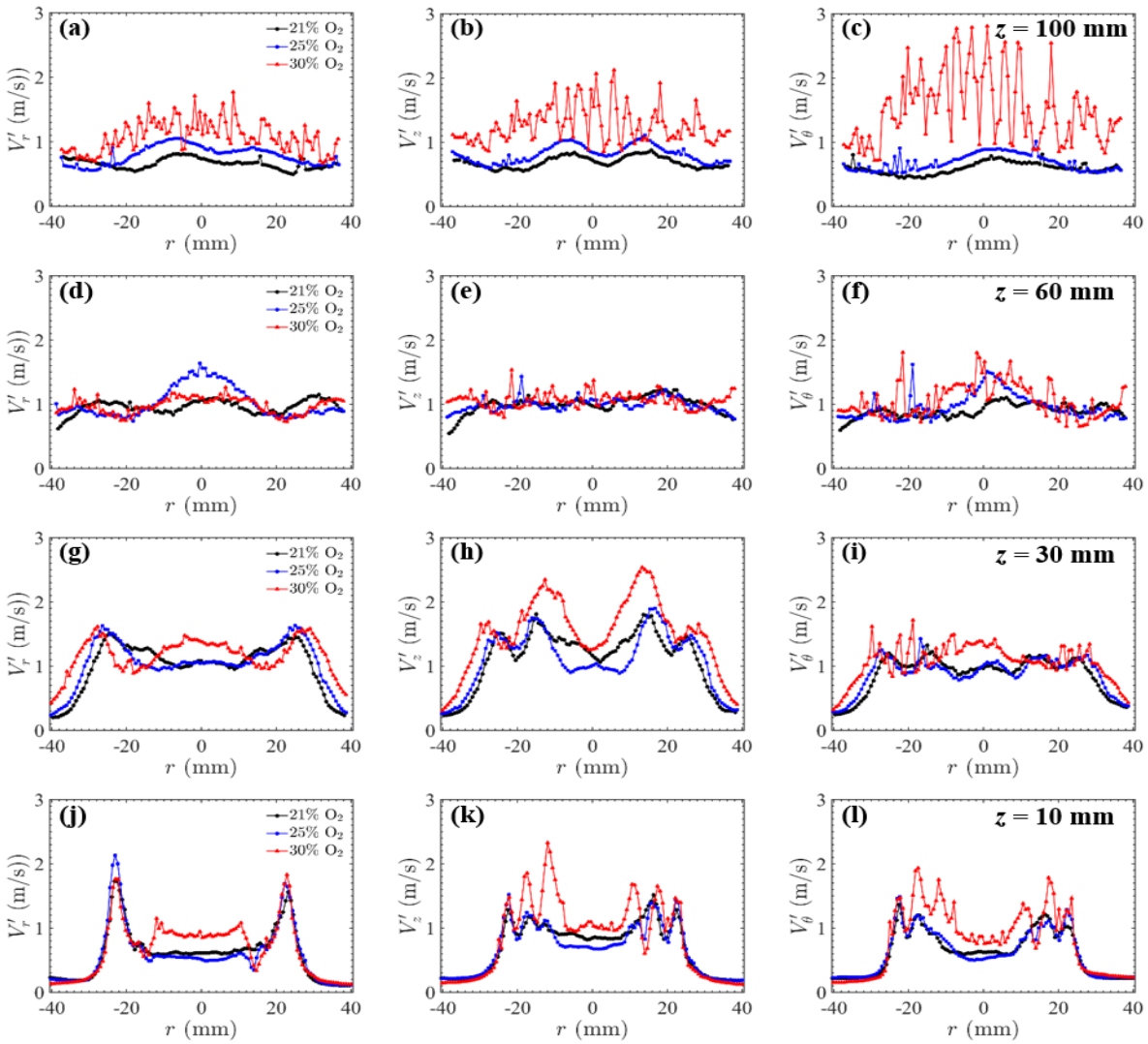


Figure 4.18 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V'_r, longitudinale V'_z et azimutale V'_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=1, Sn=1,4 pour trois taux d'enrichissement à l'oxygène dans l'oxydant 21%, 25% et 30% d'O_2.

4.6 Influence de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur les champs dynamiques

4.6.1 Effet du CO_2 sur les champs dynamiques

Nous souhaitons dans cette section étudier les effets de la dilution en CO_2 sur les champs moyens dynamiques des trois composantes de vitesse. L'ensemble des Figure 4.19 illustre les champs moyens de vitesses pour cinq différents taux de dilution en CO_2 dans l'oxydant 0, 4, 8, 12 et 16%, pour un nombre de swirl Sn = 0,8 et une richesse globale à l'injection ϕ = 0,8.

Comme nous l'avons constaté dans le chapitre précédent, la dilution en CO_2 déstabilise un peu la flamme non enrichie à l'oxygène, ce qui se traduit par une augmentation des fluctuations des hauteurs d'accrochage de la flamme H_{acc} avec l'ajout de CO_2 dans l'oxydant. En ce qui concerne la dynamique de l'écoulement swirlé avec la dilution en CO_2, nous observons une diminution de l'expansion radiale de la flamme comme le confirment les Figure 4.20 (g) et (j). La composante radiale semble diminuer avec la dilution en CO_2 ce qui peut contribuer à limiter la stabilité de la flamme. Avec la dilution en CO_2, il apparaît une légère modification de la composante longitudinale de la vitesse, notamment dans la zone centrale (ZRC). La vitesse longitudinale V_z de recirculation augmente sensiblement lorsque l'on rajoute du CO_2. Lorsque l'on dilue en CO_2, la température de flamme diminue grâce à la capacité calorifique non négligeable du CO_2 à absorber la chaleur, ce qui diminue la pression et accentue le gradient de pression responsable du pilotage de la ZRC. La forme géométrique de la ZRC change également lorsque le taux de dilution augmente comme le montrent les Figure 4.19 (b), (e) et (h). Le CO_2 rajouté vient s'ajouter au CO_2 formé dans les gaz brûlés, entraînés et recirculés, afin de former une zone de recirculation plus longue et plus intense. La ZRC gagne en longueur et perd en largeur avec la dilution en CO_2. Ces tendances sont en bon accord avec la forme géométrique du front de flamme observée par chimiluminescence du radical OH* dans la section 3.4.2. Nous remarquons que le point de stagnation central, défini comme étant le point à z minimal de l'axe r = 0 pour lequel la vitesse longitudinale est nulle, se déplace en amont de l'écoulement lorsque le taux de dilution en CO_2 augmente. Cette évolution témoigne d'une augmentation de la taille de la ZRC qui est une conséquence de l'éloignement de la zone réactionnelle du plan de sortie du brûleur.

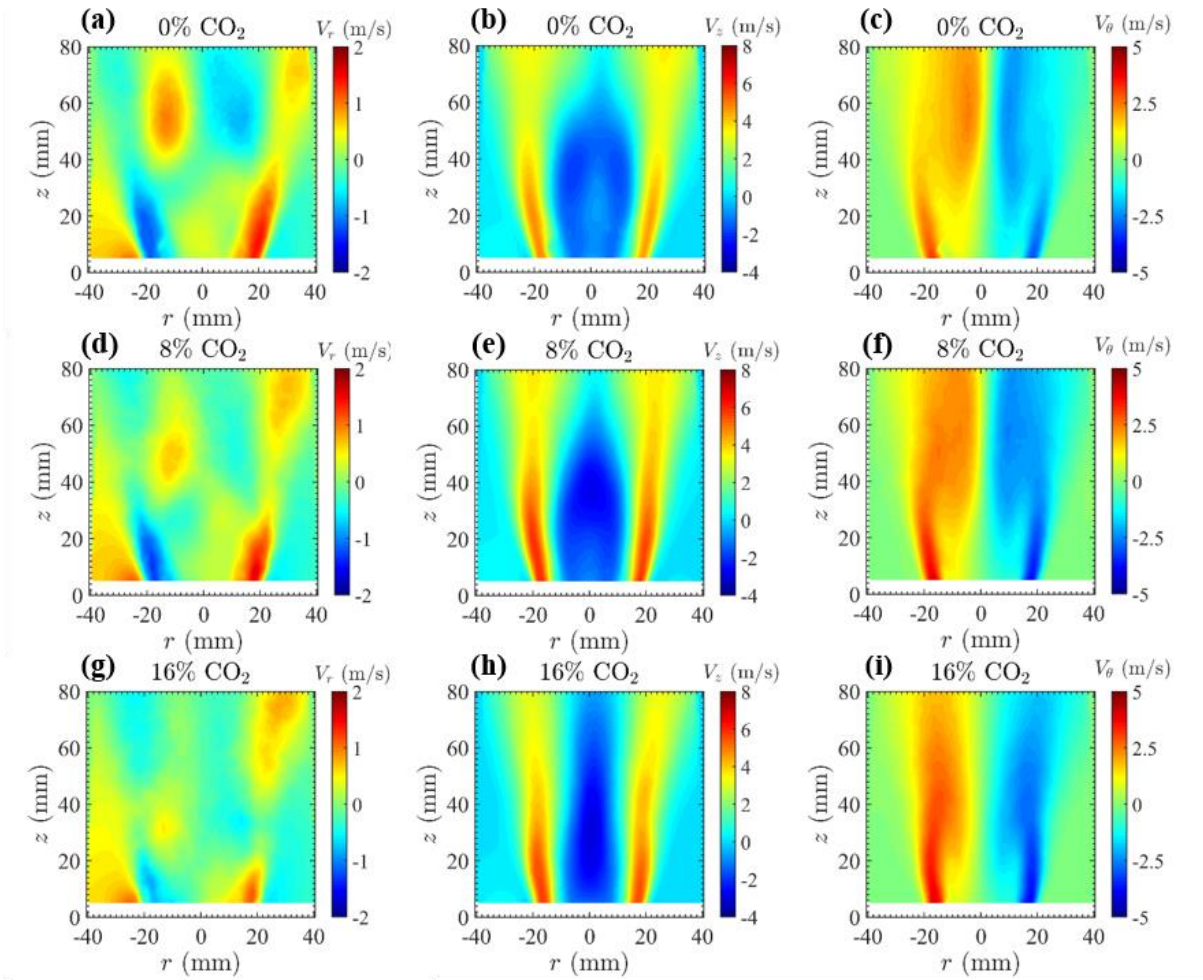


Figure 4.19 : Champs moyens de vitesse (V_r, V_z, V_θ) de l'écoulement réactif pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 à 21% d'O_2 dans l'air et trois teneurs de dilution en CO_2 (0%, 8% et 16%).

Les Figure 4.20 et Figure 4.21 rassemblent respectivement les profils des composantes de vitesse V_r, V_z et V_θ et les profils des fluctuations des V'_r, V'_z et V'_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) dans l'écoulement pour trois taux de dilution en CO_2 0%, 8% et 16% CO_2. Nous observons une augmentation de la vitesse longitudinale du jet swirlé ainsi qu'une élévation des fluctuations correspondantes avec la dilution, notamment dans la zone centrale du jet, comme le montrent respectivement les Figure 4.20 (b), (e), (h) et (k) et les Figure 4.21 (b), (e), (h) et (k). Ces résultats présentent une bonne concordance avec les résultats de chimiluminescence présentés dans la section 3.4.2, qui témoignent d'une augmentation des fluctuations des hauteurs d'accrochage avec la dilution en CO_2. En effet, les fluctuations de vitesse avec la dilution en CO_2, notamment dans la zone centrale du jet, peuvent être liées aux fluctuations des hauteurs d'accrochage de la flamme dans cette zone qui représente la base de la flamme à forts taux de dilution.

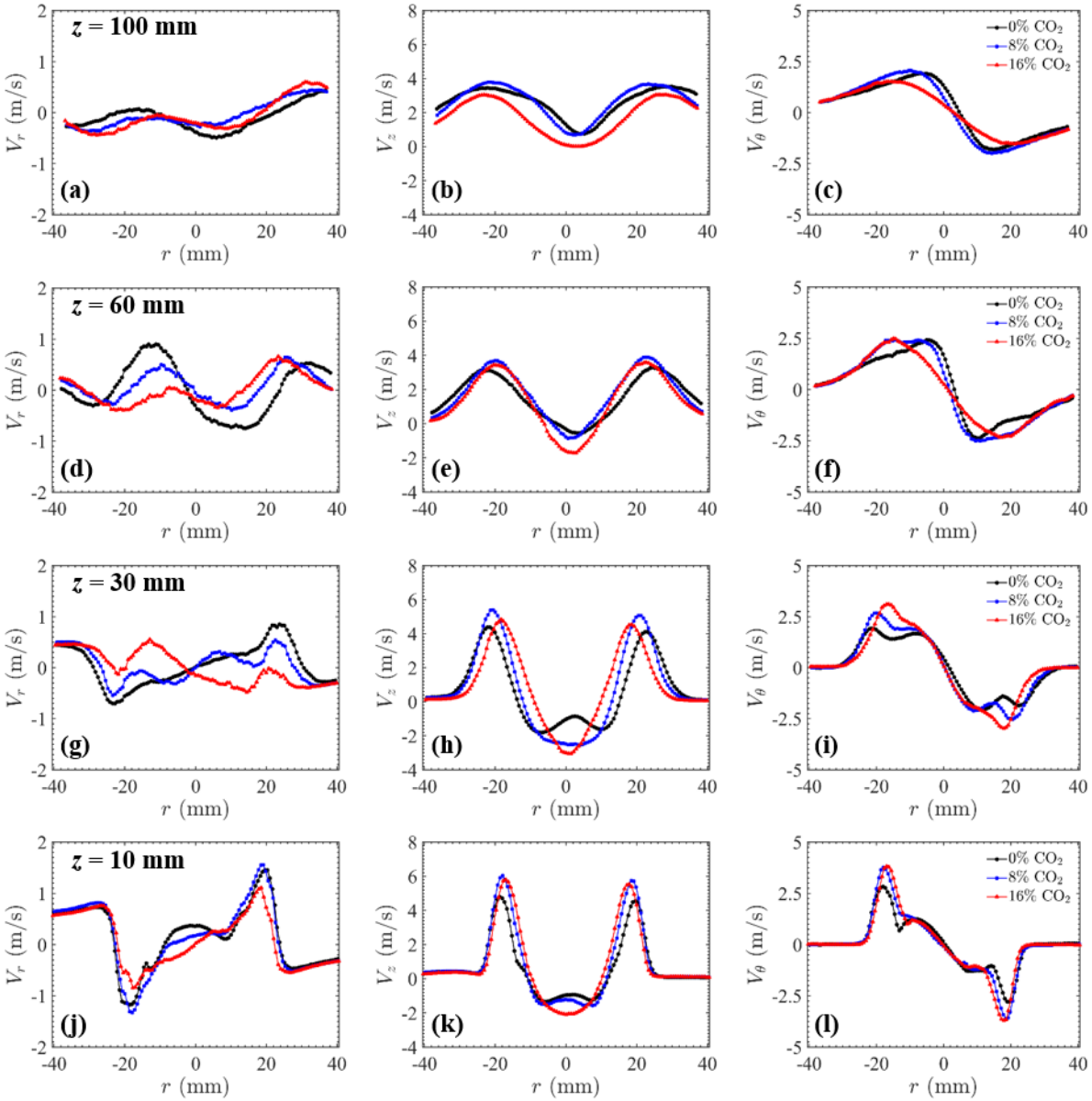


Figure 4.20 : Profils de vitesse radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 et pour trois taux de dilution en CO_2 dans l'oxydant 0%, 8% et 16%.

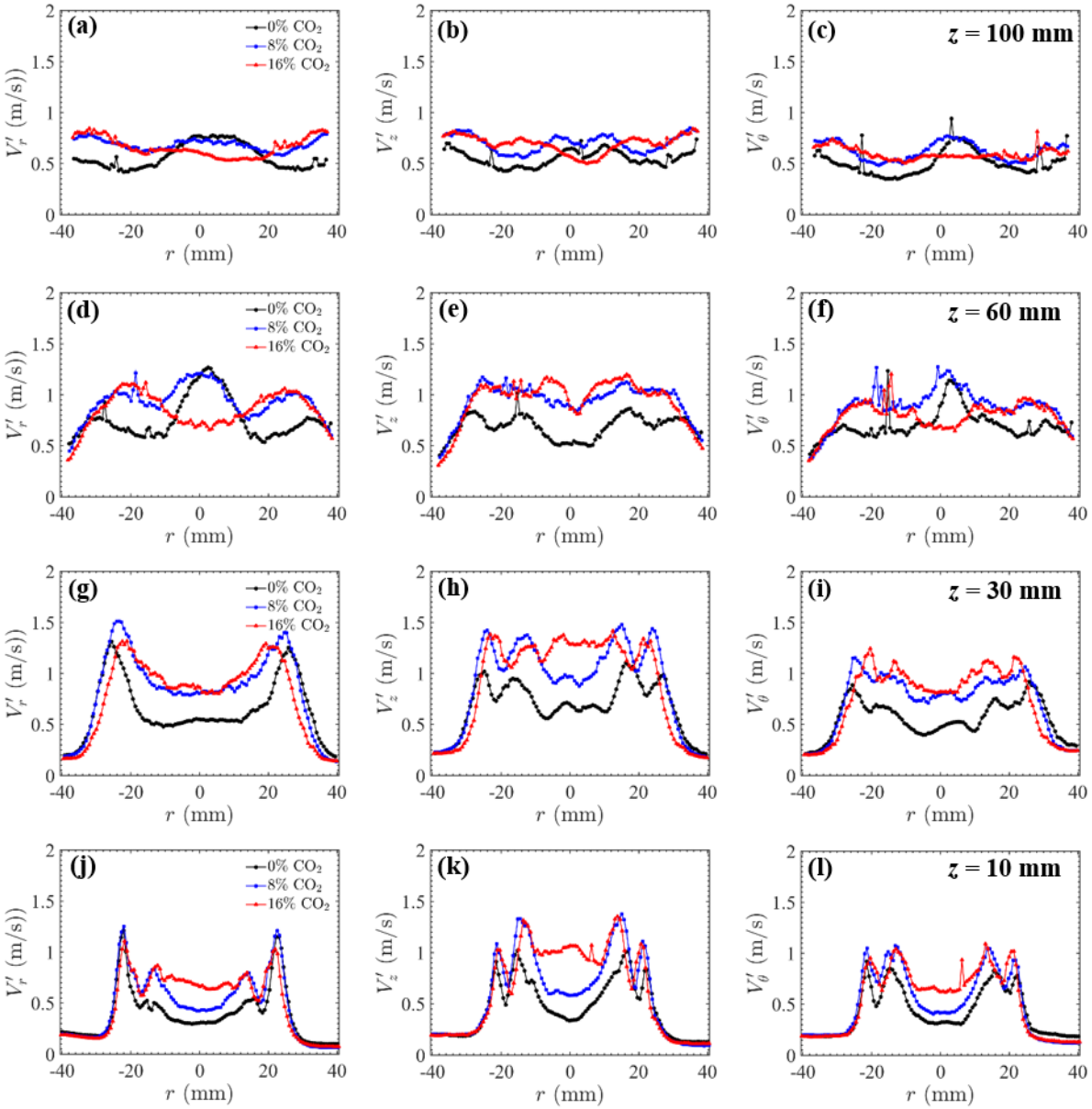


Figure 4.21 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 pour trois taux de dilution en CO_2 dans l'oxydant 0%, 8% et 16 %.

La bifurcation de la composante azimutale semble disparaître pour les taux de dilution en CO_2 élevés comme l'illustre la Figure 4.22. En effet, l'ajout du CO_2 augmente la densité des gaz à la traversée du front de flamme ce qui augmente le gradient de densité et ramène les gaz en rotation vers l'axe central du jet. Avec le rétrécissement de la flamme et l'élévation des vitesses de recirculaion avec la dilution, le nouvel équilibre des forces centrifuges avec le gradient de pression radial conduit à une rotation des gaz brûlés proche de l'axe central du jet entraînant l'amincissement et l'allongement de la ZRC.

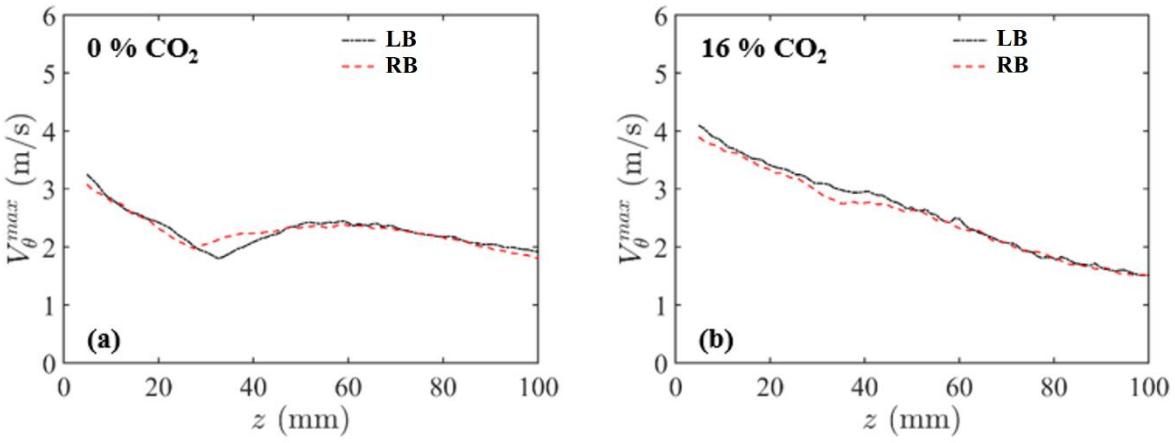


Figure 4.22: Influence de la dilution en CO_2 sur la décroissance axiale de la vitesse moyenne azimutale pour les branches gauche LB et droite RB, pour le cas Sn = 0,8 et ϕ = 0,8 à 21 % O_2 : (a) sans CO_2 ; (b) 16 % CO_2.

4.6.2 Effet de la vapeur d'eau sur les champs dynamiques

L'effet dynamique de la dilution en vapeur d'eau est présenté dans cette section. L'ensemble des Figure 4.23 rassemble les champs moyens des trois composantes de vitesses (V_r, V_z et V_θ) pour trois taux de dilution 0%, 8% et 16% de H_2O dans l'oxydant. Les mesures ont été effectuées pour un nombre de swirl Sn = 0,8 et une richesse globale d'injection ϕ = 0,8.

Dans l'ensemble des champs moyens, la dilution en vapeur d'eau semble très peu affecter la dynamique de la flamme en comparaison avec la dilution au CO_2. Proche de la sortie du brûleur, l'expansion radiale de la flamme ne semble pas être influencée par la dilution en vapeur d'eau, comme le témoigne la Figure 4.24 (j). La vitesse longitudinale du jet swirlé augmente sensiblement avec la dilution contrairement à la vitesse longitudinale de recirculation qui reste identique. Pour la composante azimutale, nous observons une légère augmentation de la vitesse avec la dilution proche du brûleur. Plus en aval dans l'écoulement, la composante radiale tend à diminuer alors que les composantes longitudinales (du jet swirlé et de recirculation) et azimutales augmentent avec la dilution comme le montrent les Figure 4.24 (g), (h) et (i) à z = 30 mm. Les profils de vitesse de la composante longitudinale obtenus avec la technique LDV sont en bon accord avec ces derniers résultats, comme en témoignent les Figure 4.27 (a) et (b).

La dilution en vapeur d'eau entraîne une augmentation significative des fluctuations des trois composantes de vitesse, plus particulièrement, au niveau de la zone annulaire du jet

longitudinal. Nous observons une augmentation des fluctuations de la composante longitudinale de 1 m/s à 1,7 m/s lorsque la dilution en H_2O passe de 0% à 16% à z = 10 mm, soit une élévation d'environ 70 % de V'_z avec la dilution. Concernant la composante azimutale, les fluctuations augmentent de 0,8 m/s à 1,6 m/s lorsque la dilution passe de 0% à 16% d'H_2O à z = 10 mm, soit une augmentation d'environ 100 % avec la dilution.

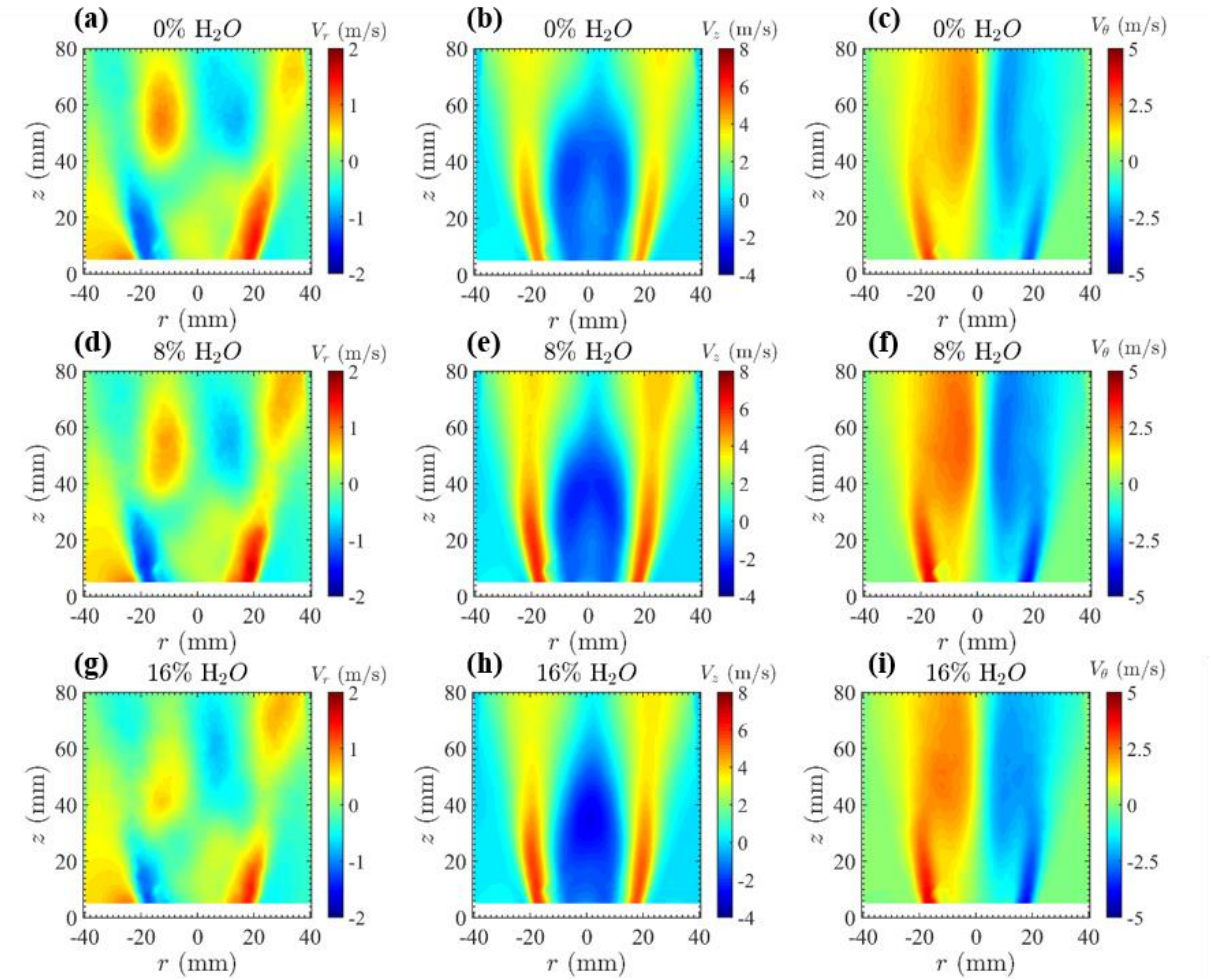


Figure 4.23 : Champs moyens de vitesse (V_r, V_z, V_θ) de l'écoulement réactif pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 à 21% d'O_2 dans l'air et trois teneurs de dilution en vapeur d'eau (0%, 8% et 16%).

L'ensemble des Figure 4.24 et Figure 4.25 rassemble respectivement les profils de vitesse moyenne V_r, V_z et V_θ et les profils des fluctuations de vitesse V'_r, V'_z et V'_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) dans l'écoulement pour trois taux de dilution en H_2O 0%, 8% et 16% dans l'oxydant.

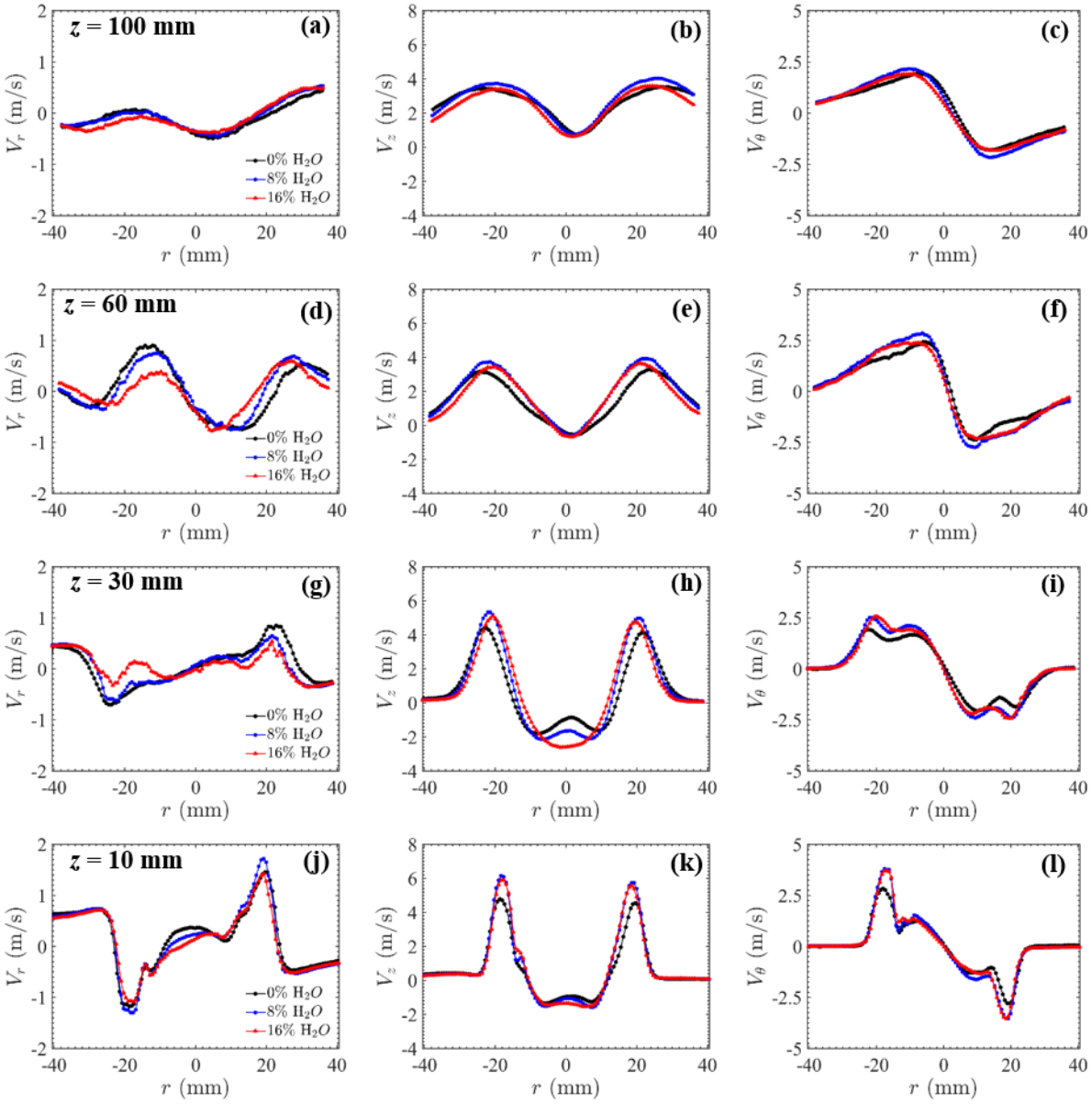


Figure 4.24 : Profils de vitesse moyenne radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 pour trois taux de dilution en H_2O dans l'oxydant : 0% (noir), 8% (bleu)et 16% (rouge).

La légère augmentation des composantes de la vitesse constatée juste en sortie du brûleur, dans le cas de la dilution, résulterait d'un apport massique de gaz en provenance de la *ZRC* qui s'intensifie avec la présence des gaz de dilution injectés. De plus, les gaz recirculés sont encore plus chauds ce qui favorise l'augmentation de la vitesse en sortie du brûleur par une baisse de la densité des gaz avec l'augmentation de la température.

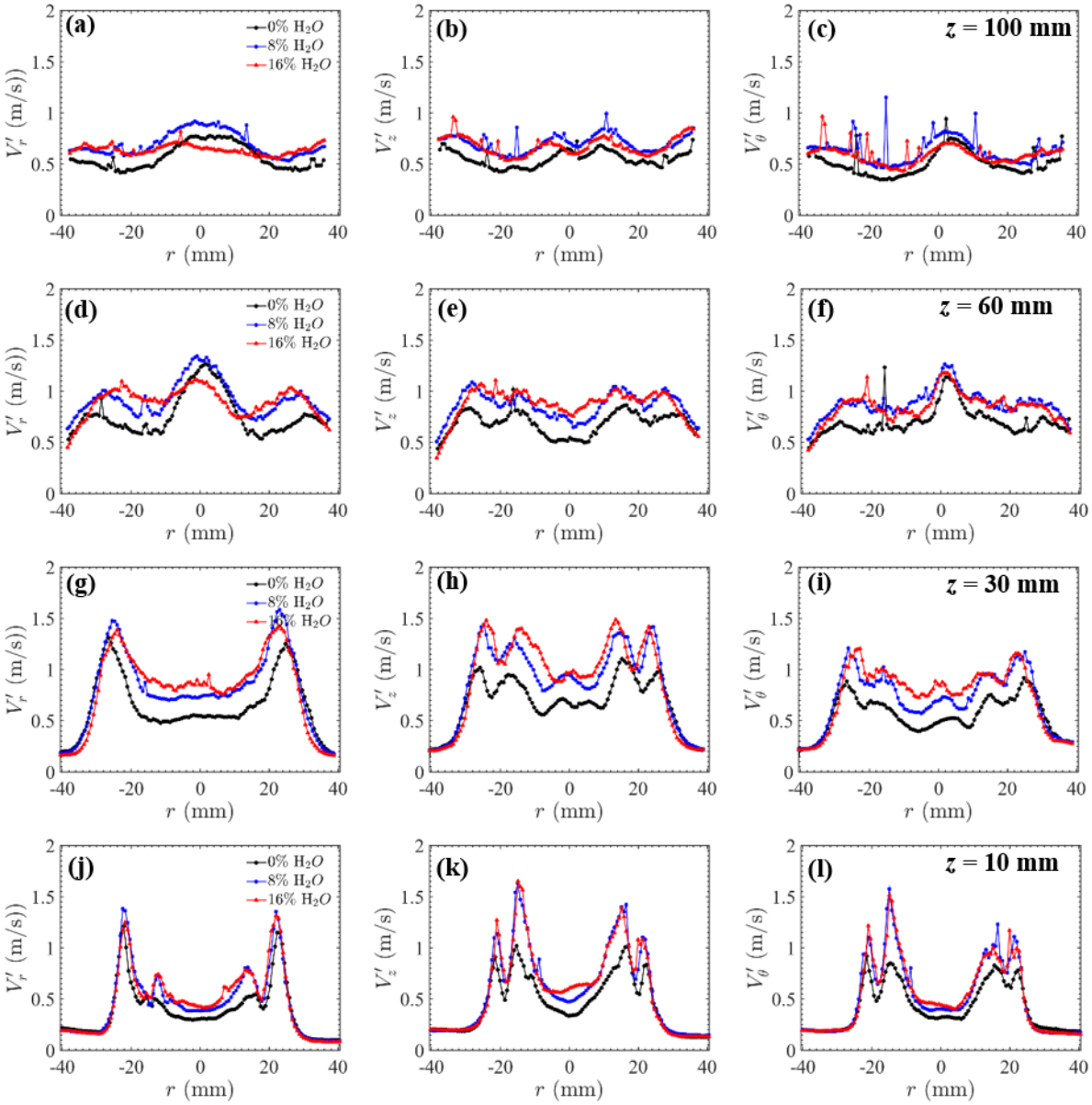


Figure 4.25 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z= 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 pour trois taux de dilution en H_2O dans l'oxydant : 0% (noir), 8% (bleu)et 16% (rouge).

4.6.3 Comparaison des effets de CO_2 et H_2O sur les champs dynamiques

L'ensemble des Figure 4.26 compare les effets de la dilution en CO_2 combinés à ceux de la dilution en vapeur d'eau. Les champs et les profils de vitesse issus de la composition des vitesses longitudinales et radiales (vecteurs noirs) sont illustrés sur les Figure 4.26 (a), (b) et (c), et les champs de la composante azimutale combinés aux lignes de courant à partir du couple (V_r, V_z) sont présentés sur les Figure 4.26 (d), (e) et (f). Les bases de la flamme FB « Flame Base » issues des images moyennes de chimiluminescence du radical OH* avec et

sans dilution sont présentées sur l'ensemble des champs (lignes blanches). Nous rappelons que la dilution avec H_2O et CO_2 induit un lift de la base de la flamme. Avec la dilution, la base de la flamme s'amincit et s'éloigne davantage du brûleur. La forme de la flamme passe d'une forme W sans dilution à une forme V avec la dilution. L'effet du CO_2 est relativement plus important que celui du H_2O. Nous pouvons noter une large différence entre les effets de dilution de CO_2 et les effets de la vapeur d'eau sur les profils de vitesse longitudinale du jet swirlé et de recirculation. L'étude de Wei *et al* [176] compare les effets de CO_2 et H_2O sur le nombre de Lewis, l'épaisseur de la flamme et l'expansion thermique pour une flamme prémélangée méthane/air à pression constante. Ils ont constaté que le nombre de Lewis (*Le*) est légèrement inférieur à l'unité, ce qui peut être attribué au fait que la diffusivité thermique est inférieure à la diffusivité massique. Le nombre de Lewis augmente avec l'augmentation de la fraction volumique de H_2O tandis qu'il diminue avec l'augmentation de la fraction volumique de CO_2. En effet, la diffusivité thermique du CO_2 est inférieure à celle du H_2O dans les mêmes conditions. Ils affirment dans leur étude que l'intensité des instabilités hydrodynamiques est considérablement inhibée par le CO_2 ou/et H_2O en raison d'une augmentation de l'épaisseur de la flamme et d'une diminution du taux d'expansion thermique. Pour l'ensemble des paramètres étudiés, le CO_2 a un effet plus prononcé que la vapeur d'eau. L'ensemble de ces paramètres contribuent éventuellement à la différence observée entre les effets des deux diluants sur la dynamique du jet.

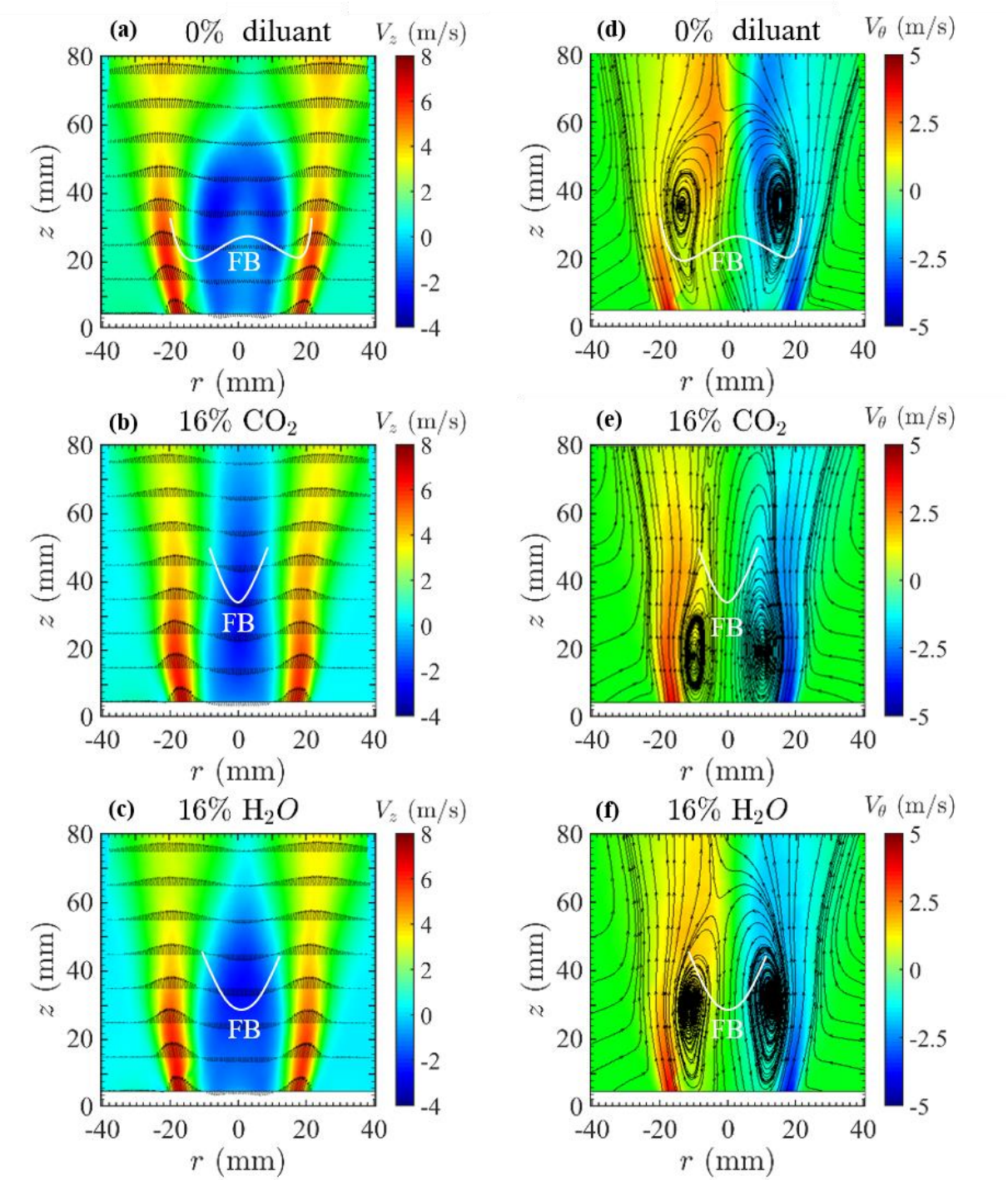


Figure 4.26 : Champs moyens de vitesse longitudinale avec le champ des vecteurs issus de la composition des vitesses radiales et longitudinales (a, b, c) et champs moyens de la composante azimutale avec les lignes de courant issues du couple (V_r, V_z) (d, e, f) pour le cas ϕ = 0,8, Sn = 0,8, 21% d'O_2 et une dilution de 16% en CO_2 et H_2O.

Les lignes de courants illustrent la trajectoire des gaz de recirculation avec et sans dilution. Comme évoqué dans la section 4.6, l'expansion radiale de la flamme est fortement affectée dans le cas de la dilution en CO_2, alors que dans le cas de dilution en vapeur d'eau, la base et la forme de la flamme semblent peu affectées. Ces résultats expliquent la forme de la base du

front de flamme obtenue par chimiluminescence de OH* avec la dilution (voir section 3.4.2), qui serait éventuellement pilotée par la ZRC, les nouveaux rééquilibrages des forces centrifuges et le gradient de densité imposés par la dilution. Nous pouvons repérer le déplacement spatial des tourbillons de la zone de recirculation suivant r et suivant z avec la dilution. En effet, la capacité des diluants à baisser la température de la flamme permettent éventuellement d'augmenter la dépression au sein de l'écoulement, notamment dans la zone de recirculation centrale ZRC d'où l'augmentation de la vitesse de recirculation et l'allongement de la ZRC. Les mêmes tendances ont été observées avec la technique LDV pour un taux de dilution de 10 % en volume pour les deux diluants comme l'illustrent les Figure 4.27 (a) et (b). Cela indique le déplacement en aval des bulles de la ZRC avec l'augmentation de l'intensité du tourbillon, ainsi que l'allongement de cette dernière.

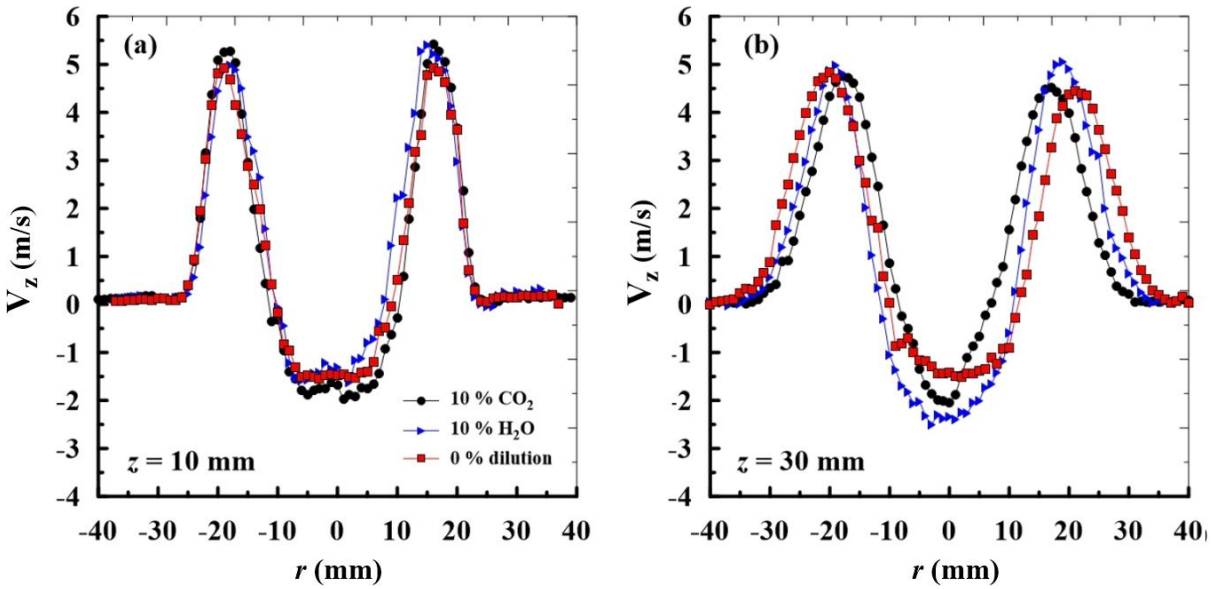


Figure 4.27 : Profils de vitesse longitudinale obtenus avec la technique LDV en fonction de la dilution (0% dilution, 10% de CO_2 vol. et 10% H_2O vol.) pour 21 % d'O_2 dans l'air, ϕ= 0,8 et Sn = 0,8 : (a) z = 10 mm et (b) z = 30 mm.

4.7 Influence de la dilution en EGR sur les champs dynamiques

Nous allons finir ce chapitre par l'observation de l'effet des gaz de combustion EGR (10 % CO_2 + 10 % H_2O) sur les champs moyens de vitesse, plus particulièrement, la composante longitudinale V_z et azimutale V_θ, pour une combustion à l'air (21% d'O_2) à une richesse globale à l'injection de 0,8 et un nombre de swirl de 1,4. Nous comparons dans la Figure 4.28 les champs moyens dynamiques de l'écoulement réactif avec et sans dilution en EGR. Les Figure 4.28 (a) et (c) superposent les lignes de courant établies à partir des vitesses radiales et

longitudinales au champ moyen de la composante longitudinale V_z et les Figure 4.28 (b) et (c) superposent la composante azimutale de vitesse (vecteurs noirs) au champ moyen de la composante azimutale V_θ. Une barre orientée vers le haut désigne une composante azimutale positive tandis qu'une barre orientée vers le bas indique une composante azimutale négative. La longueur des vecteurs est proportionnelle à la composante azimutale.

Pour l'ensemble des figures, nous constatons une légère diminution de l'expansion radiale de la flamme avec la dilution en EGR, notamment proche de la zone réactionnelle comme le confirme la Figure 4.29 (g). Dans la zone proche du brûleur, la composante radiale est très peu modifiée par la dilution, alors que nous observons une augmentation significative des composantes longitudinales et azimutales avec l'ajout des EGR. En s'approchant de la zone réactionnelle, à z = 30 mm, le profil de la composante longitudinale passe d'une forme W à une forme V avec la dilution en EGR. Ce changement de forme témoigne du rétrécissement de la ZRC observé dans le cas de la dilution. Comme pour la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau, la dilution intensifie la recirculation des gaz frais vers la base du brûleur et vers l'axe du jet et augmente significativement la vitesse longitudinale de recirculation comme le montre la Figure 4.29 (h). En ce qui concerne la composante azimutale, nous remarquons que la dilution tend à atténuer la bifurcation et la bimodalité de la distribution radiale de la composante V_θ en déplaçant légèrement le swirl vers l'axe de l'écoulement comme le confirment les Figure 4.29 (i) et (l).

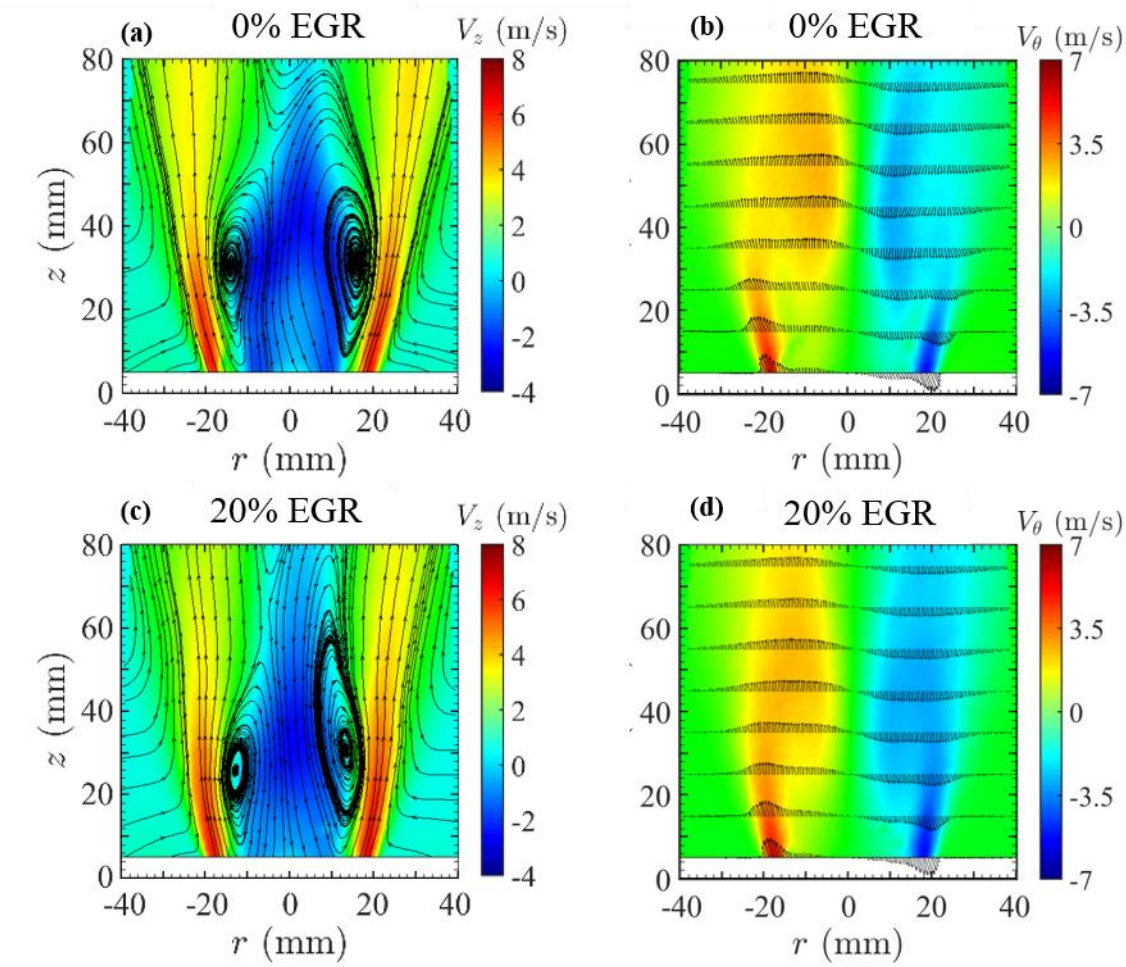


Figure 4.28 : Influence de la dilution en EGR sur les lignes de courant à partir du couple (V_r, V_z) avec les champs moyens de vitesse longitudinale V_z : (a) sans dilution ; (c) 20% EGR et sur les profils de vitesse issus de la composition des vitesses radiales et azimutales avec les champs moyens de vitesse azimutale V_θ : (b) sans dilution ; (d) 20% EGR pour ϕ = 0,8, Sn = 1,4 et 21% d'O_2 dans l'air.

Les profils de vitesses V_r, V_z et V_θ et les profils des fluctuations de vitesse V'_r, V'_z et V'_θ à différentes hauteurs dans l'écoulement avec et sans dilution en EGR sont respectivement rassemblés sur les Figure 4.29 et Figure 4.30. Comme il a été observé pour les effets séparés des deux diluants, la dilution en EGR augmente également les fluctuations de vitesse d'une manière homogène sur l'ensemble de l'écoulement (jet swirlé + ZRC). En effet, l'ajout des deux diluants ensemble constitue un bon compromis entre l'augmentation des fluctuations dans la zone centrale du jet observée dans le cas de dilution en CO_2 et l'augmentation des fluctuations dans le jet annuaire swirlé observée dans le cas de dilution en vapeur d'eau.

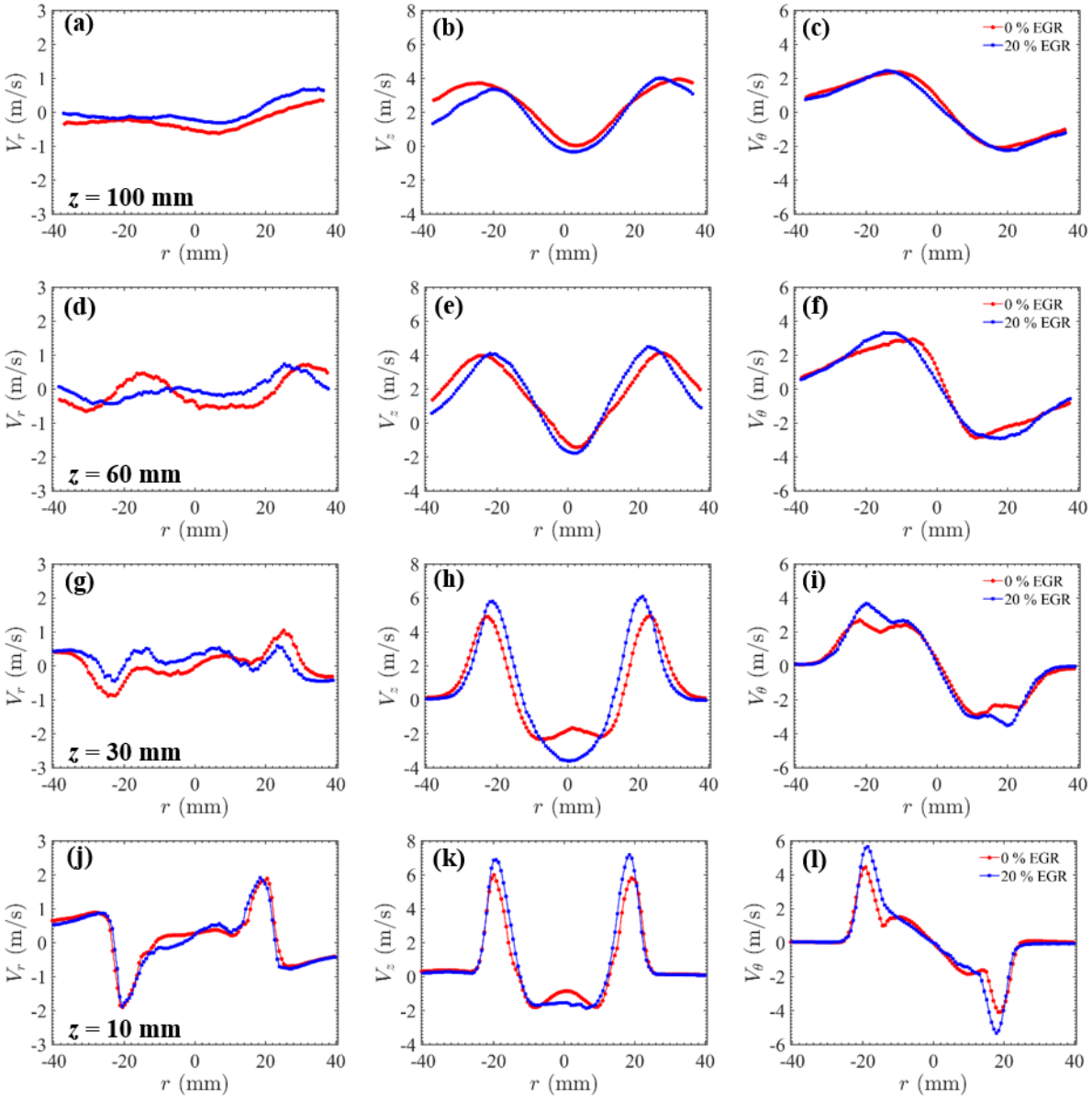


Figure 4.29 : Profils de vitesse radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour une combustion à l'air, ϕ = 0,8 et Sn = 1,4, sans (courbes rouges) et avec 20 % d'EGR (10% CO_2 + 10% H_2O) (courbes bleues).

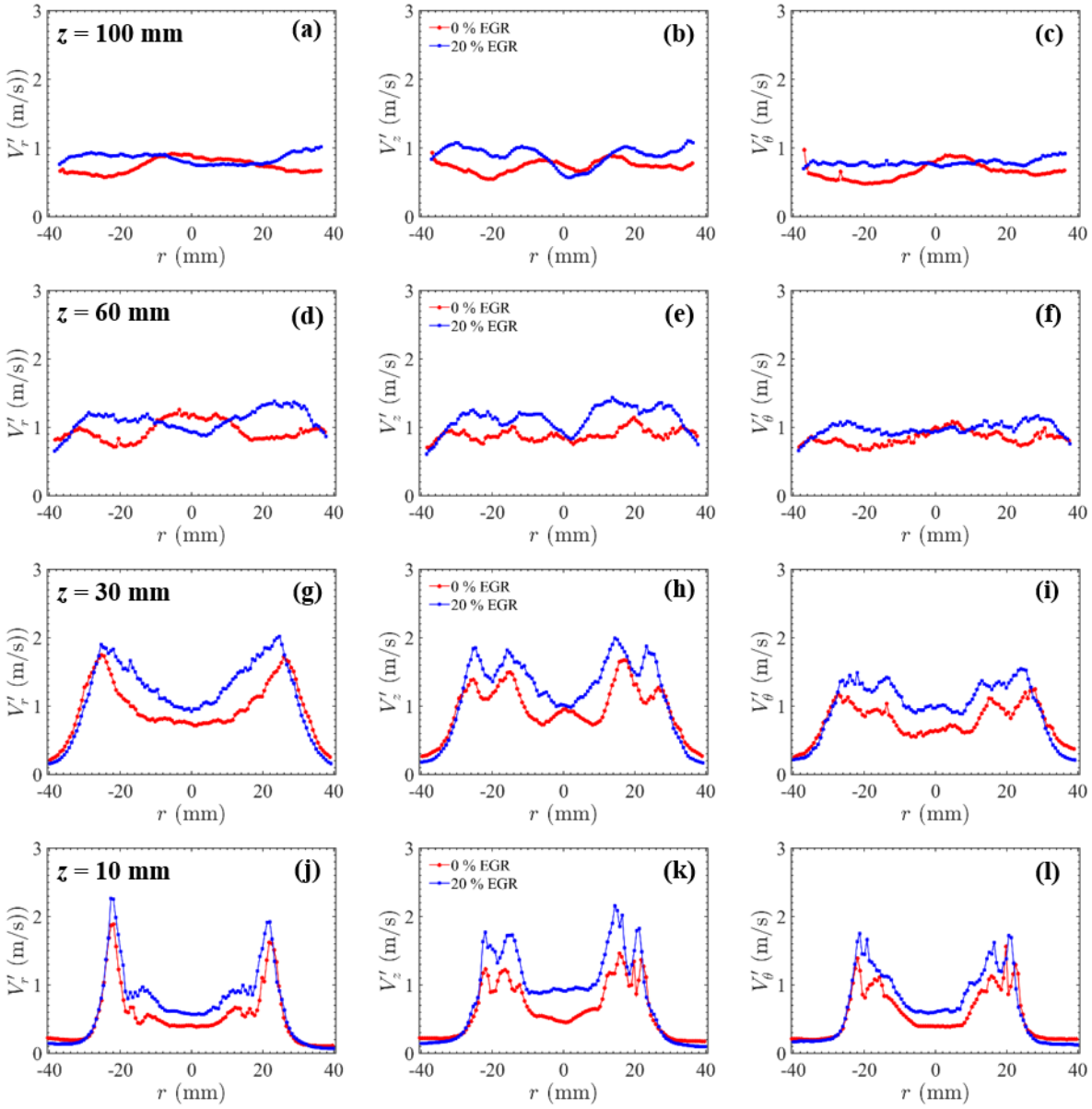


Figure 4.30 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V'_r, longitudinale V'_z et azimutale V'_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour une combustion à l'air, ϕ = 0,8 et Sn = 1,4, sans (courbes rouges) et avec 20 % d'EGR (10% CO_2 + 10% H_2O) (courbes bleues).

4.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des mesures Stéréo-PIV et LDV-2D dans le but d'étudier la dynamique de la flamme swirlée, enrichie en dioxygène et diluée en gaz de combustion et d'apporter des éléments de réponse aux tendances et aux évolutions observées dans le chapitre précédent. Une comparaison systématique des champs moyens de vitesse, des profils de vitesse à différentes hauteurs, accompagnés des profils de leurs

fluctuations a été effectuée en fonction des différents paramètres de l'étude. Les principales conclusions sont regroupées comme suit :

- La présence de la flamme dans un écoulement swirlé a une forte influence sur la dynamique du jet, notamment sur la ZRC. En effet, cette dernière ramène les gaz chauds vers les gaz frais, ce qui se traduit par une hausse de température à la sortie du brûleur induisant une augmentation des vitesses, une ouverture du jet et une expansion volumique de l'ensemble de l'écoulement y compris de la ZRC. Une bifurcation de la composante azimutale a été observée en écoulement réactif, celle-ci correspondrait à la traversée du front de flamme et du gradient de température qu'il produit.
- La vitesse longitudinale de recirculation augmente sensiblement avec la richesse globale à l'injection. Notons que lorsque ϕ est égale à 1, la flamme est stabilisée plus en aval dans l'écoulement. Par conséquent, le mélange est davantage dilué avant la zone réactionnelle par les gaz brûlés suite à l'entraînement de ces derniers par le biais de la recirculation externe lorsque la flamme est déstabilisée. En effet, les structures turbulentes formées entraînent le gaz environnant vers l'intérieur du jet et permettent l'expansion du jet par diffusion.
- Comme on pouvait s'y attendre, l'augmentation de l'intensité du swirl favorise considérablement la stabilisation de l'écoulement swirlé, ce qui se traduit par une élévation des trois composantes de vitesse et une expansion radiale plus importante du jet.
- Le rapprochement de la flamme à la base du brûleur observée par chimiluminescence du radical OH* lorsque le taux d'enrichissement passe 21% à 30% d'O_2 dans l'air modifie la dynamique de l'écoulement, notamment le champ moyen de vitesse. Le déplacement du point de stagnation central vers la base du brûleur témoigne d'une diminution notable de la ZRC avec l'enrichissement à l'oxygène. Lorsque la teneur en O_2 de l'oxydant augmente, la température de la flamme augmente ce qui induit une expansion radiale plus importante. Il est observé une augmentation de la vitesse longitudinale du jet swirlé et une diminution de la vitesse longitudinale de recirculation avec l'augmentation de la teneur de l'oxygène dans l'air. La bifurcation de zones de vitesse azimutales se passe plus en amont dans l'écoulement avec l'enrichissement à l'oxygène.

- Le déplacement de la base de la flamme plus en aval de l'écoulement avec la dilution en CO_2 induit une modification du champ moyen de vitesse, notamment au niveau de la zone de recirculation centrale. Il est observé une diminution de l'expansion radiale de la flamme et un amincissement et un allongement de la zone de recirculation centrale lorsque le taux de dilution passe de 0 % à 16 % de CO_2 dans l'oxydant. La suppression de la bifurcation de la composante azimutale a été observée pour le cas de 16% de CO_2. En effet, la capacité calorifique non négligeable du CO_2 à absorber la chaleur diminue la température de flamme, et modifie la densité des gaz, ce qui diminue la pression lorsque z diminue et accentue la dépression du jet responsable du pilotage de la ZRC, et permet d'éloigner les gaz en rotation de l'axe de l'écoulement. L'entraînement des gaz environnants du jet swirlé par recirculation externe peut également contribuer au refroidissement de la flamme d'où la réduction des émissions de NO_X dans les fumées. Des fluctuations de vitesse sont avérées plus importante dans la zone centrale de l'écoulement avec la dilution en CO_2.
- La vapeur d'eau a un effet moins prononcé que celui du CO_2 sur l'amincissement de la flamme et de la ZRC, comme le témoignent les champs moyens de la composante longitudinale. La composante radiale est très peu affectée, tandis que les composantes longitudinales et azimutales augmentent avec l'ajout de la vapeur d'eau, plus particulièrement dans la zone proche du brûleur. Contrairement à la dilution en CO_2, les fluctuations de vitesse semblent s'accentuer dans la zone du jet annulaire swirlé.
- Il est observé que la diution en EGR constitue un bon compromis entre les effets du CO_2 et H_2O sur les champs moyens de vitesse, en modifiant très peu la dynamique de l'écoulement. En effet, une légère augmentation des trois composantes de vitesse et une distribution homogène des fluctuations de vitesse sur l'ensemble de l'écoulement ont été constatées, ce qui peut éventuellement améliorer la qualité du mélange dans le cas de la dilution.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de thèse s'est déroulé au sein du laboratoire ICARE à l'aide d'un soutien financier du Labex CAPRYSSES (Cinétique chimique et Aérothermodynamique pour des Propulsions et des Systèmes Energétiques Propres et Sûrs) et un soutien matériel du laboratoire CORIA, notamment sur les mesures de vitesses Stéréo-PIV. Cette étude visait à améliorer la compréhension des phénomènes mis en jeu dans les flammes non prémélangées turbulentes swirlées méthane/air enrichies à l'oxygène et diluées en CO_2 et en vapeur d'eau.

L'objectif principal de cette étude était de caractériser expérimentalement les effets des produits de combustion EGR (« Exhaust Gas Recirculation » en anglais) et d'autres paramètres tels que la richesse globale à l'injection, l'intensité du swirl, la teneur d'oxygène dans l'air sur la structure et la stabilité de la flamme, l'évolution des émissions polluantes (NO_X et CO) et le comportement dynamique de l'écoulement swirlé.

Du fait de la pluralité et la complexité des phénomènes mis en jeu dans un écoulement swirlé, il a été nécessaire d'effectuer une étude bibliographique approfondie dans le but de saisir les aspects essentiels de la phénoménologie des flammes swirlées enrichies à l'oxygène et diluées en gaz de combustion. Cette étude nous a permis également de souligner la faible quantité d'études menées sur les effets de la dilution en EGR, notamment la dilution en vapeur d'eau, dans ce type d'écoulement complexe. L'intérêt de ce travail réside dans le fait d'enrichir cette base de données, plus particulièrement sur les aspects dynamiques, permettant également de constituer une base solide de comparaison avec des modélisations numériques de type RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) ou LES (Large Eddy Simulations) dans les études futures.

Afin de mener à bien cette étude, nous avons utilisé la chambre de combustion dédiée à l'étude des flammes turbulentes à pression atmosphérique, développée auparavant au laboratoire ICARE durant la thèse de N.Merlo [97]. Grâce à la configuration facile d'accès du brûleur coaxial à swirler, nous avons pu étudier plusieurs intensités de swirl. Dans le but de simuler la recirculation des gaz brûlés (EGR), nous avons mis en place un générateur de vapeur d'eau (CEM) et des systèmes de chauffage adaptés (colliers et fils chauffants) afin de maintenir les différents éléments de l'alimentation en gaz (brûleur, mélangeur, ensemenceur et lignes de gaz) à une température élevée. La difficulté d'un tel système réside dans le fait

que l'on doit ajuster la température de chaque élément chauffant afin d'éviter la condensation de la vapeur d'eau et également la formation d'agglomérats dans le cas de l'ensemencement.

Après avoir déterminé les conditions opératoires grâce aux diagrammes de stabilité de la flamme, cela nous est apparu essentiel d'effectuer une étude numérique à l'aide du logiciel COSILAB en utilisant le mécanisme réactionnel GRI-Mech 3.0. Cette étude a comme but d'évaluer principalement les effets de la dilution en gaz de combustion sur les caractéristiques intrinsèques d'une flamme méthane/air enrichie à l'oxygène, telles que la température de flamme à l'équilibre thermodynamique et la vitesse de flamme laminaire. Nous avons noté une importante baisse de température et de vitesse de flamme laminaire avec la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau. L'effet du CO_2 s'est avéré plus prononcé que celui de la vapeur d'eau.

La caractérisation de la stabilité de la flamme par chimiluminescence du radical OH* en fonction des différents paramètres globaux, a été réalisée par des mesures des hauteurs d'accrochage, des longueurs et des hauteurs de flammes. Nous avons observé une diminution significative de la hauteur d'accrochage de la flamme avec l'augmentation de l'intensité du swirl et l'enrichissement à l'oxygène, ce qui permet d'améliorer sa stabilité. La dilution en CO_2 et/ou H_2O, quant à elle, engendre une augmentation de la hauteur d'accrochage et de la longueur de la flamme, ce qui témoigne de l'effet déstabilisant de la dilution. L'enrichissement de l'oxydant à l'oxygène, dans le cas de la dilution, permet de compenser cette instabilité et rapproche la flamme de la base du brûleur. L'utilisation de plasma de type arc glissant, testé pour quelques cas de flamme, a montré des bénéfices en termes de stabilisation de flamme dans le cas des flammes décrochées. En effet, étant une source de production d'espèces réactives, le plasma généré permet de réduire ou d'empêcher la création de points d'extinction de la flamme.

Les teneurs en NO_X et en CO dans les fumées sèches ont été caractérisées par des analyseurs multi-gaz en ligne. Il a été observé une diminution significative des émissions de CO avec l'enrichissement à l'oxygène et une augmentation des émissions de NO_X, principalement par voie thermique, suite à l'augmentation de température des fumées observée avec l'ajout de l'oxygène. La dilution en gaz de combustion induit une baisse significative de la formation des oxydes d'azote, tandis que les émissions de CO augmentent. L'ajout des EGR jusqu'à 20% induit à une forte diminution des NO_X quelles que soient les proportions des diluants. Nous avons réussi par exemple, à réduire à 1 ppm les émissions de NO_X avec une dilution de 20% de CO_2 même pour une flamme enrichie à 25% d'oxygène

dans l'air. Une augmentation des teneurs du CO est observée. Il a été constaté que l'ajout des diluants (CO_2 + H_2O) avec des proportions volumiques égales des diluants dans le mélange EGR reste le meilleur compromis dans ce type de dilution.

Afin de compléter et de mieux comprendre les évolutions des hauteurs d'accrochage et des émissions polluantes, une caractérisation dynamique des flammes swirlées en fonction des différents paramètres opératoires de l'étude a été effectuée. Deux techniques de mesure ont été utilisées durant cette étude : la technique de la LDV et la technique stéréo-PIV. Nous avons exploré, dans un premier temps, le comportement de l'écoulement en réactif et en non réactif. Nous avons comparé systématiquement les champs dynamiques moyens, les profils de vitesses et les fluctuations de vitesses correspondantes en fonction des paramètres globaux pour l'ensemble de l'étude. Il a été observé que la présence de la flamme dans un écoulement swirlé a une forte influence sur la dynamique du jet, notamment sur la ZRC (Zone de Recirculation Centrale). En effet, une augmentation des vitesses, une ouverture du jet et une expansion volumique de l'ensemble de l'écoulement ont été constatées. Il a été observé également une bifurcation de la composante azimutale en écoulement réactif, celle-ci correspondrait à la traversée du front de flamme engendrant un gradient de température. Notons que l'augmentation de l'intensité du swirl favorise considérablement la stabilisation de l'écoulement swirlé. En ce qui concerne la richesse globale à l'injection, nous avons constaté une augmentation de la vitesse longitudinale et un amincissement de la ZRC lorsque la richesse globale à l'injection passe de 0,8 à 1. Une expansion radiale plus importante a été observée avec l'augmentation du taux d'enrichissement à l'oxygène entraînant une stabilisation de la flamme proche du brûleur. Dans le cas de la dilution, pour le CO_2 comme pour la vapeur d'eau, le déplacement de la base de la flamme plus en aval dans l'écoulement avec la dilution en CO_2 induit une modification du champ moyen de vitesse, notamment la ZRC. En effet, Il a été observé une diminution de l'expansion radiale de la flamme et un amincissement et un allongement de la zone de recirculation centrale lorsque le taux de dilution passe de 0% à 16% pour les deux diluants. Notons que l'effet de CO_2 est plus prononcé que celui de la vapeur d'eau. En revanche, la dilution en EGR constitue un bon compromis entre les effets du CO_2 et H_2O sur les champs moyens de vitesse, en modifiant très peu la dynamique de l'écoulement. En plus de la dépression générée par la dilution dans le centre de l'écoulement et la ZRC, l'entraînement des gaz environnants dans le jet swirlé par recirculation externe peut également contribuer au refroidissement de la flamme d'où la réduction des émissions de NO_X dans les fumées.

Parmi les points évoqués dans cette thèse, certains méritent d'être approfondis. Il pourrait donc être très bénéfique de mener une étude approfondie sur l'évolution du taux d'entraînement des gaz brûlés dans le cas de la dilution à l'aide des résultats Stéréo-PIV. Ceci permettrait de donner plus d'explications liées au refroidissement de la flamme avec la dilution et la stabilisation de celle-ci loin du brûleur. Ces mesures complémentaires apporteraient des éléments essentiels relatifs à la formation des émissions polluantes, notamment les NO_X et le CO.

Il serait également intéressant de mener une étude concernant des mesures de gradients de concentration d'espèces dans la zone proche du brûleur, grâce à des techniques de mesures comme la PLIF (Fluorescence Planaire Induite par Laser) OH et acétone. Ceci apporterait des informations importantes relatives à la distribution des températures et des gaz brûlés ainsi qu'à la richesse locale de la zone de stabilisation de la flamme en fonction de l'enrichissement à l'oxygène et de la dilution. La variation du diamètre des trous d'injecteur et l'angle d'injection du méthane sont également des paramètres qui pourrait être pris en compte dans les prochaines études.

De manière générale, les différentes études expérimentales menées durant ce travail de thèse permettent de mieux comprendre les différents phénomènes mis en jeu dans la combustion des flammes turbulentes swirlées non prémélanges, enrichies en dioxygène et diluées en gaz de combustion en fonction d'une large gamme de paramètres globaux, tant sur la stabilité de la flamme et les émissions polluantes que sur la dynamique de l'écoulement swirlé.

Liste des figures

Figure 1.1 : Structure d'une flamme de diffusion obtenue à partir d'un écoulement de combustible débouchant dans l'air [5]. 8
Figure 1.2: Structure d'une flamme de diffusion selon l'approximation de Burke-Schumann. 12
Figure 1.3: Classification de différents types de flammes turbulentes de diffusion dans un diagramme : nombre de Reynolds/nombre de Damkölher [5]. 14
Figure 1.4 : Image d'une flamme triple stabilisée [13] et représentation schématique d'une flamme triple [16]. 16
Figure 1.5: Schéma d'un brûleur à swirl par arrivée tangentielle [29]. 17
Figure 1.6: Schéma de brûleur avec mise en rotation de l'air avec ailettes directives [29]. 18
Figure 1.7: Types de swirlers à pales axiales : élargissement (a) en sortie du swirler ; (b) en entrée de swirler ; (c) en entrée et en sortie du swirler [31]. 18
Figure 1.8: (a) Conception de l'injecteur à Swirl-Burst (b) Principe de fonctionnement de l'injecteur [36]. 19
Figure 1.9: Types d'écoulements observés dans un foyer pour des jets swirlés dans une sortie divergente pour différentes intensités de swirl [49]. 22
Figure 1.10 : Lignes de courant de l'écoulement dans le plan XZ dans le MC avec différents diamètres du canal [50]. 23
Figure 1.11: Géométries de la section de sortie d'un brûleur à jet swirlé : (a) convergente divergente avec bluff-body ; (b) divergente d'angle α ; (c) droite [31]. 23
Figure 1.12: Dimension du noyau de recirculation en fonction du nombre de swirl dans un brûleur à canal cylindrique [29]. 25
Figure 1.13: Influence d'un divergent sur la forme de la zone de recirculation pour différentes valeurs du nombre de swirl [29]. 25
Figure 1.14: Domaines de stabilité des flammes à recirculation centrale et à écoulement mural [Monnot 1978]. 26
Figure 1.15: Dynamique et mélange des flammes swirlées étudiées par Schmittel et al [72]. 29
Figure 1.16: Évolution de la formation des suies à P=10 atm pour le méthane-air avec un débit mf = 0.825mg/s et méthane-oxygène avec un débit mf = 1.1mg/s [104]. 35
Figure 1.17: Courbes de stabilisation de la flamme : effet de la dilution en CO2 dans l'oxydant sur la stabilisation de la flamme [108]. 36

Figure 1.18: Indice de variation des NOx en fonction de la fraction molaire recirculé du CO2 avec $\alpha_{O_2} = 0.3$ [113]. 37
Figure 1.19: Vitesse de flamme laminaire en fonction de la fraction molaire de différents diluants (CO2, N2 Ar et He) pour une flamme prémélangée méthane/air/diluant à la stœchiométrie [116]..... 38
Figure 1.20: Probabilité des gaz brûlés dans un plan axial avec les champs de vitesse 2D superposés. La ligne noire délimite les positions où les gaz brûlés chauds sont présents 50% du temps. ϕ= 0.95; P=13 kW, S0=0.75 et Tad=2200 K [120]. 39
Figure 1.21: Évolution de la température adiabatique de flamme en fonction de la fraction de vapeur d'eau à 0.6, 0.7 et 0.8 (numérique et expérimental) [127]. 40
Figure 1.22: Effets chimiques et thermiques de CO2 (a) et H2O (b) sur les délais d'auto-inflammation [131]..... 41
Figure 1.23 : Contributions relatives de chaque voie de formation de NOx à la valeur totale simulée d'oxyde nitrique prédite par les trois modèles pour les deux niveaux de dilution EGR à 1850 K. Les résultats « sans EGR » se produisent à ϕ ~ 0,69 à 0% EGR. Les résultats « avec EGR » se produisent à ϕ ~ 1 à 27% d'EGR. Légende : Noir : GRI, Gris : SD, Blanc : CSE. [144]. 43
Figure 2.1 Schéma du brûleur coaxial à swirl. 48
Figure 2.2 : Paramètres géométriques du swirler [38] : (a) coupe longitudinale, (b) coupe transverse. 49
Figure 2.3 : Chambre de combustion et éléments du dispositif expérimental. 50
Figure 2.4 : Représentation schématique de la chambre de combustion 51
Figure 2.5: Système CEM (contrôle de l'évaporation et du mélange). 52
Figure 2.6 : Technique de chimiluminescence installée autour du système de combustion. ... 55
Figure 2.7: Spectres d'émission des radicaux OH*, CH* et C2* pour une flamme prémélangée Méthane/air à différentes richesses [147]. 56
Figure 2.8 : (a) Caméra PI-MAX2 (b) Objectif Nikon 105 mm F/4.5 UV-Micro Nikkor..... 57
Figure 2.9: Schéma du système Glidarc installé sur le brûleur coaxial à swirl..... 58
Figure 2.10 : (a) photo de l'instalation Glidarc en présence de plasma. (b) Exemple de fonctionnement du brûleur en présence d'un plasma arc glissant. Conditions expérimentales de combustion : flamme méthane/ air QCH4 : 7 L/min, Qair = 60 l/min ; plasma : U = 190 V, tipulse = 450 ns, fpulse = 12 kHz..... 60

Figure 2.11 : Schéma d'implantation du dispositif d'analyse du rayonnement par spectroscopie optique d'émission..... 61
Figure 2.12 : Schéma d'implantation du dispositif de chimiluminescence OH* avec le Glidarc..... 61
Figure 2.13: Franges d'interférences formées par deux faisceaux laser. 63
Figure 2.14 : Schéma descriptif du dispositif LDV. 64
Figure 2.15 : Photo des quatre faisceaux laser LDV croisés au niveau du point focal à z=60mm au-dessus du brûleur à swirl..... 65
Figure 2.16 : Schéma de différents processus d'interaction entre un faisceau laser irradié et une particule [149]. 67
Figure 2.17: Schéma descriptif du principe d'une configuration Stéréo-PIV avec condition de Scheimpflug [152]..... 69
Figure 2.18 : Schéma descriptif du système Stéréo-PIV pour une mesure dans le plan longitudinal..... 70
Figure 2.19: Schéma descriptif de l'ensemenceur. 72
Figure 2.20 : Schéma des étapes principales de traitement Stéréo-PIV..... 73
Figure 3.1 : Schéma du fonctionnement des codes de calcul COSILAB, en bleu : les paramètres définis par l'utilisateur ; en rouge : les systèmes contrôlés ou fichiers générés par le programme..... 84
Figure 3.2 : Vitesse de flamme laminaire CH4-air calculée avec COSILAB et comparaison avec les résultats expérimentaux issus de la littérature [124,155–158]. 85
Figure 3.3 : Effet de l'enrichissement à l'oxygène O2 sur la vitesse de flamme laminaire CH4-air pour ϕ=0,8 à T=300 K et P=1 bar 86
Figure 3.4 : Vitesse de flamme laminaire en fonction de la richesse pour une dilution de 10% en CO2 et H2O et un enrichissement à l'oxygène de 25% vol. à T=300 K et P = 1 bar. 86
Figure 3.5 : Effet de la dilution en CO2 et H2O sur (a) la température de combustion et (b) la vitesse de flamme laminaire pour ϕ=0,8, 25% O2 vol, à T=300 K et P = 1 bar. 87
Figure 3.6 : Cartographies des limites de stabilité des flammes non-prémélangées issues du brûleur coaxial à swirler en fonction du débit d'air et de méthane : (a) sans swirler ; (b) avec swirler Sn=0,8 ; (c) avec swirler Sn=1,4 [97]. 90
Figure 3.7 : Cartographies des limites de stabilité des flammes nonprémélangées issues du brûleur coaxial à swirler en fonction du débit d'oxydant et de méthane avec un enrichissement de 25% O2 [97]. 91

Figure 3.8 : Influence de l'enrichissement à l'oxygène sur la hauteur d'accrochage de la flamme et leurs fluctuations RMS pour un nombre de swirl 0,8 et une richesse globale de 0,8. 96
Figure 3.9 : Images réelles de flammes avec la dilution en CO2 et en vapeur d'eau pour un mélange CH4/air enrichi à 25% O2 vol. pour ϕ =0,8 et Sn = 0,8. 97
Figure 3.10 : Images instantanées et moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH* pour quatre taux de dilution en CO2 : 0%,4%,12% et 20% vol et deux teneurs en O2 : 21% et 25% vol. pour ϕ=0,8 et Sn=0,8. 99
Figure 3.11 : Images instantanées et moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH* pour quatre taux de dilution en H2O : 0%,4%,12% et 20% vol et deux teneurs en O2 : 21% et 25% vol. pour ϕ=0,8 et Sn=0,8. 101
Figure 3.12 : Hauteurs d'accrochage de la flamme en fonction de la teneur du diluant : CO2 et H2O pour deux teneurs en O2 : (a) 21% O2 vol. ; (b) 25% O2 vol. pour un nombre de swirl Sn=0,8 et une richesse globale ϕ=0,8. 102
Figure 3.13 : Longueurs de flamme Lf en fonction de la teneur du diluant : CO2 et H2O pour 25% O2 vol. pour un nombre de swirl Sn=0,8 et ϕ=0,8. 103
Figure 3.14 : Images moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH* pour quatre différents taux de dilution en EGR pour trois nombres de swirl Sn=0,8, 1,1 et 1,4, à 25% O2 vol. et ϕ=0,8. 104
Figure 3.15 : Images moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH* pour cinq taux d'enrichissement à l'oxygène avec et sans dilution en EGR pour Sn=0,8 et ϕ=0,8..... 105
Figure 3.16 : Influence de l'enrichissement à l'oxygène sur la hauteur d'accrochage de la flamme et leurs fluctuations RMS avec et sans dilution en EGR pour cinq taux d'enrichissement à l'oxygène avec et sans dilution en EGR pour Sn=0,8 et ϕ=0,8. 105
Figure 3.17 : Influence de l'enrichissement à l'oxygène sur la hauteur d'accrochage Hacc, la hauteur de la flamme Hf et leurs fluctuations RMS ainsi que la longueur de flamme Lf avec la dilution en EGR (10 % CO2 +10 % H2O), pour un nombre de swirl 0,8 et une richesse globale de 0,8. 106
Figure 3.18 : Images moyennes de OH* pour trois nombres de swirl Sn =0,8, 1,1 et 1,4 pour un mélange CH4/air et une richesse globale ϕ = 0,8. 107
Figure 3.19 : Hauteurs d'accrochage de la flamme en fonction de la teneur du diluant : (a) CO2 et (b) H2O pour une teneur en O2 de 25% et ϕ=0,8 pour trois différents nombres de swirl Sn=0,8, 1,1 et 1,4. 107
Figure 3.20 : Exemples de photos de flammes sans plasma a) et avec plasma b). 108

Figure 3.21 : Imageries instantanées et moyennes des flammes obtenues par chimiluminescence OH* avec et sans Glidarc à 15 kHz de fréquence plasma et 100 W de consommation d'alimentation plasma. 109
Figure 3.22 : Influence de la richesse globale et l'enrichissement de l'air à l'oxygène sur les évolutions de (a) $[NO_X]_{3\%\ O_2}$ et (b) $[CO]_{3\%\ O_2}$ dans les gaz brûlés pour un nombre de swirl Sn = 1,4. 112
Figure 3.23 : Influence de la dilution en CO2 (a) et en vapeur d'eau (b) sur la formation des NOX pour 5 taux d'enrichissement à l'oxygène : 21, 23, 25, 27 et 30% vol. dans l'air pour un nombre de swirl de 1,4 et une richesse globale de 0,8. 114
Figure 3.24 : Influence de la dilution sur la température des fumées : (a) en CO2 à ϕ=0,8 et (b) en vapeur d'eau à ϕ=0,9, pour 5 taux d'enrichissement à l'oxygène : 21, 23, 25, 27 et 30% vol. dans l'air pour un nombre de swirl de 1,4. 115
Figure 3.25 : Influence de la dilution sur la formation du CO : (a) en CO2, (b) en vapeur d'eau pour 5 taux d'enrichissement à l'oxygène : 21, 23, 25, 27 et 30% vol. dans l'air pour un nombre de swirl de 1,4 et une richesse globale de 0,8. 116
Figure 3.26 : Comparaison de l'influence de la dilution en CO2 (en rouge) et celle en vapeur d'eau (en bleu) sur les évolutions des NOX et du CO pour un mélange CH4/air enrichi à 25% vol. d'O2, un nombre de swirl de 1,4 et une richesse globale de 0,8. 118
Figure 3.27 : Influence de la dilution en gaz de combustion EGR sur la formation des émissions des NOX et du CO pour deux nombres de swirl 0,8 et 1,4, un taux d'oxygène de 25% vol. dans l'air et une richesse globale de 0,8. 119
Figure 3.28 : Influence de l'intensité du swirl en fonction de la dilution en CO2 et en vapeur d'eau sur la formation des émissions de NOX (a, b) et sur la formation du CO (c, d) pour un taux d'enrichissement à l'oxygène 25% vol. dans l'air pour deux nombres de swirl 0,8 et 1,4 à une richesse globale de 0,8. 120
Figure 3.29 : Effet de la puissance du Gliding Arc (PGA) sur l'évolution des émissions NOX et CO en ppm pour une richesse globale ϕ=1,2 et Sn=1,4. 121
Figure 3.30 : Effet de plasma au bord de l'électrode pour QTOTAL =169 NL/min, ϕ=1,2 et Sn=1,4. 122
Figure 3.31 : Exemple d'ajustement sur le spectre d'émission de 320 à 340 nm en combustion assistée par plasma. QTOTAL = 169 NL / min, ϕ = 1,2, Sn = 1,4, fPLASMA = 20 kHz. 123
Figure 3.32 : Représentation 3D de l'injecteur de méthane utilisé dans l'étude. 126

Figure 4.1: Champs moyens de vitesse radiale Vr (a, d), longitudinale Vz (b, e) et azimutale Vθ (c, f) de l'écoulement en non-réactif « NR » (a, b, c) et réactif « R » (d, e, f) pour le cas ϕ = 0,8, Sn = 1,4 et 21 % d'oxygène. 134
Figure 4.2: Influence de la flamme sur les lignes de courant à partir du couple (Vr, Vz) pour les champs moyens de vitesse longitudinale Vz avec ϕ = 0,8, 21% d'O2 et Sn = 1,4 : (a) cas non–réactif; (b) cas réactif..... 135
Figure 4.3: Profils de vitesse moyenne radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=1,4 en réactif (R) et en non-réactif (NR). 136
Figure 4.4 : Profils de la vitesse longitudinale obtenus par LDV pour le cas 21 % d'O2, ϕ= 0,8 et Sn = 1,4 en non-réactif (a) et en réactif (b) à différentes hauteurs z : 10, 30, 60, 100 et 180 mm..... 137
Figure 4.5: Champs des fluctuations de vitesse radiale Vr (a, d), longitudinale Vz (b, e) et azimutale Vθ (c, f) de l'écoulement en non-réactif « NR » (a, b, c) et réactif « R » (d, e, f) pour le cas ϕ = 0,8, Sn = 1,4 et 21 % d'O2. 138
Figure 4.6: Profils des fluctuations de vitesse radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=1,4 en réactif (R) et en non-réactif (NR). 139
Figure 4.7 : Décroissance axiale de vitesse longitudinale (tirets noirs) et azimutale (points blancs) pour la branche gauche (LB), centrale et droite (RB) pour le cas : Sn= 1,4 et ϕ = 0,8 et 21 % O2 dans l'air.: (a) en non réactif ; (b) en réactif. 140
Figure 4.8 : Décroissance axiale des vitesses moyennes pour les branches gauche LB et droite RB, pour le cas Sn = 1,4 et ϕ = 0,8, 21 % O2 : (a) composante longitudinale (Vz); (b) composante azimutale (Vθ)..... 140
Figure 4.9 : Champs moyens de vitesse radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ de l'écoulement réactif en fonction de deux richesses ϕ = 0,8 (a, b, c) et ϕ = 1 (d, e, f) pour le cas Sn = 0,8 et 21 % d'oxygène. 142
Figure 4.10 : Profils de vitesse moyenne radiale Vr (a, d, g, j), longitudinale Vz (b, e, h, k) et azimutale Vθ (c, f, i, l) à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas Sn=0,8 à 21% d'O2 pour deus richesses différentes ϕ = 0,8 (en rouge) et ϕ = 1(en bleu)..... 143
Figure 4.11 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V'r (a, d, g, j), longitudinale V'z (b, e, h, k) et azimutale Vθ (c, f, i, l) à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas Sn=0,8 à 21% d'O2 pour deux richesses différentes ϕ = 0,8 (en rouge) et ϕ = 1(en bleu).... 144

Figure 4.12 : Champs moyens de vitesse (Vr, Vz,Vθ) pour le cas ϕ = 0,8, 21 % d'O2 et deux nombres de swirl : Sn=0,8 (a, b, c) et Sn=1,4 (d, e, f). 145
Figure 4.13 : Profils de vitesse moyenne radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ = 0,8, Sn = 0,8 (en rouge) et Sn = 1,4 (en bleu). 146
Figure 4.14 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V'r, longitudinale V'z et azimutale V'θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, 21% d'O2 et deux nombres de swirl Sn = 0, 8 (en rouge) et Sn = 1,4 (en bleu)..... 147
Figure 4.15 : Champs moyens de vitesse radiale Vr, vitesse longitudinale Vz et azimutale Vθ de l'écoulement réactif pour le cas ϕ=1, Sn=1,4 et cinq taux d'enrichissement à l'oxygène : 21 % d'O2 (a, b, c); 23 % d'O2 (d, e, f); 25 % d'O2 (g, h, i); 27 % d'O2 (j, k, l); 30 % d'O2 (m, n, o)..... 148
Figure 4.16 : Profils de vitesse longitudinale Vz pour deux taux d'enrichissement 21 et 25 % d'O2 dans l'air à z = 10 mm (en noir) et z = 30 mm (en bleu) pour ϕ = 0,8 et Sn = 0,8. 149
Figure 4.17 : Profils de vitesse radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=1, Sn=1,4 pour trois taux d'enrichissement à l'oxygène dans l'oxydant 21%, 25% et 30% d'O2. 150
Figure 4.18 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V'r, longitudinale V'z et azimutale V'θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=1, Sn=1,4 pour trois taux d'enrichissement à l'oxygène dans l'oxydant 21%, 25% et 30% d'O2. 151
Figure 4.19 : Champs moyens de vitesse (Vr, Vz, Vθ) de l'écoulement réactif pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 à 21% d'O2 dans l'air et trois teneurs de dilution en CO2 (0%, 8% et 16%).153
Figure 4.20 : Profils de vitesse radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 et pour trois taux de dilution en CO2 dans l'oxydant 0%, 8% et 16%. 154
Figure 4.21 : Profils des fluctuations de vitesse radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 pour trois taux de dilution en CO2 dans l'oxydant 0%, 8% et 16 %..... 155
Figure 4.22: Influence de la dilution en CO2 sur la décroissance axiale de la vitesse moyenne azimutale pour les branches gauche LB et droite RB, pour le cas Sn = 0,8 et ϕ = 0,8 à 21 % O2 : (a) sans CO2 ; (b) 16 % CO2. 156
Figure 4.23 : Champs moyens de vitesse (Vr, Vz, Vθ) de l'écoulement réactif pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 à 21% d'O2 dans l'air et trois teneurs de dilution en vapeur d'eau (0%, 8% et 16%). 157

Figure 4.24 : Profils de vitesse moyenne radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ à différentes hauteurs pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 pour trois taux de dilution en H2O dans l'oxydant : 0% (noir), 8% (bleu)et 16% (rouge). 158
Figure 4.25 : Profils des fluctuations de vitesse radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ à différentes hauteurs (z= 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 pour trois taux de dilution en H2O dans l'oxydant : 0% (noir), 8% (bleu)et 16% (rouge). 159
Figure 4.26 : Champs moyens de vitesse longitudinale avec le champ des vecteurs issus de la composition des vitesses radiales et longitudinales (a, b, c) et champs moyens de la composante azimutale avec les lignes de courant issues du couple (Vr, Vz) (d, e, f) pour le cas ϕ = 0,8, Sn = 0,8, 21% d'O2 et une dilution de 16% en CO2 et H2O. 161
Figure 4.27 : Profils de vitesse longitudinale obtenus avec la technique LDV en fonction de la dilution (0% dilution, 10% de CO2 vol. et 10% H2O vol.) pour 21 % d'O2 dans l'air, ϕ= 0,8 et Sn = 0,8 : (a) z = 10 mm et (b) z = 30 mm. 162
Figure 4.28 : Influence de la dilution en EGR sur les lignes de courant à partir du couple (Vr, Vz) avec les champs moyens de vitesse longitudinale Vz : (a) sans dilution ; (c) 20% EGR et sur les profils de vitesse issus de la composition des vitesses radiales et azimutales avec les champs moyens de vitesse azimutale Vθ : (b) sans dilution ; (d) 20% EGR pour ϕ = 0,8, Sn = 1,4 et 21% d'O2 dans l'air. 164
Figure 4.29 : Profils de vitesse radiale Vr, longitudinale Vz et azimutale Vθ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour une combustion à l'air, ϕ = 0,8 et Sn = 1,4, sans (courbes rouges) et avec 20 % d'EGR (10% CO2 + 10% H2O) (courbes bleues). 165
Figure 4.30 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V'r, longitudinale V'z et azimutale V'θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour une combustion à l'air, ϕ = 0,8 et Sn = 1,4, sans (courbes rouges) et avec 20 % d'EGR (10% CO2 + 10% H2O) (courbes bleues). 166

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Conditions aux limites de l'équation (8). 12
Tableau 2.1 : Dimensions de deux différents swirlers utilisés dans cette étude. 48
Tableau 2.2 : Caractéristiques des analyseurs de gaz. 54
Tableau 2.3 : Évaluation des incertitudes des mesures de hauteur de décollage et de hauteur de flamme. 58
Tableau 2.4: Tableau récapitulatif des conditions opératoires dans le cas de la dilution en CO_2 et de l'enrichissement en dioxygène pour une richesse de 0,8. 77
Tableau 2.5 : Exemple de conditions opératoires en débits volumiques 78
Tableau 3.1 : Tableau récapitulatif des conditions opératoires traitées par chimiluminescence OH*. 93
Tableau 3.2 : Conditions opératoires des cas étudiés par mesure des concentrations des émissions polluantes sur fumées sèches. 111
Tableau 3.3 : Photos de flammes et émissions polluantes pour différentes configurations du brûleur. 124
Tableau 3.4 : Résultats obtenus avec les différentes têtes d'injecteur. 126
Tableau 4.1 : Tableau récapitulatif des cas étudiés avec la technique Stéréo-PIV. 133
Tableau A.2 : Cas étudiés en réactif et en non-réactif avec la technique LDV 184
Tableau A.3 : Cas étudiés en réactif avec la technique LDV. 184

Annexe

1. Caractéristiques des jets swirlés avec la technique LDV-2D

Le système vélocimétrie Laser à effet Doppler TR-SS-2D de (TSI, Inc) utilisé durant cette étude nous permet de mesurer les deux composantes de vitesses V_r et V_z du vecteur vitesse respectivement dans les directions radiales r et longitudinales z. Nous rappelons que les longueurs d'onde de chaque faisceau sont 532 nm pour la vitesse radiale V_r et 561nm pour la vitesse longitudinale V_z, les interfranges sont de 8,11 µm pour V_r et 8,55 µm pour V_z, les tailles des diamètres des volumes de mesure sont 245,9 µm pour V_r et 259,3 µm pour V_z. La longueur de la focale utilisée est de 750 mm et le décalage en fréquence de faisceau est de 40 MHz. Le système assure une grande précision de mesure dont l'incertitude sur chaque composante est de 0,015 %. Les mesures ont été réalisées en mode (coïncidence), ce mode permet d'enregistrer les informations sur la vitesse à chaque fois qu'une particule d'ensemencement passe dans le volume de mesure, et qu'elle soit validée par le processeur pour les deux composantes, ce qui nécessite une bonne qualité d'ensemencement d'où une bonne qualité de signal.

Dans la présente étude, nous nous contentons de présenter principalement les résultats concernant la vitesse longitudinale. Cette décision revient au fait que dans le cas d'un écoulement swirlé, la vitesse radiale peut être confondue avec la vitesse azimutale produisant ainsi des interférences entre les deux vitesses. Néanmoins, quelques résultats y seront présentés. L'objectif de ce travail est d'avoir une idée bien définie sur la vitesse longitudinale temporelle, tout en se basant sur l'influence de la présence de la flamme, l'effet de l'enrichissement à l'oxygène et l'influence de la dilution en gaz de combustion. Nous rappelons ici que le débit total (oxydant avec ou sans dilution) est fixé à 150 NL/min et que la richesse globale à l'injection est maintenue à 0,8. Notons que dans le cas non-réactif, on remplace le méthane par de l'azote, et cette information ne sera donc plus mentionnée dans la suite de ce chapitre.

On peut également définir l'intensité de turbulence qui rend compte de la fluctuation de vitesse par rapport à la vitesse moyennes prise localement. Elle se définit dès lors par :

$$\boldsymbol{I_t} = \frac{\boldsymbol{V'}}{\overline{\boldsymbol{V}}} \qquad (70)$$

Avec $\bar{V}$ la vitesse longitudinale moyenne et V' les fluctuations RMS « Root-Mean-Square en anglais » qui se définissent par :

$$\boldsymbol{V'} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{N}}\sum_{\boldsymbol{n}}^{\boldsymbol{N}}(\boldsymbol{V_n} - \bar{\boldsymbol{V}})^{\boldsymbol{2}}} \qquad (71)$$

Où N définit le nombre d'échantillons total et $\boldsymbol{V_n}$ la nième vitesse longitudinale mesurée de l'échantillon. V'correspond à la racine carrée du moment centré d'ordre 2.

Tout d'abord, nous allons nous intéresser à la dynamique de l'écoulement en réactif et en non-réactif. Nous allons commencer cette section par l'étude de l'influence de la combustion et la présence de la flamme sur les vitesses longitudinales. La vitesse longitudinale est étudiée avec le dispositif de LDV en faisant des mesures le long de l'axe du brûleur. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** rassemble les différents paramètres et les différentes hauteurs étudiés.

Tableau A.2 : Cas étudiés en réactif et en non-réactif avec la technique LDV

Sn	ϕ	Ω	z (mm)	Réactif	Non-Réactif
0.8	0.8	21	10 30 60 100 180	✓	✓
1.4	0.8	21	10 30 60 100 180	✓	✓

Ensuite, nous allons étudier en réactif les effets de l'enrichissement à l'oxygène et la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur les évolutions des vitesses. Toutes les mesures ont été réalisées avec un nombre de swirl Sn = 0,8 et une richesse globale ϕ = 0,8. Le Tableau A.3 synthétise toutes les conditions opératoires de l'étude.

Tableau A.3 : Cas étudiés en réactif avec la technique LDV.

Sn	ϕ	% vol. Diluant	Ω	z (mm)
0.8	0.8	0	21	10 30
			25	10 30
0.8	0.8	10 CO_2	21	10 30
			25	10
0.8	0.8	10 H_2O	21	10 30
			25	10
0.8	0.8	10 CO_2 + 10 H_2O	-	-
			25	10

1.A Dynamique des jets swirlés en non réactif et réactif

Pour un nombre de swirl de 1,4, nous présentons dans la figure A.1 les profils des vitesses longitudinales en réactif et en non-réactif pour cinq différentes hauteurs de *z* (*z* = 10, 30, 60, 100 et 180 mm). Pour chaque hauteur, les mesures sont effectuées avec un pas de *r* = 1 mm sauf pour le cas de 18 cm, le pas est de 2 mm.

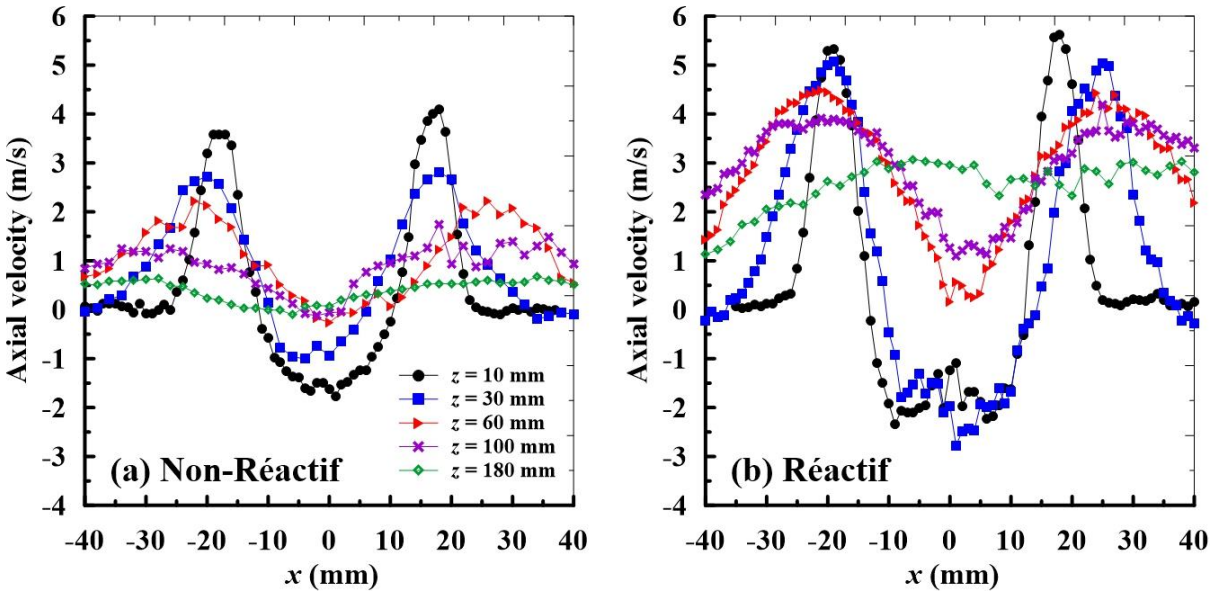


Figure A.1 : Profils des vitesses longitudinales pour le cas 21 % d'O_2, ϕ= 0,8 et Sn = 1,4 en non-réactif (a) et en réactif (b) à différentes hauteurs z : 10, 30, 60, 100 et 180 mm.

Dans les deux cas, le jet présente une zone de recirculation centrale ZRC entourée d'un jet swirlé constituant deux bosses. La zone centrale correspond à la bulle de recirculation qui ramène l'écoulement vers le point d'arrêt imposé par le bluff-body. La région annulaire est

associée au jet swirlé. L'écoulement swirlé semble envahir l'ensemble du jet dont la ZRC avec la combustion. Dans le cas réactif, nous observons que la présence de la flamme génère un élargissement non-négligeable du jet dans son ensemble et en particulier de la zone de recirculation. Nous constatons également que les vitesses au niveau de la zone de recirculation sont plus importantes avec la présence de la flamme. La présence de la flamme entraine également une augmentation significative de la vitesse longitudinale due principalement à l'expansion thermique des gaz. La vitesse longitudinale augmente jusqu'à atteindre environ le double de la vitesse de recirculation proche du brûleur. Plus en aval de l'écoulement, les profils s'élargissent et s'aplatissent ce qui témoigne un envahissement progressif de la vitesse dans l'ensemble du jet. Nous observons aussi une décroissance longitudinale des vitesses en fonction de la hauteur *z* en se basant sur les maximas des vitesses longitudinales mesurées, plus particulièrement dans le cas non-réactif.

1.B Influence de l'enrichissement à l'oxygène

Nous allons observer, dans un premier temps, l'effet de l'enrichissement à l'oxygène sur les vitesses longitudinales à deus hauteurs différentes z = 10, 30 mm et deux taux d'enrichissement à l'oxygène 21 et 25%. Nous constatons que la vitesse longitudinale diminue légèrement au fur et à mesure que l'on monte sur l'axe du brûleur. En ce qui concerne la vitesse longitudinale négative, relative à la zone de recirculation, pour une combustion à l'air, la vitesse de recirculation est plus importante à 21% d'O_2 que celle à 25% d'O_2. L'enrichissement à l'oxygène ne semble pas trop affecter les vitesses longitudinales dans la zone proche du brûleur (z = 10 mm), une légère augmentation des vitesses longitudinales est repérée à z = 30 mm, notamment dans la zone centrale. Cette différence de vitesses longitudinales est à priori liée au déplacement de la base de la flamme du plan de sortie du brûleur avec l'ajout de l'oxygène dans l'oxydant comme nous l'avons montré dans la section 3.4.1.

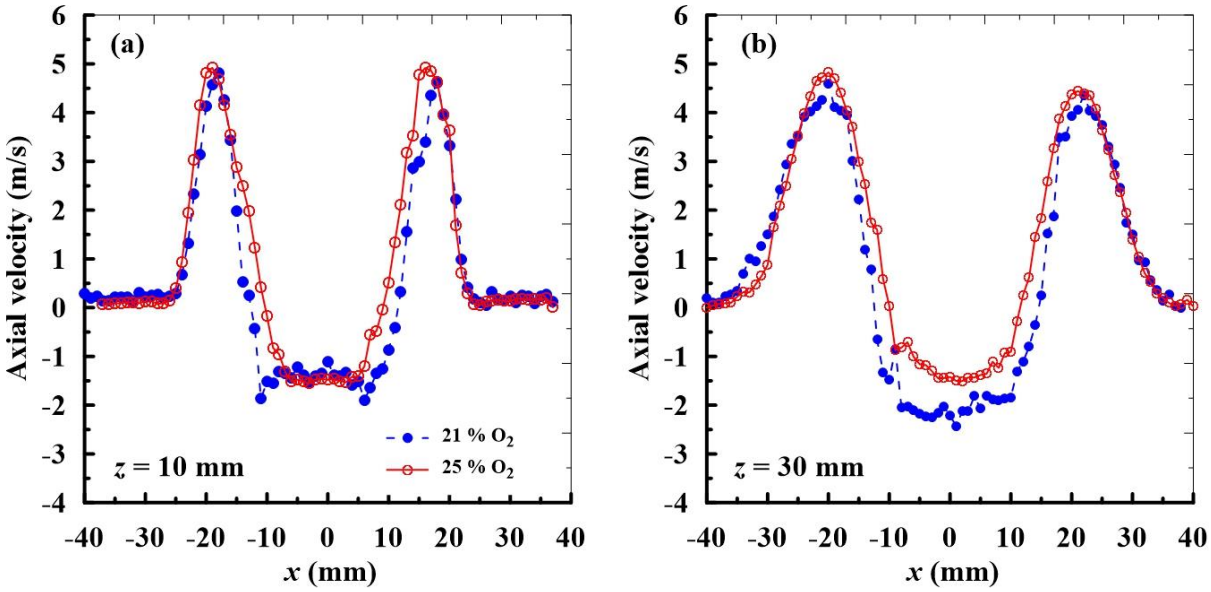


Figure A.2 : Profils des vitesses longitudinales pour deux taux d'enrichissement 21 et 25 % d'O_2 dans l'air à z = 10 mm (en noir) et z = 30 mm (en bleu) pour ϕ = 0,8 et Sn = 0,8.

1.C Influence de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau

Les effets de la dilution en CO_2 et en vapeur d'eau sur les vitesses moyennes longitudinales et radiales sont discutés dans cette section. Sur les figures A.3 (a) et A.3 (b) sont comparés les profils de vitesses longitudinales moyennes pour deux hauteurs z = 10, 30 mm sans et avec 10% de dilution en CO_2 et en vapeur d'eau. Proche de la sortie du brûleur, la dilution a très peu d'influence sur la vitesse longitudinale, les différentes courbes sont quasi-identiques ; une légère augmentation des valeurs au niveau des maximas de la vitesse est observée.

A z = 30 mm, l'effet de la dilution sur les vitesses longitudinales semble plus prononcé. Nous notons toujours une légère augmentation de la vitesse longitudinale avec la dilution dans la ZRC. Pour la dilution en CO_2, la distance entre les deux bosses diminue, ce qui explique le rétrécissement de la base de flamme visualisé par chimiluminescence de OH* dans la section 3.4.2. L'ajout du CO_2 accélère les vitesses longitudinales au centre du brûleur en s'ajoutant au CO_2 déjà présent dans la zone de recirculation. Une grande quantité de CO_2 dans la flamme swirlée favorise la recirculation en se dirigeant en aval de l'écoulement, d'où une valeur de vitesse négative absolue plus importante. L'ajout de la vapeur entraîne le même effet que le CO_2 en augmentant les vitesses longitudinales centrales. Contrairement au CO_2, la base de la flamme reste assez large dans le cas de la dilution en vapeur d'eau, l'évolution de la

vitesse longitudinale avec la dilution en vapeur témoigne le maintien de la même taille de la flamme que dans le cas sans dilution. Ces résultats expliquent la stabilité de la flamme dans le cas de la dilution en vapeur d'eau observée par chimiluminescence dans la section 3.4.2.

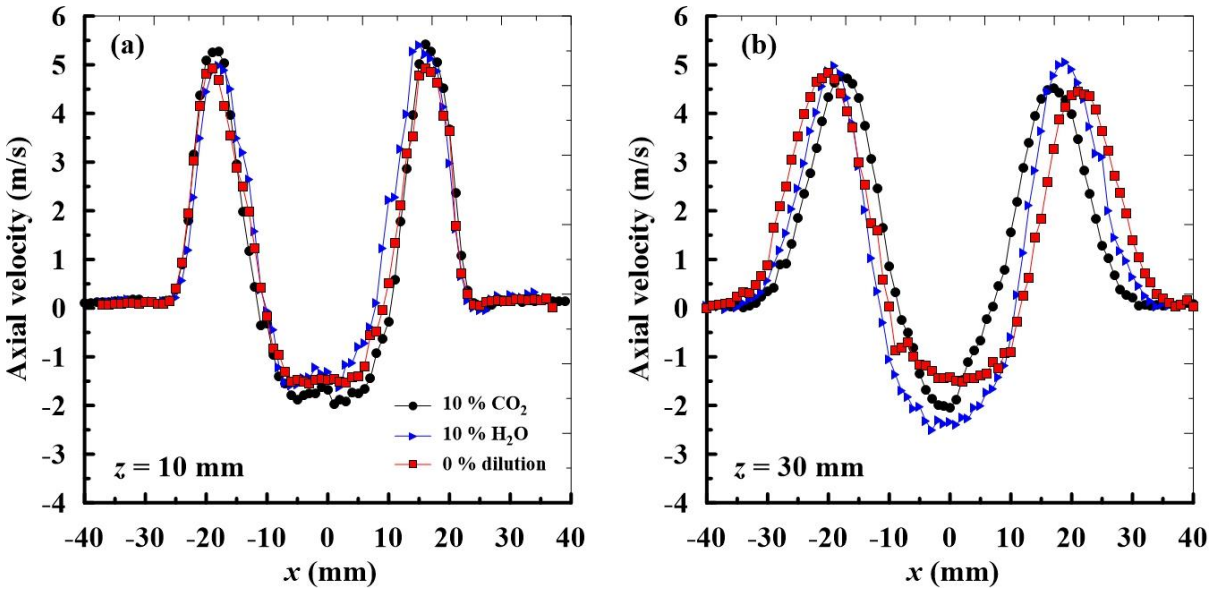


Figure A.3 : Profils des vitesses longitudinales en fonction de la dilution (0% dilution, 10% de CO_2 vol. et 10% H_2O vol.) pour 21 % d'O_2 dans l'air, ϕ = 0,8 et Sn = 0,8 : (a) z = 10 mm et (b) z = 30 mm.

Nous présentions dans les figures A.4 (a) et A.4 (b) les profils des vitesses longitudinales et radiales respectivement, en fonction de la dilution pour 10% de CO_2, 10% H_2O et 20% EGR (10% de CO_2 + 10% H_2O) pour un mélange CH_4-air enrichi à 25 % d'O_2 à z = 10 mm. Nous pouvons constater que la dilution n'a pas d'effet significatif sur les évolutions des vitesses longitudinales et radiales/azimutales dans la zone proche du brûleur quel que soit le diluant et quel que soit le taux de dilution. Ces évolutions prouvent que l'effet chimique de la dilution se traduit loin de la sortie du brûleur. La figure A.4 (b) présente une bifurcation la composante radiale/azimutale vers l'axe du jet pour tous les cas. Cette bifurcation témoigne les interférences entre la vitesse radiale et celle azimutale sur cette composante combinant ces deux dernières. Cette tendance va être discutée plus en détails dans les résultats de stéréo-PIV de la section 4.3.

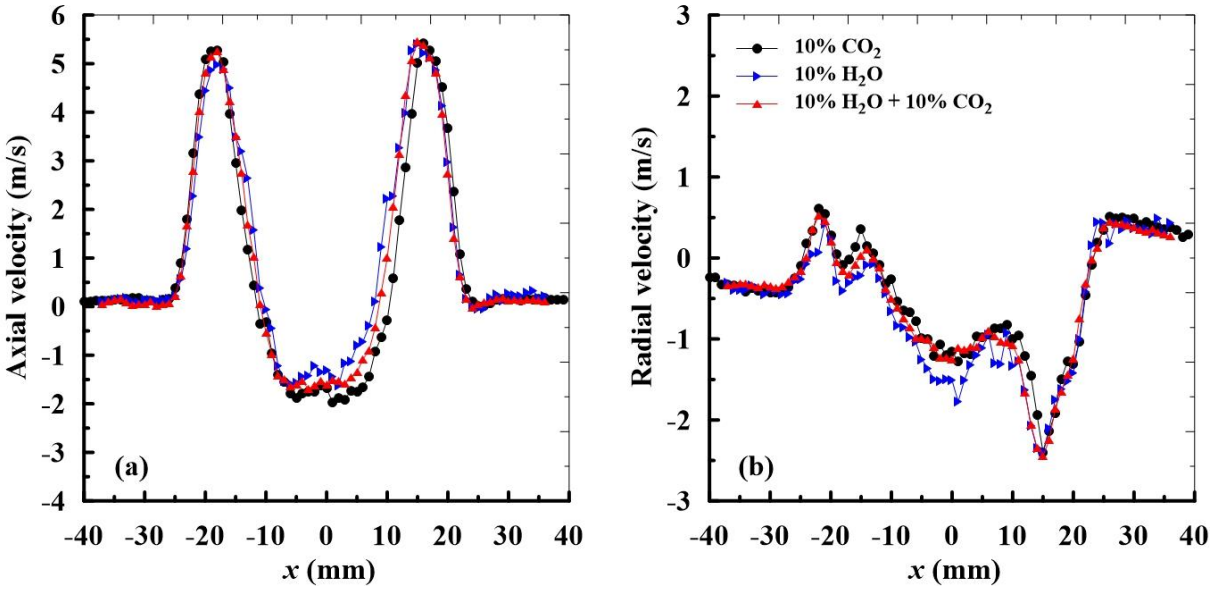


Figure A.4: Profils des vitesses en fonction de la dilution pour 10% de CO_2, 10% H_2O et 10% de CO_2 + 10% H_2O à 25 % d'O_2 dans l'air , z = 10 mm pour une richesse globale de ϕ = 0,8 et Sn = 0,8 : (a) vitesse longitudinale , (b) vitesse Radiale/azimutale.

Les évolutions longitudinales des fluctuations des vitesses en fonction de la dilution sont présentées dans les figures A.5. Nous pouvons constater une augmentation des fluctuations des vitesses longitudinales dans la zone centrale avec la dilution pour les deux taux d'enrichissement. Ces tendances sont en bon accord avec les fluctuations de la base de flamme observées par chimiluminescence de OH* avec la dilution dans la section 3.4.2.

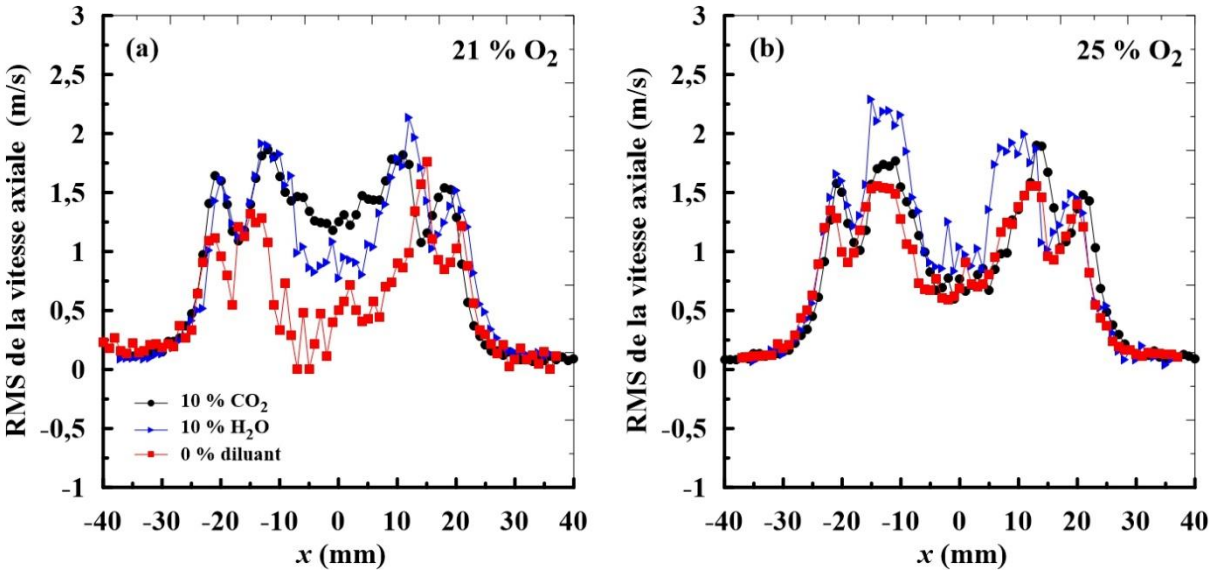


Figure A.5: Profils des fluctuations RMS des vitesses longitudinales en fonction de la dilution 10% de CO_2 et 10% H_2O et sans dilution, pour ϕ = 0,8 et Sn = 0,8 à z = 10 mm et deux taux d'enrichissement : (a) 21 % d'O_2 ; (b) 25 % d'O_2.

La figure A.6 montre l'intensité de turbulence avec et sans dilution dans le cas enrichi et non enrichi en dioxygène. On retrouve les quatre zones de forte intensité correspondant aux zone de mélanges internes et externes de chaque côté de l'écoulement swirlé. À 21% d'O_2, nous observons une intensité turbulente relativement plus forte avec la dilution en CO_2. À 25 % d'O_2, il semble que l'intensité de turbulence est plus prononcée avec la dilution en vapeur d'eau. Il faudrait plus d'études sur plusieurs cas pour confirmer ces résultats ; on y reviendra plus loin dans les résultats obtenus par Stéréo-PIV.

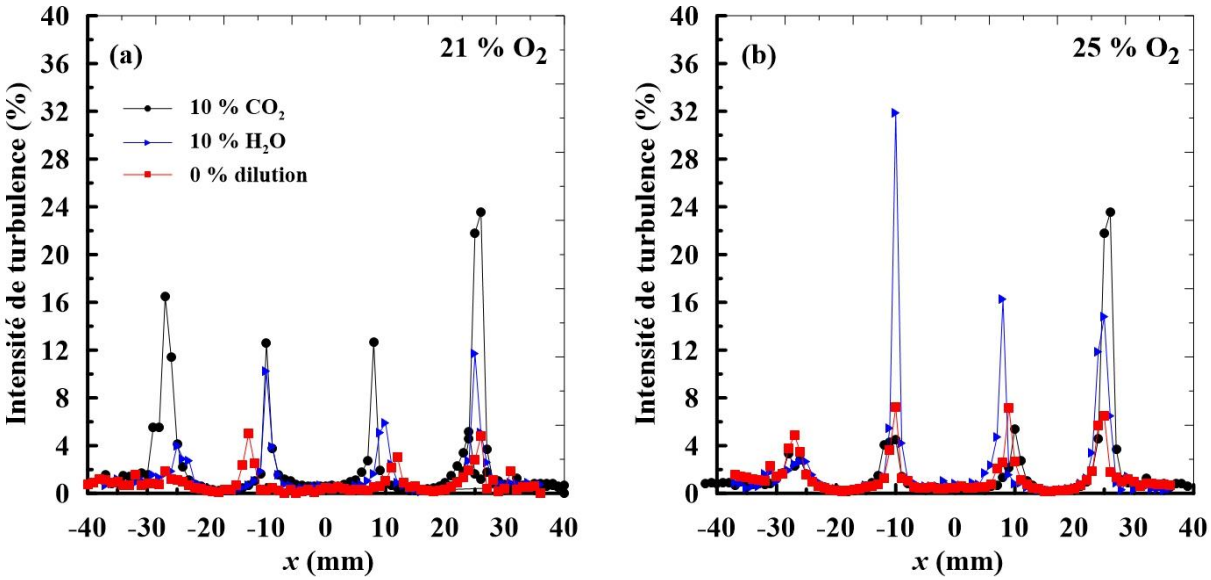


Figure A.6 : Evolutions des intensités de turbulence de la vitesse longitudinale avec et sans dilution pour ϕ =0,8, Sn=0,8 à z = 10 mm et pour deux teneurs en oxygène (a) 21% ; (b) 25% O_2.

Nous pouvons constater à partir de ces derniers résultats l'effet de l'enrichissement à stabiliser la flamme, notamment au niveau de la zone centrale du brûleur, ce qui explique la capacité de l'ajout du dioxygène à minimiser les fluctuations de la flamme et la stabiliser proche de la tête du brûleur. L'ensemble des figures A.7 et A.8 illustrent les effets de l'enrichissement en dioxygène pour chaque diluant sur les évolutions des vitesses longitudinales et radiales/azimutales à z = 10 mm. En ce qui concerne les évolutions des vitesses longitudinales, nous constatons le même effet que pour le cas sans dilution observé sur la figure A.2. Les profils sont identiques avec et sans enrichissement, avec et sans dilution.

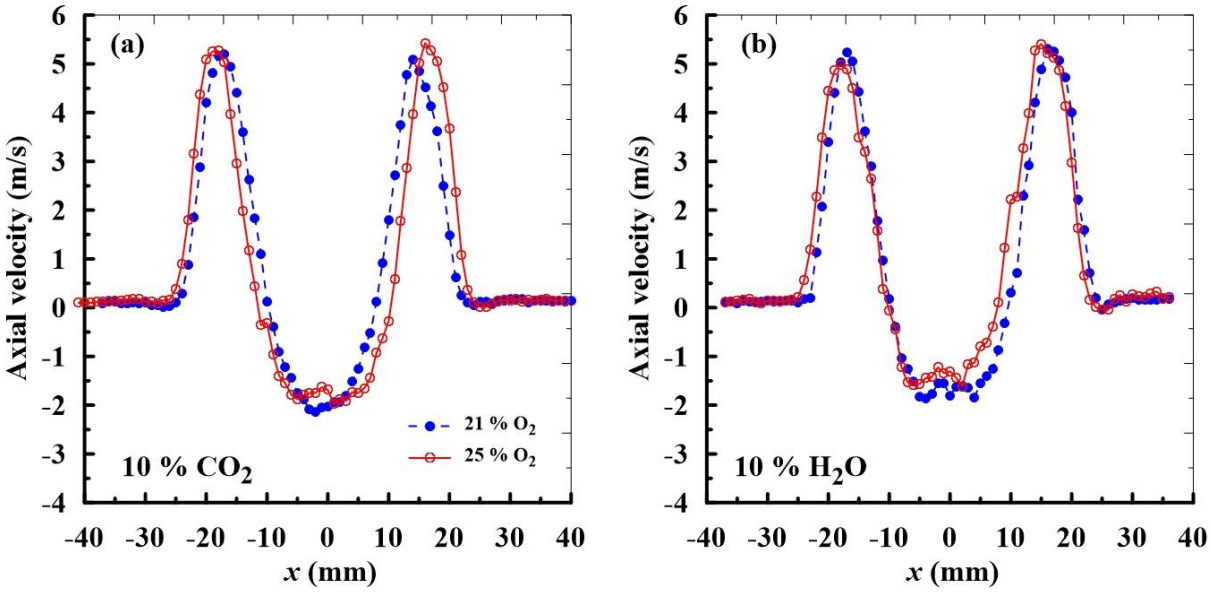


Figure A.7: Profils des vitesses longitudinales pour deux taux d'enrichissement 21 et 25 % d'O_2 à z = 10 mm pour ϕ = 0,8 et Sn = 0,8 : (a) 10% de CO_2 et (b) 10% H_2O.

Les vitesses radiales combinées avec les vitesses azimutales semblent être explicitement affectées par le type du diluant et aussi le taux d'enrichissement en dioxygène. Pour la dilution en CO_2, l'enrichissement en dioxygène conduit à une augmentation des vitesses, notamment dans l'axe de sortie des gaz. En effet, lorsque le taux d'oxygène augmente dans l'oxydant, la température de la flamme augmente, ce qui conduit à une expansion radiale plus importante. Pour le cas de dilution en vapeur d'eau, l'ajout de l'oxygène induit une légère différence.

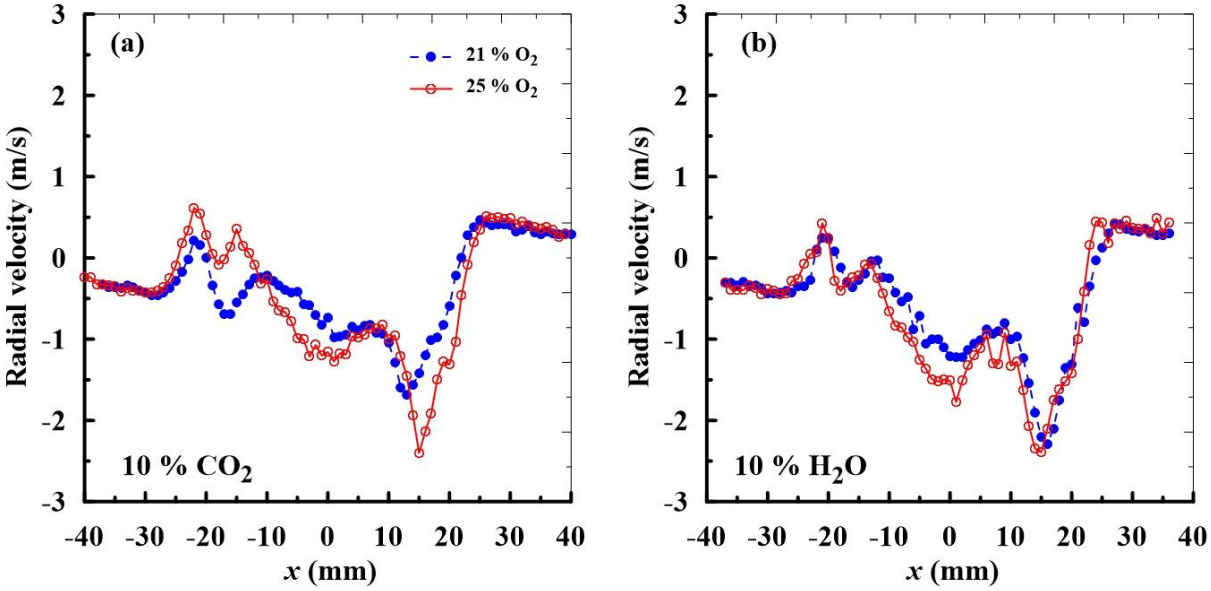


Figure A.8 : Profils des vitesses radiales pour deux taux d'enrichissement 21 et 25 % d'O_2 à z = 10 mm pour ϕ = 0,8 et Sn = 0,8 : (a) 10% de CO_2 vol. et (b) 10% H_2O vol.

2. Résultats Stéréo-PIV

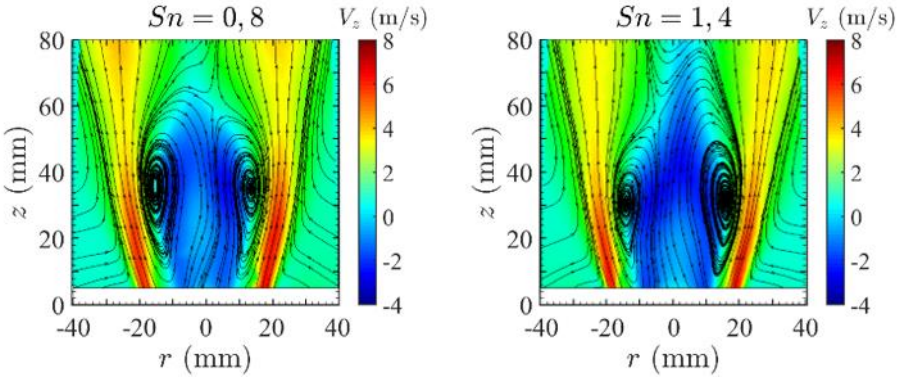


Figure A.9 : Influence de l'intensité du swirl sur les lignes de courant à partir du couple (V_r, V_z) pour les champs moyens de vitesse longitudinale V_z avec ϕ = 0,8, 21% d'O_2 : Sn = 0,8 (à gauche) et Sn = 1,4 (à droite).

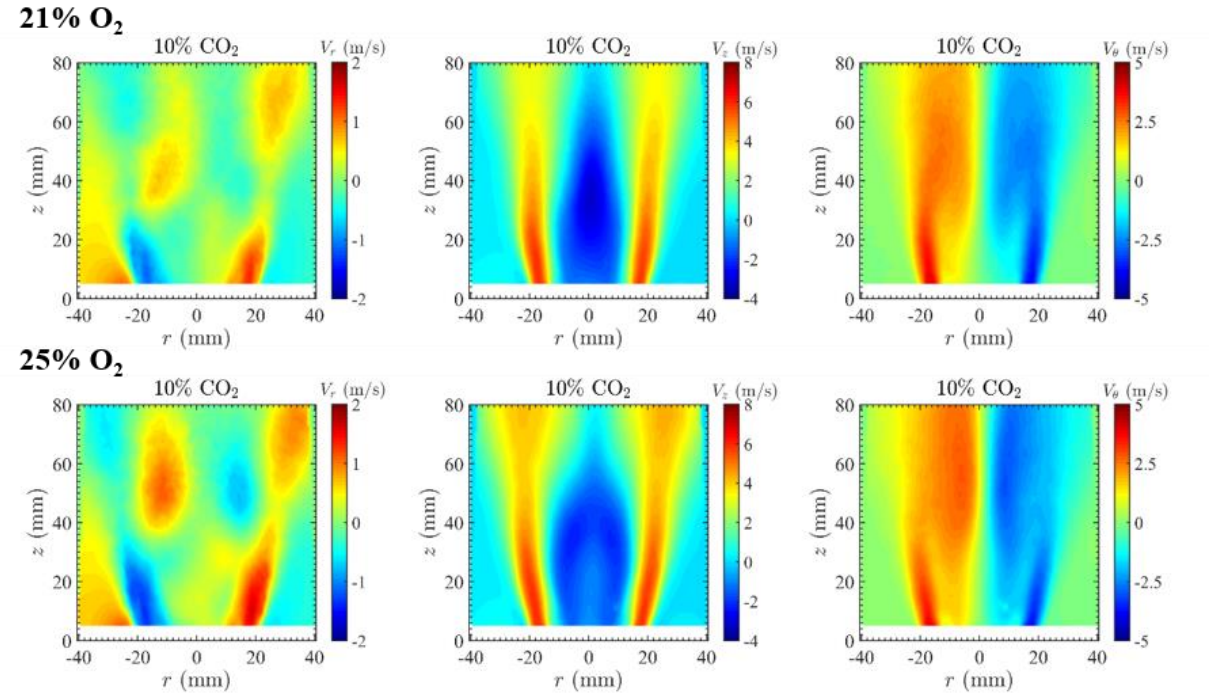


Figure A.10 : Champs moyens de vitesse radiale V_r, vitesse longitudinale V_z et azimutale V_θ de l'écoulement réactif pour le cas ϕ =0,8, Sn=0,8 et 10% CO_2 pour deux taux d'enrichissement à l'oxygène : 21 % d'O_2 (a, b, c); 25% d'O_2 (d, e, f).

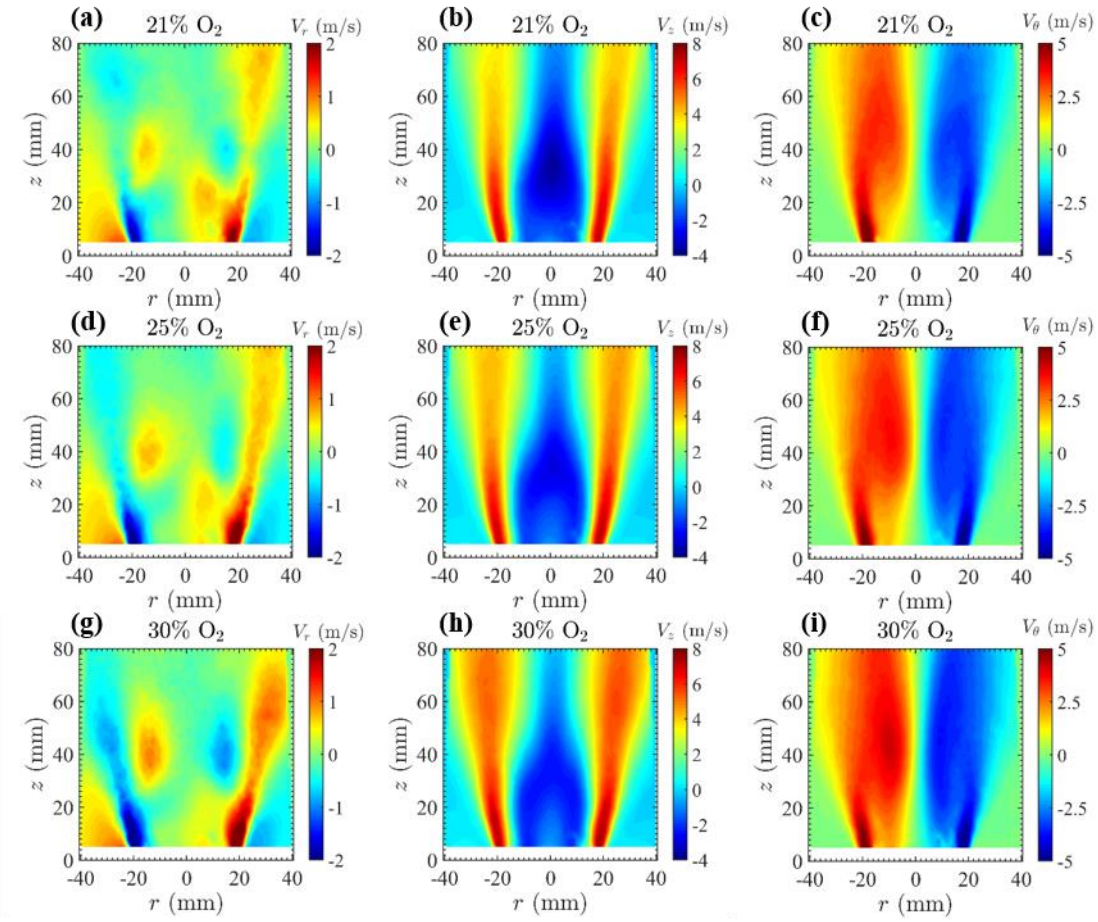


Figure A.11 : Champs moyens de vitesse radiale V_r, vitesse longitudinale V_z et azimutale V_θ de l'écoulement réactif pour le cas ϕ =1, Sn=1,4, 20% EGR (10% CO_2 + 10% H_2O) et trois taux d'enrichissement à l'oxygène : 21 % d'O_2 (a, b, c); 25% d'O_2 (d, e, f); 30% d'O_2 (g, h, i.).

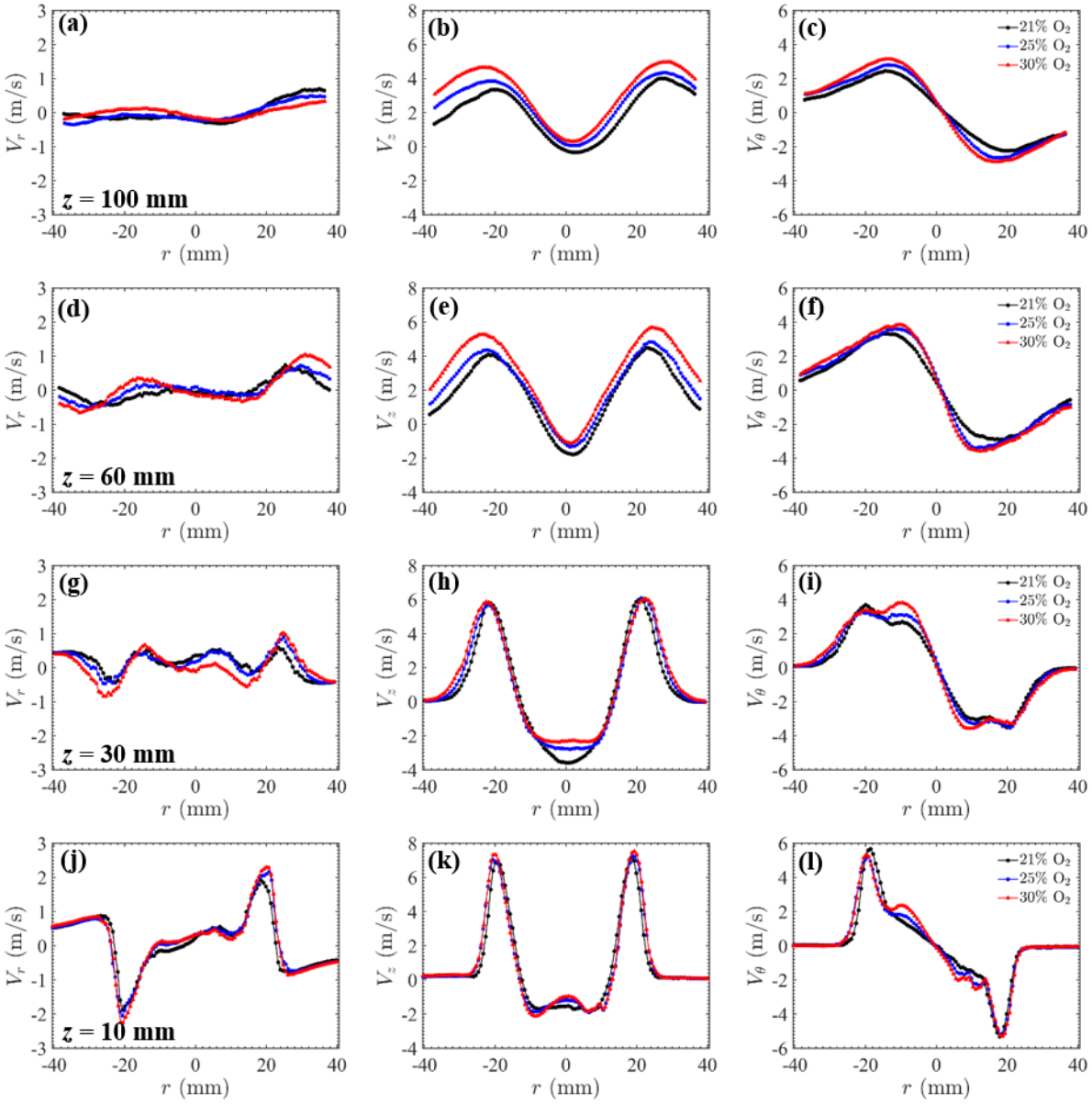


Figure A.12 : Profils de vitesse radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ =1, Sn=1,4 et 20% EGR (10% CO_2 + 10% H_2O) pour trois taux d'enrichissement à l'oxygène dans l'oxydant 21%, 25% et 30% d'O_2.

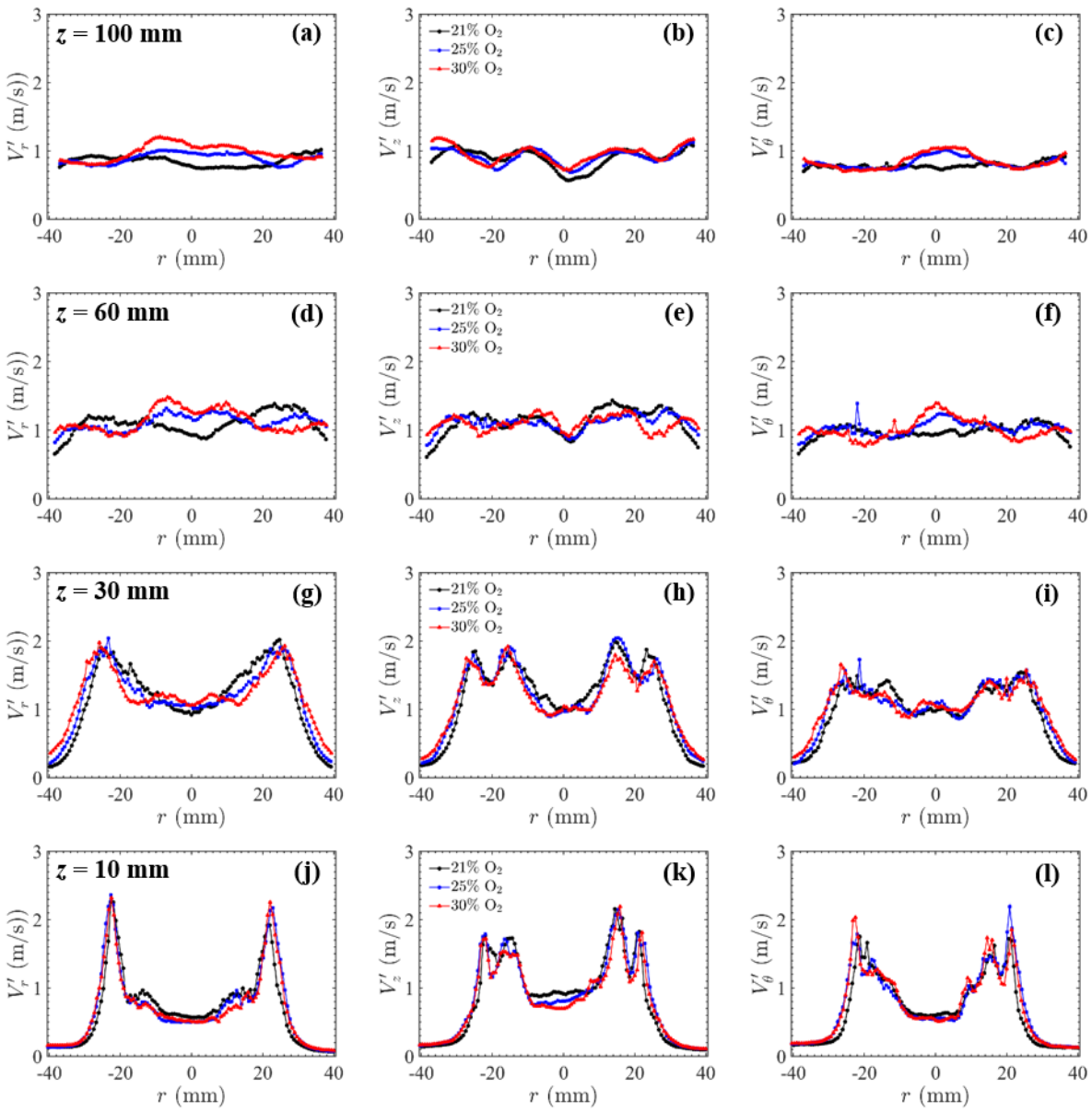


Figure A.13 : Profils des fluctuations de vitesse radiale V_r, longitudinale V_z et azimutale V_θ à différentes hauteurs (z = 10, 30, 60 et 100 mm) pour le cas ϕ =1, Sn=1,4 et 20% EGR (10% CO_2 + 10% H_2O) pour trois taux d'enrichissement à l'oxygène dans l'oxydant 21%, 25% et 30% d'O_2.

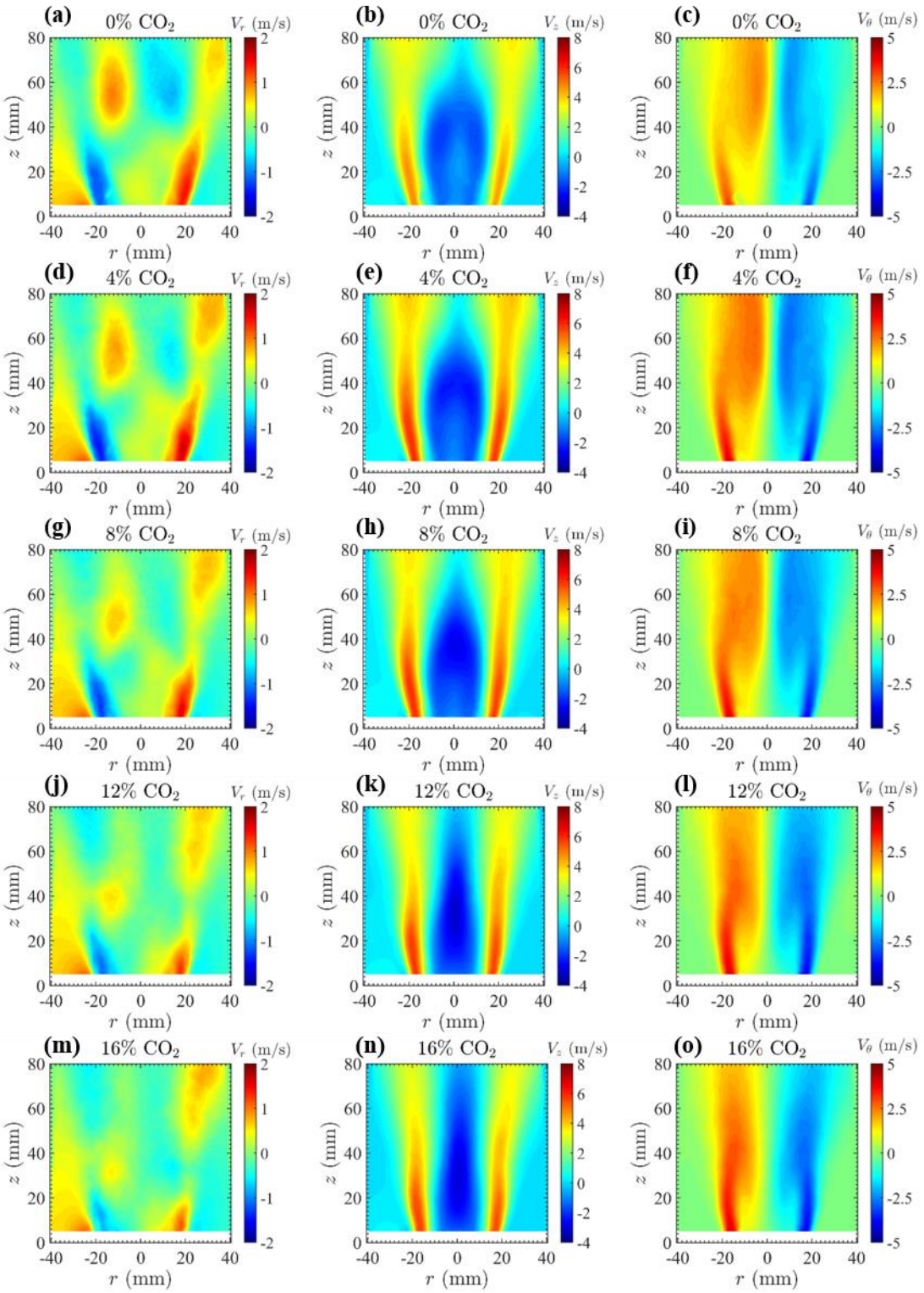


Figure A.14 : Champs moyens de vitesse (V_r, V_z, V_θ) de l'écoulement réactif pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 à 21% d'O_2 dans l'air et trois teneurs de dilution en CO_2 (0%, 4%, 8%, 12% et 16%).

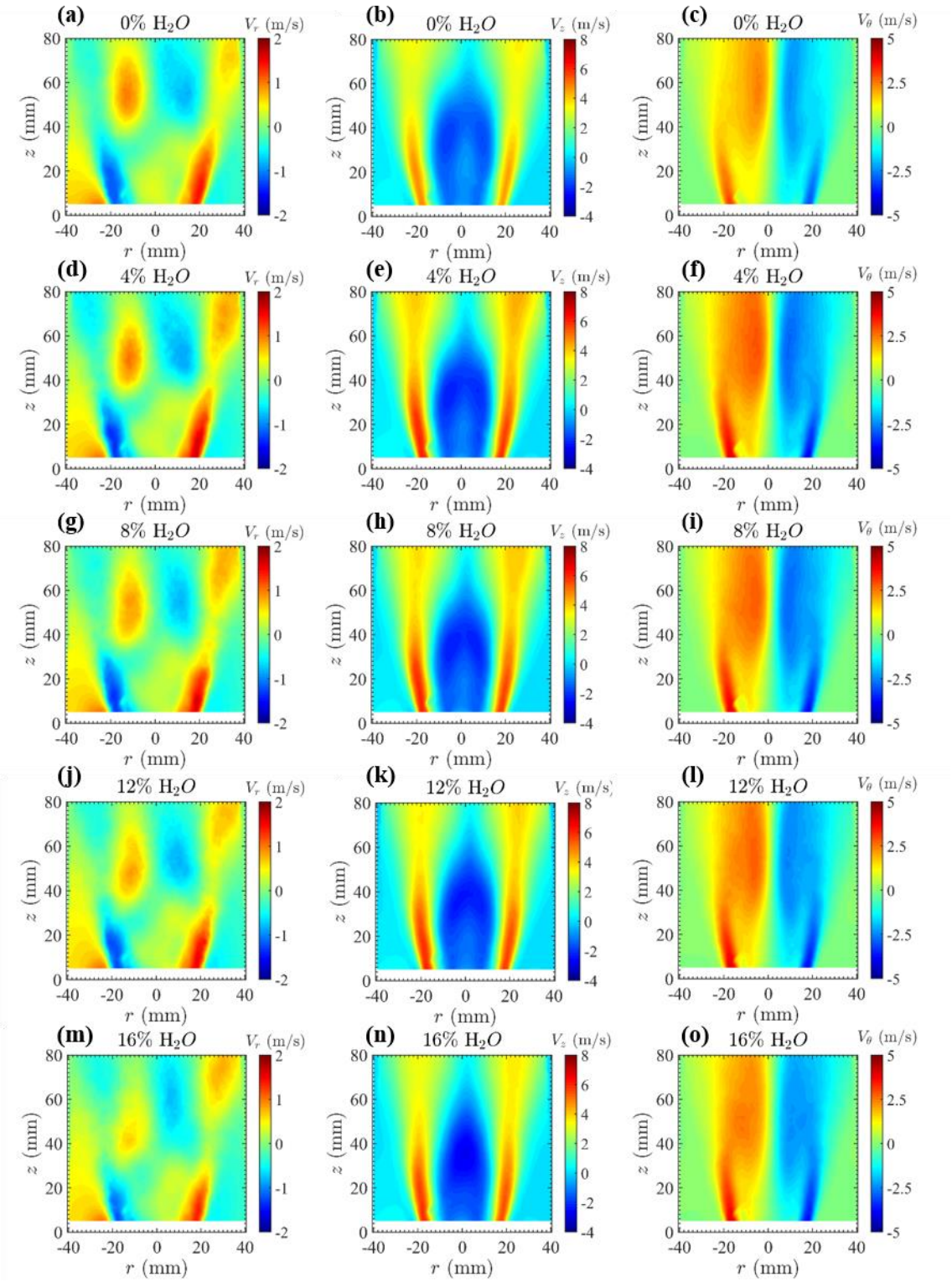


Figure A.15 : Champs moyens de vitesse (V_r, V_z, V_θ) de l'écoulement réactif pour le cas ϕ=0,8, Sn=0,8 à 21% d'O_2 dans l'air et trois teneurs de dilution en H_2O (0%, 4%, 8%, 12% et 16%).

Références bibliographiques

[1] M. Pfister, Captage du CO2 en post combustion par procédé de perméation gazeuse, Université de LORRAINE, 2017.

[2] B. Belaissaoui, G. Cabot, M.-S. Cabot, D. Willson, E. Favre, An energetic analysis of CO2 capture on a gas turbine combining flue gas recirculation and membrane separation, Energy. 38 (2012) 167–175. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.12.018.

[3] G. de Soete, A. Feugier, Aspects physiques et chimiques de la combustion, Technip, Paris, 1976.

[4] R. Borghi, M. Destriau, G. De Soete, La combustion et les flammes, Editions Technip, Paris, 1995.

[5] R. Borghi, M. Champion, Modélisation et théorie des flammes, Technip, Paris, 2000.

[6] N. Peters, Turbulent combustion, Cambridge University Press, Cambridge [England]; New York, 2000. http://site.ebrary.com/id/5008030 (accessed January 1, 2020).

[7] T. Poinsot, D. Veynante, Theoretical and numerical combustion, 2nd ed, Edwards, Philadelphia, 2005.

[8] Y.-C. Chen, M.S. Mansour, Measurements of the detailed flame structure in turbulent H2-Ar jet diffusion flames with Line-Raman/Rayleigh/LIPF-OH technique, Symp. Int. Combust. 26 (1996) 97–103. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(96)80205-0.

[9] A. Ratner, J.F. Driscoll, J.M. Donbar, C.D. Carter, J.A. Mullin, Reaction zone structure of non-premixed turbulent flames in the “intensely wrinkled” regime, Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 245–252. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80217-9.

[10] R.C. Miake-Lye, J.A. Hammer, Lifted turbulent jet flames: A stability criterion based on the jet large-scale structure, Symp. Int. Combust. 22 (1989) 817–824. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(89)80091-8.

[11] S.P. Burke, T.E.W. Schumann, Diffusion Flames, Ind. Eng. Chem. 20 (1928) 998–1004. https://doi.org/10.1021/ie50226a005.

[12] D. Veynante, L. Vervisch, Turbulent combustion modeling, Prog. Energy Combust. Sci. 28 (2002) 193–266. https://doi.org/10.1016/S0360-1285(01)00017-X.

[13] H. Phillips, Flame in a buoyant methane layer, Symp. Int. Combust. 10 (1965) 1277–1283. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(65)80262-4.

[14] J.M. Donbar, J.F. Driscoll, C.D. Carter, Reaction zone structure in turbulent nonpremixed jet flames—from CH-OH PLIF images, Combust. Flame. 122 (2000) 1–19. https://doi.org/10.1016/S0010-2180(00)00098-5.

[15] M. Rullaud, Modélisation de la combustion turbulente via une méthode de tabulation de la cinétique chimique détaillée couplée à des fonctions densités de probabilité et application aux foyers aéronautiques., INSA Rouen, 2004.

[16] G.R. Ruetsch, L. Vervisch, A. Liñán, Effects of heat release on triple flames, Phys. Fluids. 7 (1995) 1447–1454. https://doi.org/10.1063/1.868531.

[17] N.I. Kim, J.I. Seo, K.C. Oh, H.D. Shin, Lift-off characteristics of triple flame with concentration gradient, Proc. Combust. Inst. 30 (2005) 367–374. https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.07.001.

[18] J.W. Dold, Flame propagation in a nonuniform mixture: Analysis of a slowly varying Triple Flame, Combust. Flame. 76 (1989) 71–88. https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90079-5.

[19] P.N. Kioni, B. Rogg, K.N.C. Bray, A. Liñán, Flame spread in laminar mixing layers: The triple flame, Combust. Flame. 95 (1993) 276–290. https://doi.org/10.1016/0010-2180(93)90132-M.

[20] R. Schefer, Mechanism of Flame Stabilization in Turbulent, Lifted-Jet Flames, Combust. Flame. 112 (1998) 559–574. https://doi.org/10.1016/S0010-2180(97)00130-2.
[21] S. Ghosal, L. Vervisch, Stability diagram for lift-off and blowout of a round jet laminar diffusion flame, Combust. Flame. 124 (2001) 646–655. https://doi.org/10.1016/S0010-2180(00)00224-8.
[22] D. Lalmi, R. Hadef, Study of Swirl Contribution to Stabilization Turbulent Diffusion Flame, in: Z. Driss, B. Necib, H.-C. Zhang (Eds.), CFD Tech. Energy Appl., Springer International Publishing, Cham, 2018: pp. 179–194. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70950-5_9.
[23] S.A. Said, M. Aliyu, M.A. Nemitallah, M.A. Habib, I.B. Mansir, Experimental investigation of the stability of a turbulent diffusion flame in a gas turbine combustor, Energy. 157 (2018) 904–913. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.177.
[24] L.G. Becker, H. Kosaka, B. Böhm, S. Doost, R. Knappstein, M. Habermehl, R. Kneer, J. Janicka, A. Dreizler, Experimental investigation of flame stabilization inside the quarl of an oxyfuel swirl burner, Fuel. 201 (2017) 124–135. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.002.
[25] R. Jarpala, N.V.S. Aditya Burle, M. Voleti, R. Sadanandan, Effect of Swirl on the Flame Dynamics and Pollutant Emissions in an Ultra-Lean Non-Premixed Model Gas Turbine Burner, Combust. Sci. Technol. 189 (2017) 1832–1848. https://doi.org/10.1080/00102202.2017.1333500.
[26] S. Seepana, S. Jayanti, Experimental studies of flame extinction in a swirl-stabilized oxy-fuel burner, Fuel. 93 (2012) 75–81. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.065.
[27] Y. Huang, V. Yang, Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion, Prog. Energy Combust. Sci. 35 (2009) 293–364. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.01.002.
[28] H.J. Sheen, W.J. Chen, S.Y. Jeng, Recirculation zones of unconfined and confined annular swirling jets, AIAA J. 34 (1996) 572–579. https://doi.org/10.2514/3.13106.
[29] G. Monnot, ed., La Combustion dans les fours et les chaudières, Technip, Paris, 1978.
[30] P. Basu, Boilers and burners: design and theory., Springer, Place of publication not identified, 2013.
[31] P. Basu, K. Cen, L. Jestin, Boilers and burners: design and theory, Springer, New York, 2000.
[32] E. Gutiérrez-Arnillas, M.S. Álvarez, F.J. Deive, A. Rodríguez, M.Á. Sanromán, New horizons in the enzymatic production of biodiesel using neoteric solvents, Renew. Energy. 98 (2016) 92–100. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.058.
[33] T. Mathimani, T. Senthil Kumar, M. Chandrasekar, L. Uma, D. Prabaharan, Assessment of fuel properties, engine performance and emission characteristics of outdoor grown marine Chlorella vulgaris BDUG 91771 biodiesel, Renew. Energy. 105 (2017) 637–646. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.090.
[34] J.C.M. Pires, COP21: The algae opportunity?, Renew. Sustain. Energy Rev. 79 (2017) 867–877. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.197.
[35] Y.S. Pradana, H. Sudibyo, E.A. Suyono, Indarto, A. Budiman, Oil Algae Extraction of Selected Microalgae Species Grown in Monoculture and Mixed Cultures for Biodiesel Production, Energy Procedia. 105 (2017) 277–282. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.314.
[36] O.S. Akinyemi, L. Jiang, R. Hernandez, C. McIntyre, W. Holmes, Combustion of straight algae oil in a swirl-stabilized burner using a novel twin-fluid injector, Fuel. 241 (2019) 176–187. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.006.

[37] J. Cheng, X. Lai, Q. Ye, W. Guo, J. Xu, W. Ren, J. Zhou, A novel jet-aerated tangential swirling-flow plate photobioreactor generates microbubbles that enhance mass transfer and improve microalgal growth, Bioresour. Technol. 288 (2019) 121531. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121531.
[38] A.K. Gupta, D.G. Lilley, N. Syred, Swirl flows, Abacus Press, Tunbridge Wells, Kent, 1984.
[39] N.A. Chigier, A. Chervinsky, Experimental Investigation of Swirling Vortex Motion in Jets, J. Appl. Mech. 34 (1967) 443–451. https://doi.org/10.1115/1.3607703.
[40] M. Ben-Yeoshua, Coaxial jets with swirl, The University of Arizona., 1993. http://hdl.handle.net/10150/291734.
[41] D. Galley, S. Ducruix, F. Lacas, D. Veynante, Mixing and stabilization study of a partially premixed swirling flame using laser induced fluorescence, Combust. Flame. 158 (2011) 155–171. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.08.004.
[42] T.C. Claypole, N. Syred, The effect of swirl burner aerodynamics on NOx formation, Symp. Int. Combust. 18 (1981) 81–89. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(81)80013-6.
[43] D.G. Lilley, Swirl Flows in Combustion: A Review, AIAA J. 15 (1977) 1063–1078. https://doi.org/10.2514/3.60756.
[44] N. Syred, J.M. Beér, Combustion in swirling flows: A review, Combust. Flame. 23 (1974) 143–201. https://doi.org/10.1016/0010-2180(74)90057-1.
[45] A. Degenève, P. Jourdaine, C. Mirat, J. Caudal, R. Vicquelin, T. Schuller, Effects of a Diverging Cup on Swirl Number, Flow Pattern, and Topology of Premixed Flames, J. Eng. Gas Turbines Power. 141 (2019). https://doi.org/10.1115/1.4041518.
[46] P. Palies, Dynamique et instabilités de combustion des flammes swirlées, PhD Thesis, 2010.
[47] K. Li, R.S. Tankin, A Study of Cold and Combusting Flow Around Bluff-Body Combustors, Combust. Sci. Technol. 52 (1987) 173–206. https://doi.org/10.1080/00102208708952576.
[48] T. Karimipanah, Turbulent jets in confined spaces: application in mixing ventilation : experimental and numerical studies, 1996.
[49] N.A. Chigier, Gasdynamics of swirling flow in combustion systems, Astronaut. Acta. 17 (1972) 387–95.
[50] X. Yang, Z. He, Q. Niu, S. Dong, H. Tan, Numerical analysis of turbulence radiation interaction effect on radiative heat transfer in a swirling oxyfuel furnace, Int. J. Heat Mass Transf. 141 (2019) 1227–1237. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.060.
[51] Y. Tong, X. Liu, Z. Wang, M. Richter, J. Klingmann, Experimental and numerical study on bluff-body and swirl stabilized diffusion flames, Fuel. 217 (2018) 352–364. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.061.
[52] M. Dutka, M. Ditaranto, T. Løvås, NOx emissions and turbulent flow field in a partially premixed bluff body burner with CH4 and H2 fuels, Int. J. Hydrog. Energy. 41 (2016) 12397–12410. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.154.
[53] J.M. Beér, N.A. Chigier, Combustion aerodynamics, Halsted Press Division, Wiley, New York, 1972.
[54] S. Yuasa, Effects of swirl on the stability of jet diffusion flames, Combust. Flame. 66 (1986) 181–192. https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90090-8.
[55] S. Leibovich, The Structure of Vortex Breakdown, Annu. Rev. Fluid Mech. 10 (1978) 221–246. https://doi.org/10.1146/annurev.fl.10.010178.001253.
[56] F. Novak, T. Sarpkaya, Turbulent Vortex Breakdown at High Reynolds Numbers, AIAA J. 38 (2000) 825–834. https://doi.org/10.2514/2.1036.

[57] O. Stein, A. Kempf, LES of the Sydney swirl flame series: A study of vortex breakdown in isothermal and reacting flows, Proc. Combust. Inst. 31 (2007) 1755–1763. https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.255.
[58] W. Jerzak, M. Kuźnia, Experimental study of impact of swirl number as well as oxygen and carbon dioxide content in natural gas combustion air on flame flashback and blow-off, J. Nat. Gas Sci. Eng. 29 (2016) 46–54. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.12.054.
[59] I.K. Toh, D. Honnery, J. Soria, Axial plus tangential entry swirling jet, Exp. Fluids. 48 (2010) 309–325. https://doi.org/10.1007/s00348-009-0734-2.
[60] P.L. Therkelsen, D. Littlejohn, R.K. Cheng, J.E. Portillo, S.M. Martin, Effect of Combustor Inlet Geometry on Acoustic Signature and Flow Field Behavior of the Low Swirl Injector, in: ASMEDC, 2010: pp. 1183–1194. https://doi.org/10.1115/GT2010-23498.
[61] A.M. Elbaz, W.L. Roberts, Investigation of the effects of quarl and initial conditions on swirling non-premixed methane flames: Flow field, temperature, and species distributions, Fuel. 169 (2016) 120–134. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.015.
[62] M. Stöhr, K. Oberleithner, M. Sieber, Z. Yin, W. Meier, Experimental Study of Transient Mechanisms of Bistable Flame Shape Transitions in a Swirl Combustor, J. Eng. Gas Turbines Power. 140 (2018). https://doi.org/10.1115/1.4037724.
[63] U. Stopper, W. Meier, R. Sadanandan, M. Stöhr, M. Aigner, G. Bulat, Experimental study of industrial gas turbine flames including quantification of pressure influence on flow field, fuel/air premixing and flame shape, Combust. Flame. 160 (2013) 2103–2118. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.04.005.
[64] S. Taamallah, C. Shen, Z. Labry, S. Shanbhogue, M.A. Habib, A. Ghoniem, Correspondence Between “Stable” Flame Macrostructure and Thermo-acoustic Instability in Premixed Swirl-Stabilized Turbulent Combustion, J. Eng. Gas Turbines Power. 137 (2015).
[65] M.P. Escudier, J.J. Keller, Recirculation in swirling flow - A manifestation of vortex breakdown, AIAA J. 23 (1985) 111–116. https://doi.org/10.2514/3.8878.
[66] Q. An, A.M. Steinberg, The role of strain rate, local extinction, and hydrodynamic instability on transition between attached and lifted swirl flames, Combust. Flame. 199 (2019) 267–278. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.10.029.
[67] N. Syred, A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems, Prog. Energy Combust. Sci. 32 (2006) 93–161. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.10.002.
[68] A.E.E. Khalil, A.K. Gupta, Towards distributed combustion for ultra low emission using swirling and non-swirling flowfields, Appl. Energy. 121 (2014) 132–139. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.081.
[69] A. Mechline, Etude de l’extension du régime de combustion sans flamme aux mélanges Méthane/Hydrogène et aux environnements à basse température, INSA de Rouen, 2013.
[70] A.E.E. Khalil, A.K. Gupta, Toward ultra-low emission distributed combustion with fuel air dilution, Appl. Energy. 148 (2015) 187–195. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.066.
[71] T.S. Cheng, Y.-C. Chao, D.-C. Wu, T. Yuan, C.-C. Lu, C.-K. Cheng, J.-M. Chang, Effects of fuel-air mixing on flame structures and NOx emissions in swirling methane jet flames, Symp. Int. Combust. 27 (1998) 1229–1237. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80527-4.
[72] P. Schmittel, B. Günther, B. Lenze, W. Leuckel, H. Bockhorn, Turbulent swirling flames: Experimental investigation of the flow field and formation of nitrogen oxide,

Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 303–309. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80224-6.
[73] A. Coghe, G. Solero, G. Scribano, Recirculation phenomena in a natural gas swirl combustor, Exp. Therm. Fluid Sci. 28 (2004) 709–714. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2003.12.007.
[74] M. Costa, M. Burguette, NOx emissions from unconfined swirl flames, in: Porto, 2006.
[75] S.A. Abdul-Wahab, Y. Charabi, R. Al-Maamari, G.A. Al-Rawas, A. Gastli, K. Chan, CO2 greenhouse emissions in Oman over the last forty-two years: Review, Renew. Sustain. Energy Rev. 52 (2015) 1702–1712. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.193.
[76] D.A. Lashof, D.R. Ahuja, Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming, Nature. 344 (1990) 529–531. https://doi.org/10.1038/344529a0.
[77] M. Domroes, A. El-Tantawi, Recent temporal and spatial temperature changes in Egypt, Int. J. Climatol. 25 (2005) 51–63. https://doi.org/10.1002/joc.1114.
[78] P. Jaramillo, W.M. Griffin, H.S. Matthews, Comparative Life-Cycle Air Emissions of Coal, Domestic Natural Gas, LNG, and SNG for Electricity Generation, Environ. Sci. Technol. 41 (2007) 6290–6296. https://doi.org/10.1021/es063031o.
[79] K. Skalska, J.S. Miller, S. Ledakowicz, Trends in NOx abatement: A review, Sci. Total Environ. 408 (2010) 3976–3989. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.001.
[80] P. Gokulakrishnan, M.S. Klassen, NOx and CO Formation and Control, in: T.C. Lieuwen, V. Yang (Eds.), Gas Turbine Emiss., Cambridge University Press, Cambridge, 2013: pp. 175–208. https://doi.org/10.1017/CBO9781139015462.011.
[81] G.G. De Soete, Mécanismes de formation et de destruction des oxydes d'azote dans la combustion, Revue générale de thermique, Rev. Générale Therm. 21 (1989) 330–331.
[82] Y. Zeldovich, D. Frank-Kamenetskii, P. Sadovnikov, Oxidation of Nitrogen in Combustion, Publishing House of the Acad of Sciences of USSR, 1947. https://books.google.fr/books?id=cCSePgAACAAJ.
[83] C.P. Fenimore, Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames, Symp. Int. Combust. 13 (1971) 373–380. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1.
[84] J.W. Bozzelli, A.M. Dean, O + NNH: A possible new route for NOX formation in flames, Int. J. Chem. Kinet. 27 (1995) 1097–1109. https://doi.org/10.1002/kin.550271107.
[85] C.T. Bowman, Kinetics of pollutant formation and destruction in combustion, Prog. Energy Combust. Sci. 1 (1975) 33–45. https://doi.org/10.1016/0360-1285(75)90005-2.
[86] M. Skottene, K.E. Rian, A study of NOxNOx formation in hydrogen flames, Int. J. Hydrog. Energy. 32 (2007) 3572–3585. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.02.038.
[87] G.J. Rørtveit, K. Zepter, Ø. Skreiberg, M. Fossum, J.E. Hustad, A comparison of low-NOx burners for combustion of methane and hydrogen mixtures, Proc. Combust. Inst. 29 (2002) 1123–1129. https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80142-0.
[88] O. Boudouard, Sur la décomposition de l'oxyde de carbone en présence des oxymetalliques, 128 (1899) 1522–5.
[89] O. Mathieu, C.R. Mulvihill, E.L. Petersen, Assessment of modern detailed kinetics mechanisms to predict CO formation from methane combustion using shock-tube laser-absorption measurements, Fuel. 236 (2019) 1164–1180. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.029.
[90] T. Le Cong, P. Dagaut, Experimental and Detailed Modeling Study of the Effect of Water Vapor on the Kinetics of Combustion of Hydrogen and Natural Gas, Impact on NO_x, Energy Fuels. 23 (2009) 725–734. https://doi.org/10.1021/ef800832q.
[91] C.-W. Zhou, Y. Li, U. Burke, C. Banyon, K.P. Somers, S. Ding, S. Khan, J.W. Hargis, T. Sikes, O. Mathieu, E.L. Petersen, M. AlAbbad, A. Farooq, Y. Pan, Y. Zhang, Z. Huang, J. Lopez, Z. Loparo, S.S. Vasu, H.J. Curran, An experimental and chemical

kinetic modeling study of 1,3-butadiene combustion: Ignition delay time and laminar flame speed measurements, Combust. Flame. 197 (2018) 423–438. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.08.006.
[92] G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, et al, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/., (n.d.).
[93] M. Aneke, M. Wang, Process analysis of pressurized oxy-coal power cycle for carbon capture application integrated with liquid air power generation and binary cycle engines, Appl. Energy. 154 (2015) 556–566. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.030.
[94] C.E. Baukal, ed., Oxygen-enhanced combustion, Second edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2013.
[95] T. Boushaki, Du contrôle passif au contrôle actif : application à l'oxy-combustion dans des brûleurs à jets séparés, INSA Rouen, 2007.
[96] J. Baukal, heat transfer in industrial combustion., crc press, S.l., 2000.
[97] N. Merlo, Caractérisation expérimentale d'une flamme turbulente non prémélangée swirlée : effet de l'enrichissement en oxygène, UNIVERSITÉ D'ORLÉANS, 2015. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01207173.
[98] Y. Hu, CO2 capture from oxy-fuel combustion power plants, KTH Royal Institute of Technology School of Chemical Science and Engineering Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes, 2011.
[99] S. de Persis, F. Foucher, L. Pillier, V. Osorio, I. Gökalp, Effects of O2 enrichment and CO2 dilution on laminar methane flames, Energy. 55 (2013) 1055–1066. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.041.
[100] J.D. Figueroa, T. Fout, S. Plasynski, H. McIlvried, R.D. Srivastava, Advances in CO2 capture technology—The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program, Int. J. Greenh. Gas Control. 2 (2008) 9–20. https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00094-1.
[101] C.Y. Liu, G. Chen, N. Sipöcz, M. Assadi, X.S. Bai, Characteristics of oxy-fuel combustion in gas turbines, Appl. Energy. 89 (2012) 387–394. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.004.
[102] M.A. Nemitallah, M.A. Habib, Experimental and numerical investigations of an atmospheric diffusion oxy-combustion flame in a gas turbine model combustor, Appl. Energy. 111 (2013) 401–415. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.027.
[103] S.S. Rashwan, Abdelmaged H. Ibrahim Essawey, Tharwat W. Abouarab, Experimental Investigation of Oxy-fuel combustion of CNG Flames Stabilized over A Perforated Plate Burner, Unpublished. (2015). https://doi.org/10.13140/rg.2.1.3537.9686.
[104] P.H. Joo, M.R.J. Charest, C.P.T. Groth, Ö.L. Gülder, Comparison of structures of laminar methane–oxygen and methane–air diffusion flames from atmospheric to 60atm, Combust. Flame. 160 (2013) 1990–1998. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.04.030.
[105] X. Yang, A. Clements, J. Szuhánszki, X. Huang, O. Farias Moguel, J. Li, J. Gibbins, Z. Liu, C. Zheng, D. Ingham, L. Ma, B. Nimmo, M. Pourkashanian, Prediction of the radiative heat transfer in small and large scale oxy-coal furnaces, Appl. Energy. 211 (2018) 523–537. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.070.
[106] X. Yang, Z. He, S. Dong, H. Tan, Prediction of turbulence radiation interactions of CH4H2/air turbulent flames at atmospheric and elevated pressures, Int. J. Hydrog. Energy. 43 (2018) 15537–15550. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.060.
[107] H. Xu, F. Liu, S. Sun, Y. Zhao, S. Meng, W. Tang, Effects of H2O and CO2 diluted oxidizer on the structure and shape of laminar coflow syngas diffusion flames,

Combust. Flame. 177 (2017) 67–78. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.12.001.
[108] J. Oh, D. Noh, The effect of CO2 addition on the flame behavior of a non-premixed oxy-methane jet in a lab-scale furnace, Fuel. 117 (2014) 79–86. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.065.
[109] J. Min, F. Baillot, Experimental investigation of the flame extinction processes of nonpremixed methane flames inside an air coflow diluted with CO2, N2, or Ar, Combust. Flame. 159 (2012) 3502–3517. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.05.015.
[110] C. Cohé, C. Chauveau, I. Gökalp, D.F. Kurtuluş, CO2 addition and pressure effects on laminar and turbulent lean premixed CH4 air flames, Proc. Combust. Inst. 32 (2009) 1803–1810. https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.181.
[111] Y.L. Chan, M.M. Zhu, Z.Z. Zhang, P.F. Liu, D.K. Zhang, The Effect of CO2 Dilution on the Laminar Burning Velocity of Premixed Methane/Air Flames, Energy Procedia. 75 (2015) 3048–3053. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.621.
[112] A. Nair, R.K. Velamati, S. Kumar, Effect OF CO2/N2 dilution on laminar burning velocity of liquid petroleum gas-air mixtures at elevated temperatures, Energy. 100 (2016) 145–153. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.094.
[113] J. Park, J.S. Park, H.P. Kim, J.S. Kim, S.C. Kim, J.G. Choi, H.C. Cho, K.W. Cho, H.S. Park, NO Emission Behavior in Oxy-fuel Combustion Recirculated with Carbon Dioxide, Energy Fuels. 21 (2007) 121–129. https://doi.org/10.1021/ef060309p.
[114] J. Branco, P.J. Coelho, M. Costa, Experimental and numerical investigation of turbulent diffusion flames in a laboratory combustor with a slot burner, Fuel. 175 (2016) 182–190. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.046.
[115] J.I. Erete, K.J. Hughes, L. Ma, M. Fairweather, M. Pourkashanian, A. Williams, Effect of CO2 dilution on the structure and emissions from turbulent, non-premixed methane–air jet flames, J. Energy Inst. 90 (2017) 191–200. https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.02.004.
[116] L. Qiao, Y. Gan, T. Nishiie, W.J.A. Dahm, E.S. Oran, Extinction of premixed methane/air flames in microgravity by diluents: Effects of radiation and Lewis number, Combust. Flame. 157 (2010) 1446–1455. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.04.004.
[117] P. Glarborg, L.L.B. Bentzen, Chemical Effects of a High CO_2 Concentration in Oxy-Fuel Combustion of Methane, Energy Fuels. 22 (2008) 291–296. https://doi.org/10.1021/ef7005854.
[118] J. Billaud, S. Valin, M. Peyrot, S. Salvador, Influence of H2O, CO2 and O2 addition on biomass gasification in entrained flow reactor conditions: Experiments and modelling, Fuel. 166 (2016) 166–178. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.046.
[119] F. Liu, A.E. Karataş, Ö.L. Gülder, M. Gu, Numerical and experimental study of the influence of CO2 and N2 dilution on soot formation in laminar coflow C2H4/air diffusion flames at pressures between 5 and 20atm, Combust. Flame. 162 (2015) 2231–2247. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.01.020.
[120] P. Jourdaine, C. Mirat, J. Caudal, A. Lo, T. Schuller, A comparison between the stabilization of premixed swirling CO_2-diluted methane oxy-flames and methane/air flames, Fuel. 201 (2017) 156–164. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.017.
[121] H. Kobayashi, S. Yata, Y. Ichikawa, Y. Ogami, Dilution effects of superheated water vapor on turbulent premixed flames at high pressure and high temperature, Proc. Combust. Inst. 32 (2009) 2607–2614. https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.05.078.

[122] A.N. Mazas, B. Fiorina, D.A. Lacoste, T. Schuller, Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames, Combust. Flame. 158 (2011) 2428–2440. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.05.014.
[123] B. Galmiche, F. Halter, F. Foucher, P. Dagaut, Effects of Dilution on Laminar Burning Velocity of Premixed Methane/Air Flames, Energy Fuels. 25 (2011) 948–954. https://doi.org/10.1021/ef101482d.
[124] T. Boushaki, Y. Dhué, L. Selle, B. Ferret, T. Poinsot, Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: Experimental and numerical analysis, Int. J. Hydrog. Energy. 37 (2012) 9412–9422. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.037.
[125] N. Donohoe, K.A. Heufer, C.J. Aul, E.L. Petersen, G. Bourque, R. Gordon, H.J. Curran, Influence of steam dilution on the ignition of hydrogen, syngas and natural gas blends at elevated pressures, Combust. Flame. 162 (2015) 1126–1135. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.10.005.
[126] A.K. Das, K. Kumar, C.-J. Sung, Laminar flame speeds of moist syngas mixtures, Combust. Flame. 158 (2011) 345–353. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.09.004.
[127] D.G. Pugh, P.J. Bowen, R. Marsh, A.P. Crayford, J. Runyon, S. Morris, A. Valera-Medina, A. Giles, Dissociative influence of H2O vapour/spray on lean blowoff and NOx reduction for heavily carbonaceous syngas swirling flames, Combust. Flame. 177 (2017) 37–48. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.11.010.
[128] X. Chen, Y. Huang, M. Gan, X. Fan, Z. Yu, L. Yuan, Effect of H2O(g) Content in Circulating Flue Gas on Iron Ore Sintering with Flue Gas Recirculation, J. Iron Steel Res. Int. 22 (2015) 1107–1112. https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)30119-9.
[129] X. Gu, S.S. Zang, B. Ge, Effect on flow field characteristics in methane–air non-premixed flame with steam addition, Exp. Fluids. 41 (2006) 829–837. https://doi.org/10.1007/s00348-006-0207-9.
[130] S. Meng, S. Sun, H. Xu, Y. Guo, D. Feng, Y. Zhao, P. Wang, Y. Qin, The effects of water addition on the laminar flame speeds of CO/H2/O2/H2O mixtures, Int. J. Hydrog. Energy. 41 (2016) 10976–10985. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.251.
[131] P. Sabia, M. Lubrano Lavadera, P. Giudicianni, G. Sorrentino, R. Ragucci, M. de Joannon, CO2 and H2O effect on propane auto-ignition delay times under mild combustion operative conditions, Combust. Flame. 162 (2015) 533–543. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.08.009.
[132] W. Zhang, X. Gou, Z. Chen, Effects of water vapor dilution on the minimum ignition energy of methane, n-butane and n-decane at normal and reduced pressures, Fuel. 187 (2017) 111–116. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.057.
[133] J.P. Chica Cano, G. Cabot, F. Foucher, S. de Persis, Effects of oxygen enrichment and water dilution on laminar methane flames at high pressure, Fuel. 225 (2018) 499–508. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.112.
[134] A. Amato, J.M. Seitzman, T.C. Lieuwen, Emissions from Oxyfueled or High-Exhaust Gas Recirculation Turbines, in: T.C. Lieuwen, V. Yang (Eds.), Gas Turbine Emiss., Cambridge University Press, Cambridge, 2013: pp. 209–234. https://doi.org/10.1017/CBO9781139015462.012.
[135] D.A. Knyazkov, A.G. Shmakov, I.V. Dyakov, O.P. Korobeinichev, J. De Ruyck, A.A. Konnov, Formation and destruction of nitric oxide in methane flames doped with NO at atmospheric pressure, Proc. Combust. Inst. 32 (2009) 327–334. https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.037.

[136] A. Matynia, J.-L. Delfau, L. Pillier, C. Vovelle, Comparative study of the influence of CO2 and H2O on the chemical structure of lean and rich methane-air flames at atmospheric pressure, Combust. Explos. Shock Waves. 45 (2009) 635–645. https://doi.org/10.1007/s10573-009-0078-5.
[137] Z.L. Wei, C.W. Leung, C.S. Cheung, Z.H. Huang, Effects of equivalence ratio, H2 and CO2 addition on the heat release characteristics of premixed laminar biogas-hydrogen flame, Int. J. Hydrog. Energy. 41 (2016) 6567–6580. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.170.
[138] Y. Minamoto, N. Swaminathan, Scalar gradient behaviour in MILD combustion, Combust. Flame. 161 (2014) 1063–1075. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.10.005.
[139] R. Salzmann, T. Nussbaumer, Fuel Staging for NO_x Reduction in Biomass Combustion: Experiments and Modeling, Energy Fuels. 15 (2001) 575–582. https://doi.org/10.1021/ef0001383.
[140] M. Brower, E.L. Petersen, W. Metcalfe, H.J. Curran, M. Füri, G. Bourque, N. Aluri, F. Güthe, Ignition Delay Time and Laminar Flame Speed Calculations for Natural Gas/Hydrogen Blends at Elevated Pressures, J. Eng. Gas Turbines Power. 135 (2013). https://doi.org/10.1115/1.4007763.
[141] O. Park, E.M. Fisher, Effect of Oxycombustion Diluents on the Extinction of Nonpremixed Methane Opposed-Jet Flames, Combust. Sci. Technol. 188 (2016) 370–388. https://doi.org/10.1080/00102202.2015.1119821.
[142] T. Griffin, D. Bücker, A. Pfeffer, Technology Options for Gas Turbine Power Generation With Reduced CO[sub 2] Emission, J. Eng. Gas Turbines Power. 130 (2008) 041801. https://doi.org/10.1115/1.2898717.
[143] T.F. Wall, Combustion processes for carbon capture, Proc. Combust. Inst. 31 (2007) 31–47. https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.08.123.
[144] A.C.A. Lipardi, P. Versailles, G.M.G. Watson, G. Bourque, J.M. Bergthorson, Experimental and numerical study on NO x formation in CH 4 –air mixtures diluted with exhaust gas components, Combust. Flame. 179 (2017) 325–337. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.02.009.
[145] A. Olivani, Thermo-fluid-dynamic Analysis of Methane/Hydrogen/Air Mixtures Under Reacting Conditions by Laser Diagnostics, Politecnico di Milano - Université d'Orléans, 2006.
[146] D. Honoré, Advanced measurements in industrial combustion systems, in: 2007.
[147] J. Kojima, Y. Ikeda, T. Nakajima, Spatially resolved measurement of OH*, CH*, and C2* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames, Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 1757–1764. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80577-9.
[148] C. Rottier, Etude expérimentale de l'influence des mélanges gazeux sur la combustion sans flamme, INSA de Rouen, 2010.
[149] F. Chen, H. Liu, Particle image velocimetry for combustion measurements: Applications and developments, Chin. J. Aeronaut. 31 (2018) 1407–1427. https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.05.010.
[150] R.E. Altenhofen, Manual of photogrammetry, American Society of Photogrammetry, Washington DC, 1952.
[151] M. Raffel, C.E. Willert, F. Scarano, C.J. Kähler, S.T. Wereley, J. Kompenhans, Particle image velocimetry: a practical guide, Third edition, Springer, Cham, 2018.
[152] C. Tropea, A.L. Yarin, J.F. Foss, eds., Springer handbook of experimental fluid mechanics: with ... 123 tables, Springer, Berlin, 2007.

[153] A. Boutier, Vélocimétrie laser pour la mécanique des fluides, Lavoisier : Hermes Science publ., Cachan, 2012.
[154] Rotexo-Cosilab GmbH & Co. KG, Bad Zwischenahn, Germany, COSILAB ; The Combustion Simulation Laboratory, Www.Rotexo.Com. (2009).
[155] K. Bosschaart, Detailed analysis of the heat flux method for measuring burning velocities, Combust. Flame. 132 (2003) 170–180. https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00433-9.
[156] F.H.V. Coppens, J. De Ruyck, A.A. Konnov, Effects of hydrogen enrichment on adiabatic burning velocity and NO formation in methane+air flames, Exp. Therm. Fluid Sci. 31 (2007) 437–444. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.04.012.
[157] F. Halter, C. Chauveau, N. Djebaïli-Chaumeix, I. Gökalp, Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures, Proc. Combust. Inst. 30 (2005) 201–208. https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.195.
[158] C.M. Vagelopoulos, F.N. Egolfopoulos, Direct experimental determination of laminar flame speeds, Symp. Int. Combust. 27 (1998) 513–519. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80441-4.
[159] J.N. Gomes, J.D. Kribs, K.M. Lyons, Stability and Blowout Behavior of Jet Flames in Oblique Air Flows, J. Combust. 2012 (2012) 1–9. https://doi.org/10.1155/2012/218916.
[160] Y. Tong, M. Li, M. Thern, J. Klingmann, W. Weng, S. Chen, Z. Li, Experimental Investigation on Effects of Central Air Jet on the Bluff-body Stabilized Premixed Methane-air Flame, Energy Procedia. 107 (2017) 23–32. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.125.
[161] W.M. Roquemore, R.S. Tankin, H.H. Chiu, S.A. Lottes, A study of a bluff-body combustor using laser sheet lighting, Exp. Fluids. 4 (1986) 205–213. https://doi.org/10.1007/BF00717816.
[162] A.H. Lefebvre, D.R. Ballal, Gas turbine combustion alternative fuels and emissions, Taylor & Francis, Boca Raton [u.a., 2010. http://marc.crcnetbase.com/isbn/9781420086058 (accessed January 12, 2020).
[163] I. Esquiva-Dano, H.T. Nguyen, D. Escudie, Influence of a bluff-body's shape on the stabilization regime of non-premixed flames, Combust. Flame. 127 (2001) 2167–2180. https://doi.org/10.1016/S0010-2180(01)00318-2.
[164] M. Kröner, J. Fritz, T. Sattelmayer, Flashback Limits for Combustion Induced Vortex Breakdown in a Swirl Burner, J. Eng. Gas Turbines Power. 125 (2003) 693–700. https://doi.org/10.1115/1.1582498.
[165] Y. Xie, J. Wang, M. Zhang, J. Gong, W. Jin, Z. Huang, Experimental and Numerical Study on Laminar Flame Characteristics of Methane Oxy-fuel Mixtures Highly Diluted with CO_2, Energy Fuels. 27 (2013) 6231–6237. https://doi.org/10.1021/ef401220h.
[166] H. Watanabe, S.J. Shanbhogue, S. Taamallah, N.W. Chakroun, A.F. Ghoniem, The structure of swirl-stabilized turbulent premixed CH4/air and CH4/O2/CO2 flames and mechanisms of intense burning of oxy-flames, Combust. Flame. 174 (2016) 111–119. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.09.015.
[167] E. Albin, H. Nawroth, S. Göke, Y. D'Angelo, C.O. Paschereit, Experimental investigation of burning velocities of ultra-wet methane–air–steam mixtures, Fuel Process. Technol. 107 (2013) 27–35. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.06.027.
[168] Parlement européen et Conseil relative aux émissions industrielles, Directive 2010/75/UE, (2012).
[169] T. Boushaki, N. Merlo, C. Chauveau, I. Gökalp, Study of pollutant emissions and dynamics of non-premixed turbulent oxygen enriched flames from a swirl burner, Proc. Combust. Inst. 36 (2017) 3959–3968. https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.046.

[170] K.-H. Yang, H.-Y. Shih, NO formation of opposed-jet syngas diffusion flames: Strain rate and dilution effects, Int. J. Hydrog. Energy. 42 (2017) 24517–24531. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.137.
[171] E.Al. Tingas, D.C. Kyritsis, D.A. Goussis, Algorithmic determination of the mechanism through which H2O-dilution affects autoignition dynamics and NO formation in CH4/air mixtures, Fuel. 183 (2016) 90–98. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.057.
[172] F. Xie, W. Hong, Y. Su, M. Zhang, B. Jiang, Effect of external hot EGR dilution on combustion, performance and particulate emissions of a GDI engine, Energy Convers. Manag. 142 (2017) 69–81. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.045.
[173] R.W.B. Pearse, A.G. Gaydon, The identification of molecular spectra, Chapman & Hall, London, 1976.
[174] http://www.specair-radiation.net, (n.d.).
[175] S. Ishizuka, Flame propagation along a vortex axis, Prog. Energy Combust. Sci. 28 (2002) 477–542. https://doi.org/10.1016/S0360-1285(02)00019-9.
[176] S. Wei, M. Yu, B. Pei, Z. Zhu, Z. Zhang, Suppression of CO2 and H2O on the cellular instability of premixed methane/air flame, Fuel. 264 (2020) 116862. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116862.

Hajar ZAIDAOUI

Étude des flammes turbulentes non prémélangées stabilisées par un swirler : Effets de la recirculation des gaz de combustion et de l'enrichissement à l'oxygène.

La recirculation des gaz d'échappement (EGR « Exhaust Gaz Recirculation ») est devenue une norme pour certains systèmes de combustion. L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets de la recirculation des gaz de combustion et l'enrichissement à l'oxygène sur une flamme turbulente swirlée non prémélangée CH_4/air. Cette investigation se focalise sur la stabilité de la flamme, les émissions polluantes (NO_X et CO) ainsi que la dynamique de l'écoulement. La technique (EGR) consiste à rediriger une partie des gaz de combustion dans le four ou le brûleur afin de modifier les conditions dans la zone de combustion en abaissant la température de la flamme dans le but de réduire la formation des NO_X. En revanche, la stabilité et la dynamique de la flamme peuvent être affectées de manière préjudiciable dans certaines conditions. L'enrichissement à l'oxygène permet alors d'obtenir un compromis entre la réduction des émissions polluantes, d'une part, et la stabilité de la flamme, d'autre part. L'étude dynamique permet d'apporter des éléments de réponses sur les évolutions des émissions polluantes et sur le comportement et la stabilité de la flamme.

Différentes techniques et diagnostics optiques sont mis en œuvre. La stabilité et la structure de la flamme sont traitées par la technique de la chimiluminescence OH*, les émissions polluantes sont mesurées à travers des analyseurs multigaz et l'étude dynamique est effectuée par deux différentes techniques : LDV-2D et stéréo-PIV. Plusieurs paramètres opératoires sont mis en jeux : le nombre de swirl (0,8-1,4), la richesse globale à l'injection (0,8-1), le taux d'enrichissement à l'oxygène (21-30 %vol dans l'air) et le taux de dilution en CO_2 et/ou H_2O (0-20 %vol dans l'oxydant).

Mots clés : Combustion non-prémélangée, Flamme swirlée, Recirculation des gaz de combustion, Enrichissement en oxygène, Diagnostics laser, Stéréo-PIV.

Investigation of swirl-stabilized non-premixed turbulent flames: Effects of exhaust gas recirculation and oxygen enrichment.

Exhaust gas recirculation (EGR) has become a standard for some combustion systems. The objective of this study is to assess the effects of recirculation of combustion gases and oxygen enrichment on a turbulent swirled non-premixed CH_4/air flame. This investigation focuses on the flame stability, the pollutant emissions (NO_X and CO) as well as the dynamics of the flow. The technique (EGR) consists in redirecting part of the combustion gases in the furnace or the burner in order to modify the conditions in the combustion zone by lowering flame temperature in order to reduce NO_X formation. However, the stability and the dynamics of flame can be negatively affected under certain conditions. Oxygen enrichment then makes it possible to obtain a compromise between the reduction of pollutant emissions, on the one hand, and the flame stability, on the other hand. The dynamic study provides answers on the evolution of pollutant emissions and on the shape and stability of the flame.

Different techniques and optical diagnostics are implemented. The stability and structure of the flame are treated by OH* chemiluminescence technique, pollutant emissions are measured through multigas analyzers and the dynamic study is performed by two different techniques: LDV-2D and stereo-PIV. Several operating parameters are involved: the swirl number (0.8-1.4), the overall equivalence ratio (0.8-1), the oxygen enrichment rate (21-30 % vol in air) and the dilution rate of CO_2 and / or H_2O (0-20% vol in the oxidant).

Keywords: Non-premixed combustion, swirling flame, Exhaust Gas Recirculation, Oxygen Enrichment, Laser diagnostics, Stereo-PIV.

UNIVERSITE D'ORLEANS

Institut de Combustion Aérothermique Réactivité et Environnement

cnrs