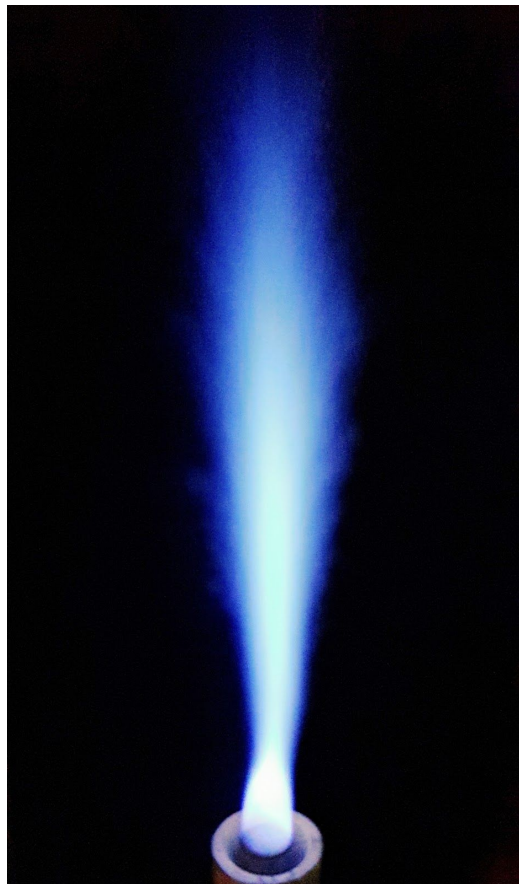


Imagerie de flamme haute cadence sur flammes turbulentes



Elèves:

Elora CHASSARD

Mattéo CLAUDEL

Loïc JULIEN

Hamza KATIM

Matthias LEMARCHAND

Enseignant-responsable du projet :

Nelson VALDEZ PAULINO

Date de remise du rapport : **16/06/2019**

Référence du projet : **STPI/P6/2019 – 37**

Intitulé du projet : ***Imagerie de flamme haute cadence sur flammes turbulentes***

Type de projet : ***Projet bibliographique et expérimental***

Objectifs du projet :

La mise en évidence des différents phénomènes qui permettent la stabilisation d'une flamme turbulente générée par un brûleur Bluff-Body.

Mots-clefs du projet : ***Flamme turbulente, paquets réactifs, stabilisation, chimiluminescence***

Table des Matières

Introduction	4
Méthodologie et organisation du travail	5
Travail réalisé et résultats	7
Flamme turbulente	7
Phénomène de stabilisation sur un Brûleur Bluff-Body	8
Le brûleur Bluff-Body	8
Les paquets réactifs	10
Chimiluminescence	13
Définition	13
Le radical OH*	13
L'intensificateur	15
Dispositif expérimental	16
Le système de mesure	16
Protocole expérimental	19
Résultats	20
Analyses	22
Conclusions et perspectives	23
Bibliographie	24
Annexes	26
ANNEXE 1 : Images Instantanées	26
ANNEXE 2 : Code MatLab pour obtenir les images moyenne et RMS	27
ANNEXE 3 : Image Moyenne	29
ANNEXE 4 : Image RMS	30
ANNEXE 5 : Photos du montage expérimental	31

1. Introduction

Le sujet de notre projet de physique porte sur l'étude d'une flamme turbulente à l'aide de l'imagerie haute-cadence. L'étude de cette imagerie de flamme sera réalisée à l'aide de la chimiluminescence des radicaux produits par les gazs émis par la flamme étudiée. Dans le cas de notre étude, cette flamme provient d'un brûleur nommé "Bluff-Body", qui utilise un mélange de méthane et d'air, prémélangé en amont de la combustion. Avec cette étude, nous voulons montrer l'existence de "paquets réactifs", c'est-à-dire d'un groupement de radicaux (comme OH^* , CH^* , et C_2 par exemple), éjectés suite à leur accumulation au niveau de zones de dépressions, que nous mettrons en évidence. Pour ce faire, nous mettrons en place notre propre dispositif expérimental afin de nous procurer des données, symbolisées par une image moyenne, que nous analyserons par la suite.

Dans un premier temps, nous allons situer le contexte de notre sujet en définissant les différents termes à connaître dans le domaine de la combustion afin de comprendre ce que nous allons étudier, en indiquant les connaissances obtenus lors de notre recherche bibliographique, ainsi qu'en décrivant le dispositif expérimental que nous utiliserons, et les observations attendues. Ensuite, nous procéderons à la description des observations obtenues à la suite de notre expérience et des différents moyens d'analyse que nous aurons utilisés.

2. Méthodologie et organisation du travail

Ce projet développé dans le présent rapport fut réalisé par un groupe de cinq étudiants, avec l'aide du responsable de notre projet, le doctorant en analyse expérimentale de la combustion Nelson VALDEZ PAULINO. L'entente au sein de ce groupe de travail fut très bonne, et l'organisation du travail durant tout le semestre fut très simple et très rapide à mettre en place.

Ce projet étant tout d'abord bibliographique, puis expérimental, nous avons décidé de se répartir équitablement la recherche à propos des différents aspects de l'analyse de la combustion d'une flamme turbulente.

Dès le début du projet, nous nous sommes donc répartis équitablement les thèmes de la recherche bibliographique de la manière suivante : Loïc a axé sa recherche sur les différents principes de stabilisation ainsi que sur le fonctionnement du brûleur Bluff-Body. Mattéo a recherché les éventuels autres principes de stabilisation ainsi que le fonctionnement des filtres à radicaux. Hamza, quant à lui, a étudié le principe d'éjection de paquets réactifs lors de la combustion, tandis qu'Elora a centré ses recherches sur la chimiluminescence ainsi que sur les différents radicaux possibles à étudier, puis a expliqué pourquoi il est préférable d'en étudier seulement un. Enfin, Matthias a étudié le fonctionnement de la caméra Phantom V9, puis PhantomV2512 et celui de l'intensificateur HiCATT 25.

Par ailleurs, nous nous sommes aidés mutuellement dans nos parties respectives.

Ensuite, lorsque le projet a pris de l'envergure, nous avons continué de rechercher des notions complémentaires afin d'affiner nos connaissances. De plus nous nous sommes obligés à poser régulièrement des délais afin de toujours avancer dans le rapport ou les recherches, et ainsi de ne pas être pris par le temps.

Nous rencontrions notre responsable de projet tous les jeudis, de 13h30 à 14h30, afin de garantir la bonne conduite de celui-ci. Ces séances avec monsieur Valdez Paulino avaient pour but d'échanger avec lui sur l'avancement de notre projet, et de poser d'éventuelles questions restées sans réponse durant nos recherches bibliographiques, sans être contraints aux mails. Malgré tout, si nous avions des questions, nous pouvions échanger par mail avec lui pour avoir une réponse sans attendre le jeudi suivant.

Par ailleurs, nous avons eu deux jeudi après-midi consacrés à l'expérience en milieu de semestre où toute l'équipe était présente, afin de mettre en place le dispositif expérimental élaboré à l'aide de nos recherches bibliographiques, et de découvrir le matériel nécessaire à l'analyse de la flamme turbulente. La deuxième séance consacrée à l'expérience a permis de

vérifier et d'améliorer la qualité de l'image moyenne acquise la semaine précédente, obtenue à partir d'images instantanées.

Enfin, pour améliorer notre organisation au sein du groupe de travail, même lorsque nous ne pouvions nous réunir, nous avons mis en place une conversation de groupe sur l'application *Messenger*, ce qui nous a permis d'échanger entre nous sur les avancées du projet, et sur les modifications à apporter. De la même façon, nous avons créé un dossier de partage de fichiers (sur *Google Drive*), pour que chacun des membres du groupe soit au courant du contenu des autres parties que les siennes, et que les documents utilisés soient disponibles pour nous cinq très facilement. Notre responsable de projet avait également accès à ce dossier de partage, afin de vérifier l'avancement de notre rapport.

3. Travail réalisé et résultats

3.1. Flamme turbulente

L'objectif de ce projet est d'étudier les mécanismes de la combustion d'une flamme turbulente par un brûleur industriel. Il nous a donc paru important de commencer notre recherche bibliographique par la définition de cette notion. On peut tout d'abord indiquer que la turbulence, selon Olivier CADOT, peut être définie comme "l'état d'un fluide dont l'écoulement est irrégulier tel qu'en tout point de l'espace la vitesse varie aléatoirement" [1]. On peut également ajouter la définition précise d'une flamme turbulente, qui est, selon le dictionnaire de la combustion, une "structure réactive interagissant avec des écoulements présentant un caractère apparemment désordonné caractérisé par des fluctuations de vitesse réparties selon un spectre fréquentiel étendu." [2]. L'apparition de la turbulence est observée au delà d'une certaine valeur critique du nombre de Reynolds ($Re \gg 1$), qui est un nombre adimensionnel défini comme suit :

Le nombre de Reynolds (Re) est un nombre sans dimension permettant de caractériser l'écoulement d'un fluide Newtonien, en calculant le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité qui s'exercent sur l'unité de volume de ce fluide. La formule permettant de calculer le nombre de Reynolds est :

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Avec ρ la masse volumique du fluide étudié (en kg.m^{-3}), V sa vitesse caractéristique (en m.s^{-1}), L sa dimension caractéristique (en m) et μ sa viscosité dynamique (en Pa.s ou $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$).

(Remarque : comme Re est un nombre sans dimension, tout système d'unités cohérent permet de le calculer, les unités indiqués ici ne sont donc qu'indicatives). [3]

Ainsi, l'étude de ce nombre permet de connaître le type de régime de l'écoulement : en effet, si Re est inférieur à une certaine valeur critique, l'écoulement sera toujours en régime laminaire, donc un écoulement régulier où l'ensemble du fluide possède un mouvement régulier, sans turbulence. À l'inverse, si Re est supérieur à cette valeur critique, alors l'écoulement peut posséder un régime turbulent.

(Remarque : La valeur du nombre de Reynolds critique dépend de la géométrie (interne ou externe) de l'écoulement). [4]

3.2. Phénomène de stabilisation sur un Brûleur Bluff-Body

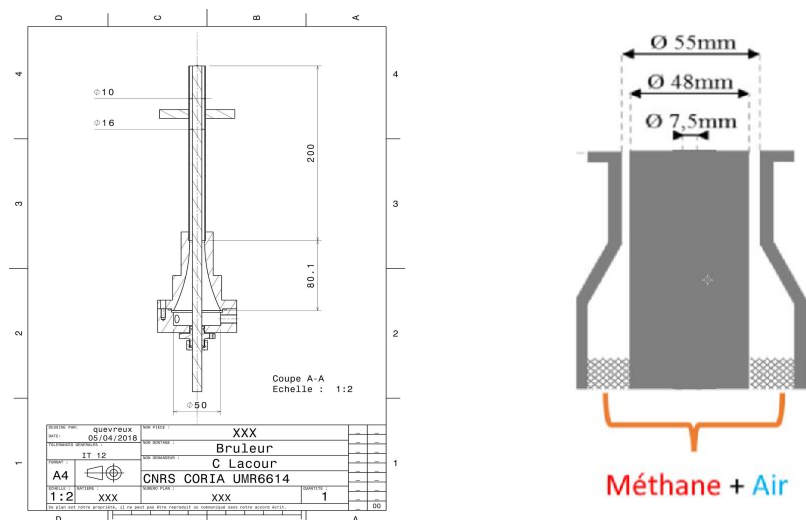
3.2.1.1. Le brûleur Bluff-Body

“L’amélioration de la combustion reste un sujet important pour la communauté scientifique. L’augmentation du rendement, la diminution des polluants deviennent alors des enjeux primordiaux, qui imposent des contraintes et de nouvelles problématiques physiques pour les constructeurs de dispositifs industriels.” [5]. Ainsi, la stabilisation de la flamme est nécessaire pour répondre à ces contraintes, elle est donc devenue l’un des principaux sujets des recherches sur l’amélioration de la combustion.

Durant ce projet, nous allons donc étudier les phénomènes de stabilisation d’une flamme turbulente, qui sera obtenue par une combustion obtenue à l’aide d’un brûleur de type “Bluff-Body” [6]. Ce type de brûleur est défini comme un brûleur combustible/comburant possédant un obstacle, appelé “Bluff-Body”, qui génère un sillage derrière lui lorsqu’il est placé dans un écoulement [6]. Ce sillage génère une zone de recirculation au niveau du nez du brûleur [7], c’est à dire une zone de basse pression dû à cet obstacle où le gaz va s’écouler, s’accumuler à haute température afin d’apporter la chaleur nécessaire à la stabilisation de la flamme en formant des vortex, puis s’éjecter sous forme de “paquets réactifs” [8]. Cette zone de recirculation va également favoriser la stabilisation de la flamme. Malgré tout, il subsiste dans ces zones de recirculation des phénomènes instationnaires intermittents qui sont complexes et encore mal connus.

En étudiant le rapport de stage de Nelson Valdez Paulino, nous avons appris que pour les flammes générées par les brûleurs au gaz naturel équipant les procédés industriels, le combustible et le comburant (respectivement le méthane et l’air dans le cas de notre étude) ne sont pas prémélangés [5], c’est-à-dire que les flux de combustibles et de comburant ne se mélangent qu’à la création de la flamme, car “le gaz naturel et l’air étant injectés dans la chambre de combustion de façon séparée, ce type de brûleur permet une plus grande souplesse de fonctionnement et une meilleure sécurisation de l’installation” [5]. On parle également de “brûleurs à mélange au nez”, car le mélange s’effectue à la sortie du nez du brûleur, grâce aux zones de recirculation dues au “bluff body”.

Mais il existe aussi des brûleurs avec prémélange. Nous avons choisi d’utiliser ce type de brûleur dans nos expériences car cette technique permet de contrôler le dosage combustible/comburant et donc d’optimiser le paramètre de richesse de la flamme. Les flux sont donc déjà confondus à l’intérieur du brûleur et il en résulte un rendement de combustion amélioré. Le brûleur “Bluff-Body” prémélangé du Coria que nous avons utilisé pour nos manipulations expérimentales est représenté ci-après.



Dessin industriel du Brûleur Bluff-body du CORIA et son schéma simplifié

Le choix d'un des deux types de brûleurs dépend de son utilisation. En effet, un brûleur prémélangé a des aspects attractifs à notre échelle de laboratoire car cette configuration permet de contrôler la stœchiométrie de la réaction entre le méthane et l'air. A l'inverse, le brûleur sans prémélange a une répartition méthane/air plus hétérogène que le premier dû au fait que le contrôle de la stœchiométrie est plus compliqué : cela implique une combustion incomplète, produisant plus de polluants ou de particules dangereuses comme le monoxyde de carbone. Malgré tout, le dispositif avec mélange comporte des risques, car le fait de prémélanger l'air et le méthane produit un gaz très réactif et sensible à la moindre étincelle. Ainsi ce dispositif est adapté à la recherche, comme des thèses ou des moteurs par exemple, car ce sont des applications à petites échelles, alors qu'un brûleur non-prémélangé est plus adapté aux grandes échelles telles que les installations industrielles, comme par exemple les hauts fourneaux. [9-10]

Ainsi, notre étude permettra d'analyser, d'après nos recherches, un écoulement séparé en trois zones distinctes :

- _ une première qui s'étend jusqu'à 40mm depuis le nez du brûleur, où l'on peut observer une zone de recirculation, due à une dépression causée par l'obstacle du brûleur bluff-body dans cette zone.
- _ une seconde, située entre 40 mm et 60 mm en aval du brûleur, qui est une zone de transition.
- _ et une troisième, qui se situe au-delà de la zone de transition, correspond à la flamme "jet décollé", donc une zone où la flamme va être "ré-allumée" grâce à "la convection des paquets réactifs par l'écoulement moyen".[5]

Ces différentes zones peuvent notamment être observées par la méthode de la Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) à haute cadence, comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous :

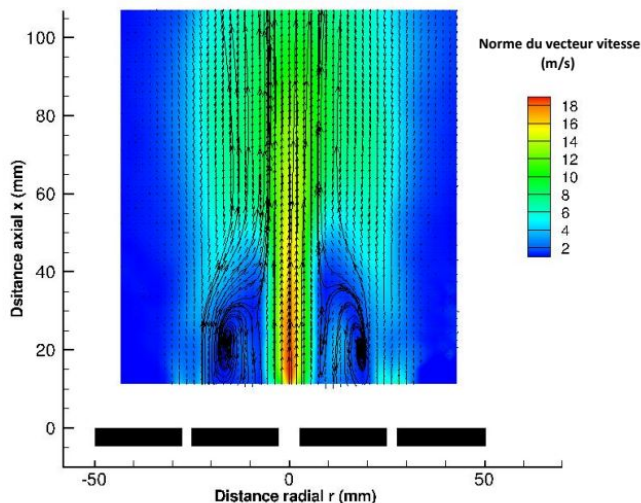


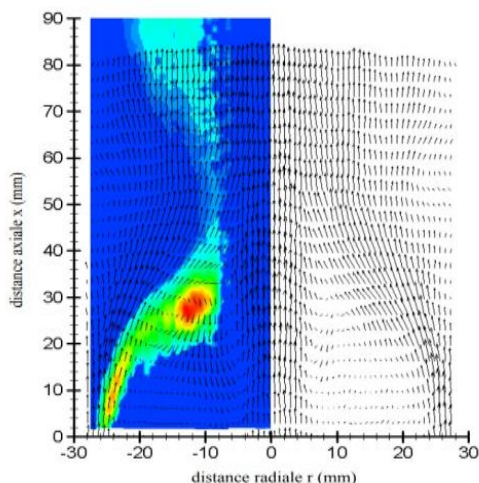
Figure 25: Champ aérodynamique moyen calculé à partir de 1500 champs instantanés de vitesse obtenus par PIV ($U_j = 21$ m/s, $U_a = 6.51$ m/s).

PIV du brûleur Bluff-Body[11]

3.2.1.2. Les paquets réactifs

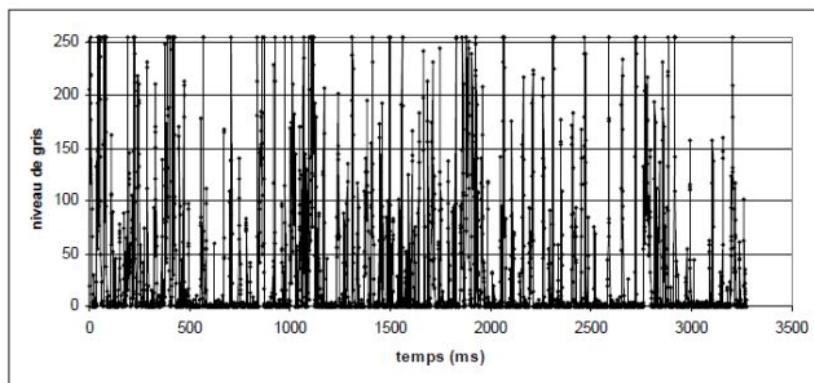
On peut donc supposer, d'après ces observations, que la nature des phénomènes au nez du brûleur ne sont pas les seuls responsables de la stabilité de la flamme. Il y a également "le transport de paquets de gaz réactif depuis le sommet de la zone de recirculation vers l'aval" [7] qui le permet, ce qui a notamment été observé lors des travaux de thèses de Karim Mokaddem, par une expérience d'imagerie rapide de chimiluminescence.[12]

Pour pouvoir observer ce phénomène, il est possible de coupler une image moyenne de la position radiale de la flamme issue de la prise de plusieurs clichés, avec le champ de vitesse des particules obtenu par un algorithme PIV. Dans le cas du brûleur Bluff Body, au niveau du nez, on peut distinguer une zone de recirculation (ZDR) suivi d'un volume de transition où ont lieu des éjections intermittentes de paquets réactifs qui alimentent la dernière zone, siège d'une flamme dite jet décollée (FJD).



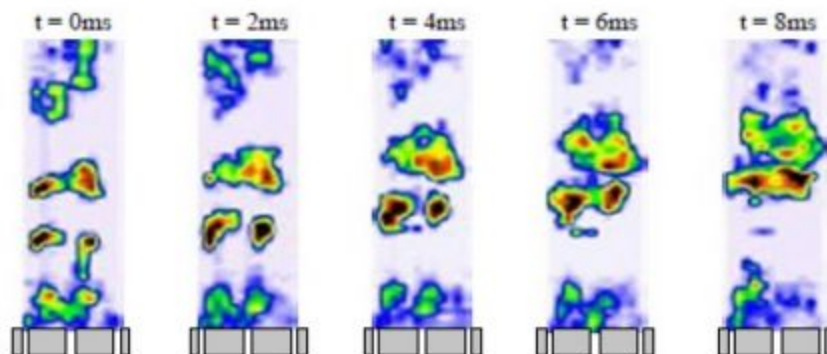
Champ moyen de vitesse et répartition radiale moyenne des zones réactives pour une séquence.[7]

Si cette FJD est présente en moyenne, elle reste tout de même très instable. En effet, Arnaud Susset a pu montrer le caractère intermittent de cette flamme au dessus de la ZDR [7]. Pour ce faire on enregistre le niveau de gris, reflétant la présence de flamme, à la hauteur présumée de la flamme jet décollée sur plusieurs secondes. Il s'avère que ce phénomène de stabilisation de la flamme ne présente pas de fréquence propre, il est plutôt instationnaire.



Évolution temporelle du maximum de niveau de gris à une hauteur de 70 mm (niveau de gris élevé = présence de la flamme).[7]

La stabilisation de la flamme jet décollée étant majoritairement assurée par un apport de paquets réactifs venant de la ZDR, il est pertinent de s'intéresser aux différents modes d'éjection de ces paquets. Les séquences d'images de chimiluminescence recueillies par Karim Mokaddem dans sa thèse montrent un déplacement des paquets de la ZDR vers la FJD [12].



Déplacement de structures en combustion de la flamme du brûleur Bluff-Body.[12]

Mais l'étude des champs de vitesse donne encore plus d'information. On voit à quelle point il est intéressant de coupler l'imagerie de flamme et les techniques PIV. Dans sa thèse, Arnaud Susset confirme son hypothèse selon laquelle les paquets chauds sont transportés vers la FJD par l'écoulement moyen. Il va même plus loin puisque en étudiant le barycentre d'un paquet réactif au cours de sa transition, on observe une croissance du contour de la flamme.

Le mode d'éjection prépondérant a lieu au centre de l'écoulement, c'est à dire très proche de l'axe du brûleur. Dans cette zone le jet de méthane est très proche impliquant un fort risque d'instabilités. Globalement, dans la ZDR, la flamme a deux formes distinctes : une forme ovoïde au sommet de la ZDR et une autre forme allongée le long du jet d'air. L'étude d'une séquence complète d'éjection révèle que l'éjection se produit dans une zone très proche du brûleur c'est à dire très proche du jet de méthane. Ce mode d'éjection est probablement dû aux instabilités du jet de méthane.

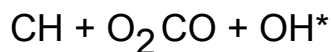
L'étude de la densité de particule dans la ZDR va confirmer cette hypothèse. En effet une zone de faible densité en particule est en fait une zone réactive de l'écoulement. Le suivi temporel d'une petite fenêtre de l'écoulement montre qu'une première région à faible densité, c'est à dire une région avec présence de flamme, se localise le long du jet d'air. On observe un déplacement de cette flamme à vitesse décroissante en translation dans le sens de l'écoulement. Au moment où la vitesse est presque nulle la flamme est étirée vers le haut et vers le bas au niveau du jet de méthane. La partie étirée vers le haut va alimenter et stabiliser la flamme située au sommet du jet d'air. Ainsi la flamme le long du jet d'air peut être qualifiée de flamme pilote.

3.3. Chimiluminescence

3.3.1. Définition

Les phénomènes qui se produisent dans une flamme turbulente seront étudiés à partir de la chimiluminescence des gazs produits par celle-ci. Ainsi, il nous a semblé important de définir ce terme : selon le groupement Français de Combustion, la chimiluminescence est un « processus d'émission lumineuse dû à la relaxation radiative spontanée d'espèces chimiquement créées sur des états excités. » [13]. La chimiluminescence possède de très nombreux domaines d'applications, comme notamment la production de lumières de secours, la détection de traces de sang peu visibles (par la réaction entre les ions fer présents dans les globules rouges et le luminol), les études environnementales (par la réaction entre le dioxyde d'azote et le luminol) mais surtout l'identification d'espèces excitées dans un milieu réactif durant l'étude d'une combustion.[14]

D'après la thèse *Développement de traitements d'images pour l'étude de la stabilisation des flammes turbulentes non-prémélangées générées par des brûleurs industriels modèles* écrite par Arnaud Susset [7], les meilleurs rendements de chimiluminescence lors d'une combustion sont les espèces excitées OH*, C₂* et CH*. Les voies réactionnelles pour la formation de ces espèces sont



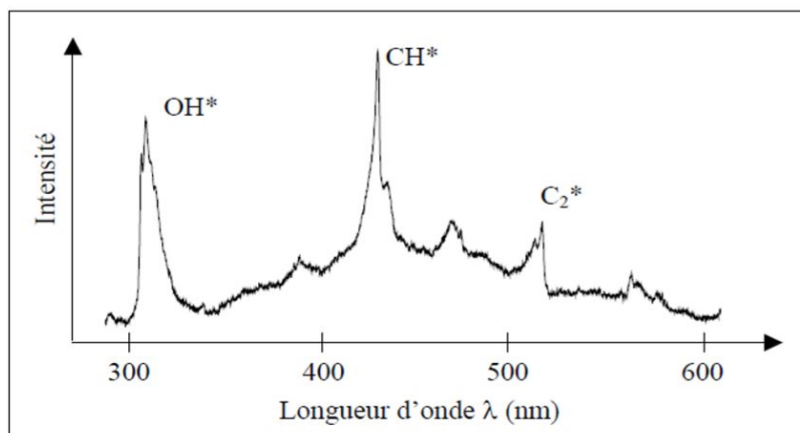
Ce processus possède de nombreuses propriétés tel qu'une relation linéaire entre l'aération de la combustion étudiée et le rapport de l'intensité d'émission des espèces OH* et CH*. Ainsi, il est possible de connaître le taux d'aération d'une flamme uniquement à partir de la mesure de la chimiluminescence des radicaux OH* et CH*, notamment à l'aide d'une mesure spectrométrique. [7]

3.3.2. Le radical OH*

La combustion du méthane est complexe et met en jeu plusieurs réactions élémentaires. Ces réactions mettent en jeu des radicaux libres, atomes ou molécules possédant un ou plusieurs électrons non appariés. Les radicaux en se déséchant émettent des photons spontanément. Comme vu précédemment, les radicaux excités sont : OH*, C₂* et CH₃* lors d'une combustion à rendement optimal. L'étude de ces radicaux, qui sont spécifiques à la

combustion du méthane (CH_4), permet de mettre en évidence et d'étudier le phénomène d'éjection de paquets réactifs depuis la zone de recirculation. De plus, une étude des images expérimentales permettra de quantifier la fréquence caractéristique du phénomène.

On remarque que ces trois radicaux, une fois excités, émettent un rayonnement à une certaine longueur d'onde caractéristique. Ainsi il est facile de les distinguer, comme on peut le voir sur le spectre d'émission mesuré par J. Saintagne, présenté ci-dessous :



Spectre d'émission d'une flamme générée par un brûleur Bluff Body [15]

Dans notre étude, nous nous focaliserons uniquement sur la chimiluminescence du radical OH^* , car produit en grande quantité lors de l'oxydation d'hydrocarbures, comme le méthane, que l'on utilisera comme combustible dans notre dispositif expérimental [7]. Ce choix peut être également expliqué par le fait que la grande concentration de ce radical indique qu'un paquet de flamme traverse la fenêtre d'analyse. Ce radical émet un rayonnement dont la longueur d'onde de la tête de bande associée (c'est-à-dire le maximum d'émission lors du processus de chimiluminescence du radical OH^* sur son « spectre de bande ») est égale à 330 nm [7]. Ainsi, comme on peut l'observer sur la figure, ce radical émet un rayonnement ultraviolet qui ne peut être mesuré uniquement à l'aide d'un filtre passe-bande, que l'on devra utiliser dans notre dispositif expérimental.

Dans l'optique d'étudier ces radicaux et leurs différents rayonnements, nous nous sommes munis d'un brûleur de type Bluff-Body ainsi que d'un système d'imagerie dernière génération car les rayonnements émis par les radicaux OH^* sont spontanés et instantanés. Par conséquent, pour pouvoir observer l'émission des photons, il faut une caméra avec une fréquence de photo très élevée, de l'ordre du millier d'images par seconde. Cette fréquence élevée d'images nous permettra d'observer l'évolution de la flamme et l'émission de paquets réactifs à des intervalles de temps très petits.

De plus, l'utilisation d'un filtre interférentiel va nous permettre de "faire le tri" parmi les différentes espèces de radicaux (CH^* , OH^* et C_2^*) présentes dans la flamme. Le filtre se place donc entre la flamme et la caméra afin de faire l'acquisition d'images ne montrant que les radicaux que nous souhaitons étudier. En fonction du spectre d'émission, on choisit un filtre qui ne laisse passer qu'une certaine bande de longueur d'onde afin de bloquer les rayonnements des autres radicaux.

Le choix du filtre interférentiel se fait en fonction de ce que l'on veut étudier et des conditions de l'expérience. Comme nous l'avons vu précédemment, une combustion va produire de nombreux radicaux émettant chacun un rayonnement avec une longueur d'onde caractéristique. Ces différents radicaux jouent un rôle spécifique lors de la combustion, et à l'œil nu il est impossible de les distinguer. C'est pourquoi, afin d'étudier l'influence de chaque radical sur la combustion ou encore sa répartition dans la flamme, il est nécessaire d'utiliser un filtre interférentiel. Dans le cadre de notre étude nous allons étudier le radical OH^* .

On peut remarquer, sur ce spectre d'émission, plusieurs pics qui se distinguent largement du bruit de fond par leur forte intensité. Il s'agit des têtes de bandes pour les différentes espèces de radical. En ce qui nous concerne, la tête de bande qui correspond au radical OH^* se situe aux alentours de 330 nm et est fine. Il faudra donc choisir le filtre interférentiel de telle façon à ce que la bande passante ne conserve que les rayonnements émis à peu près à cette longueur d'onde.

3.3.3. L'intensificateur

Le rôle de l'intensificateur au sein du montage expérimental est d'amplifier le signal électronique qui est souvent trop faible pour être traité directement. En effet, la haute cadence de prise de photo conduit à avoir un temps d'exposition très faible (3ns) et donc à avoir de faibles signaux sur les photos. Le fait d'avoir cet intensificateur permet donc d'avoir des signaux de meilleure qualité avant de procéder au traitement des images pour faire l'image moyenne [16-17].

L'intensificateur fonctionne de la manière suivante : dans le schéma ci dessous, les photons sont successivement convertis en électrons puis de nouveau en photons sur l'ensemble des composants 1 à 3. Ce dispositif permet une obturation ultra rapide ce qui est indispensable pour prendre une flamme en photo. Le composant 5 est doté d'une couche d'une matière phosphorescente qui une fois frappée par un électron, émet une certaine quantité de lumière vers la caméra. Finalement, le composant 7 permet d'optimiser la taille de l'image qui sera reçue dans la caméra. [17]

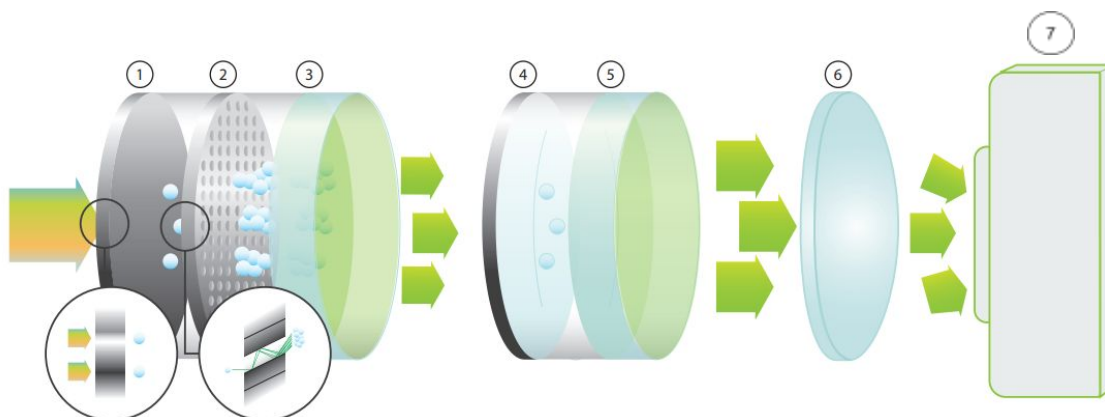


Schéma de l'intensificateur HiCATT25 [17]

3.4. Dispositif expérimental

3.4.1. Le système de mesure

Le système d'imagerie que nous allons utiliser dans notre dispositif expérimental pour obtenir une grande quantité d'images instantanées de la combustion, et ainsi obtenir son image moyenne, est composé d'une caméra, d'une résolution de 1280 pixels x 800 pixels, du modèle **Phantom V2512**. Cette caméra permet l'acquisition de photos non compressées en haute qualité. Son grand atout est qu'elle dispose d'une fréquence maximale de prise de photo de l'ordre de 25,7 milliers d'images par seconde à sa résolution maximale, et 1 million d'images par secondes à sa résolution minimale (256px x 32 px). Cela correspond parfaitement aux prérequis de notre montage expérimental car elle nous permettra d'observer des phénomènes quasi-instantanés, comme l'émission de paquets réactifs [18].



Caméra Phantom V2512 [18]

Mais cette caméra, seule, ne suffit pas à observer les différents mécanismes d'une combustion. Voici donc le procédé par lequel une image instantanée, où ces mécanismes sont visibles, peut être obtenue. Tout d'abord, les photons émis par la combustion vont traverser un **filtre interférentiel** de bande passante très étroite ($\pm 5\text{nm}$) afin de ne conserver que les photons qui possèdent une longueur d'onde d'environ 330 nm, c'est-à-dire ceux qui ont été émis par le radical OH^* . Ensuite, ces photons vont traverser l'**intensificateur** HiCATT 25, où ils seront transformés en électrons, intensifiés, puis reconvertis en électrons, par le procédé décrit précédemment. Enfin, ces photons seront captés par le capteur CMOS de la **Phantom V2512** [18] pour former une image qui sera envoyée sur l'ordinateur auquel la caméra est reliée.

Ce dispositif expérimental est représenté par le schéma ci-dessous :

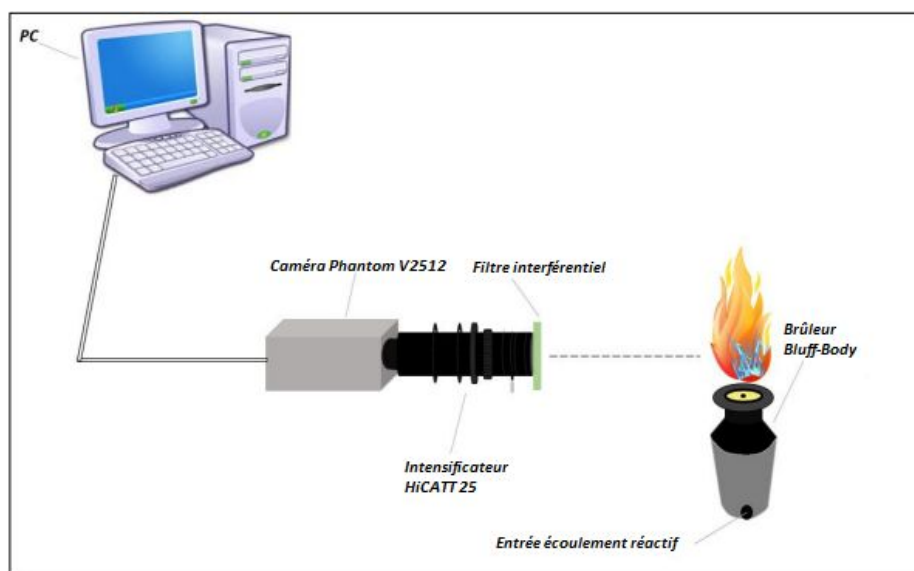
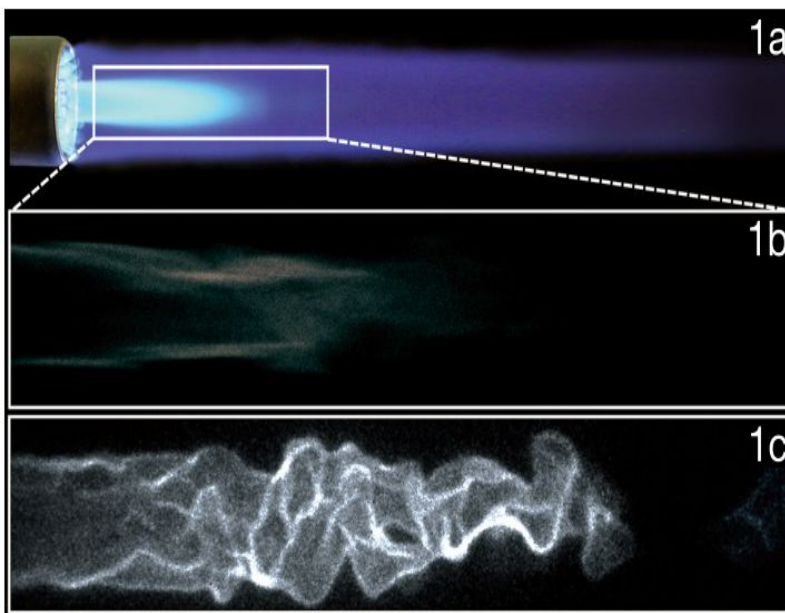


Schéma du Montage expérimental utilisé pour l'imagerie de flamme. [5]

L'importance de l'intensification sur l'efficacité de l'image nous est montrée par la comparaison ci-dessous :



Comparaison d'une même image mais avec et sans intensificateur [17]

L'image 1a est une image d'une flamme avec une caméra normale pour mettre en évidence ce que l'oeil peut voir.

L'image 1b est une image avec une caméra à haute cadence (1000 fps avec un temps d'exposition de 1 ms).

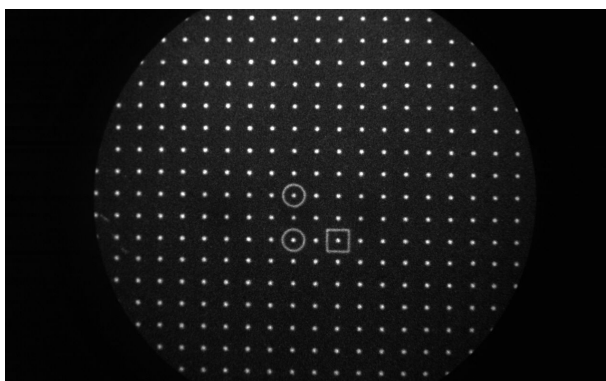
L'image 1c est une image avec une caméra équipée de l'intensificateur HiCATT 25 qui permet d'avoir une image plus nette de la flamme tout en intensifiant la lumière reçue. Cette photo a été prise à 2 000 fps avec 15 μ s de temps d'exposition. [17]

Ainsi il est primordial d'utiliser une caméra associée au HiCATT 25 pour analyser précisément la chimiluminescence du radical OH*. Sans cet intensificateur, il faudrait un temps d'exposition très long pour obtenir une intensité lumineuse suffisante ce qui entraînerait un flou de mouvement et des images inexploitable. En augmentant l'intensité du signal reçu, cette accessoire permet d'atteindre un temps d'expositions de 3ns assurant ainsi l'obtention d'une image nette.

3.4.2. Protocole expérimental

Comme vu précédemment, pour permettre l'étude d'une flamme turbulente, nous allons utiliser un dispositif expérimental composé de la caméra **Phantom v2512**, reliée à un ordinateur, sur lequel on a ajouté un intensificateur HiCATT 25 et un filtre optique de 330 nm de longueur d'onde. La flamme turbulente étudiée sera prémélangée et sera produite par un brûleur Bluff-Body.

La première étape du protocole expérimental va permettre de connaître le taux d'agrandissement des images obtenues. Pour cela, nous allons utiliser une mire (voir figure ci-dessous), où chaque "point" dans le repère est situé à 4 mm du point situé à côté. Ainsi, en calculant le rapport de la distance réelle sur le nombre de pixels représentant cette distance, nous pourrons connaître la valeur du taux d'agrandissement de la caméra lors de la mesure, et ainsi déterminer l'échelle de l'image.



Mire pour calibrer l'image de la flamme

L'étape suivante va être l'étape de réglage des différentes options de la caméra, afin d'avoir une image avec un gain assez élevé, un temps de pose suffisamment long et un nombre d'images par secondes suffisant pour pouvoir observer les zones de recirculations ainsi que les émissions de paquets réactifs avec une luminosité assez importante. Voici les réglages que nous avons choisis :

- | | | |
|-------------------------------|------|-----------------------------|
| ➤ une ouverture de 40 μ s | | une ouverture de 99 μ s |
| ➤ cadence 1 KHz | puis | cadence 10 KHz |
| ➤ 600 Gain MCP (V) | | 700 Gain MCP (V) |

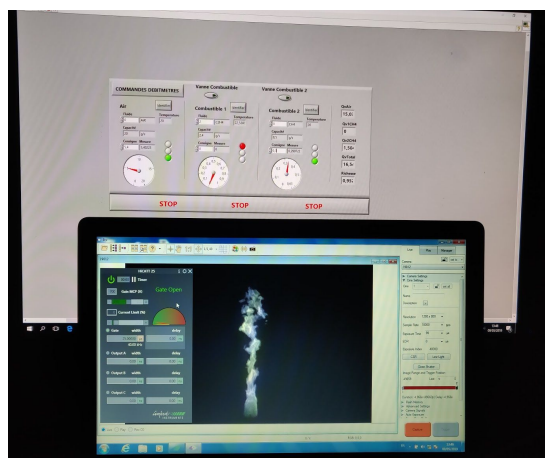
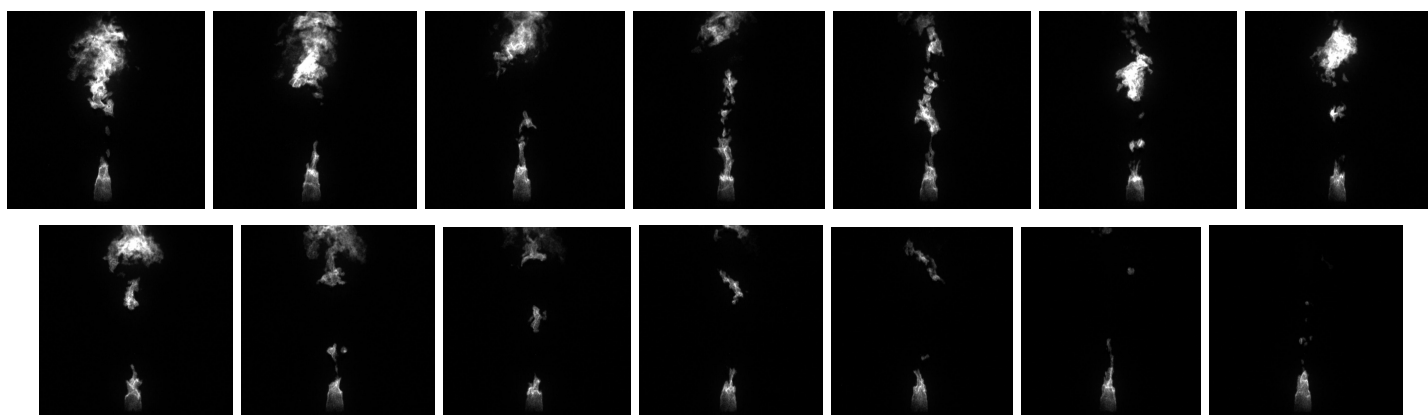


Image des réglages expérimentaux

Ensuite, nous allons passer à l'allumage du brûleur Bluff-Body, puis à l'acquisition des images, que nous ferons pendant un temps de pose de quelques instants, afin d'avoir 3 000 images instantanées à analyser. Cette acquisition s'effectue grâce à un pilotage à distance depuis l'ordinateur. Une séquence de 20 images instantanées est disponible en **annexe 1**. De plus, les images du montage expérimental sont présentées en **annexe 5**.

3.4.3. Résultats

Nous avons désormais obtenu 3 000 images instantanée de la flamme turbulente, et en particuliers de ses radicaux OH*. Voici un échantillon de ce que nous avons obtenu :



Images instantanées obtenues expérimentalement

Mais pour mettre en évidence les zones de recirculation ainsi que les émissions de paquets réactifs, les images instantanées ne suffisent pas. Voilà pourquoi il est nécessaire d'analyser l'image moyenne obtenu à partir des 3 000 images instantanées obtenues.

Pour cela, nous avons réalisé un programme (en langage MATLAB) qui permet d'obtenir deux images qui peuvent être analysées (le code est disponible en **annexe 3**). La première est une image moyenne classique, qui est calculée en sommant l'intensité lumineuse de toutes les images instantanées pour chaque pixel, puis en divisant cette somme par le nombre d'images instantanées. Enfin, nous mettons une échelle à cette image moyenne, en utilisant le rapport d'agrandissement de l'image calculé précédemment grâce à la mire, afin d'obtenir l'image moyenne finale. Voici l'image que l'on a obtenu :

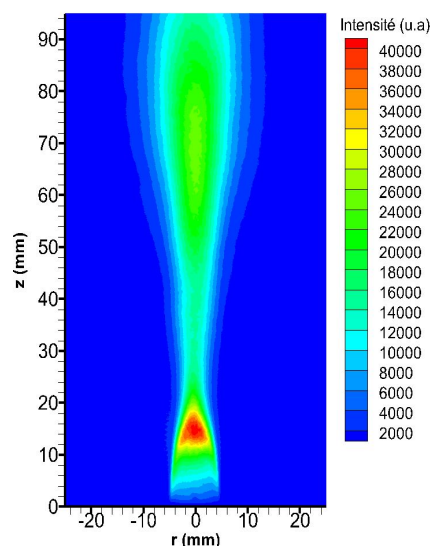


Image moyenne expérimentale (annexe 3)

On observe une intensité maximale dans la zone basse du brûleur d'une valeur de 160 u.a., jusqu'à une hauteur d'environ 25 mm au dessus du nez du brûleur : c'est la zone de recirculation. Ensuite, la flamme s'affine et perd en intensité d'une valeur de 30 u.a. : c'est la zone de transition. Enfin, en zone haute, ici à partir de 60 mm, au dessus du nez du brûleur, l'intensité de la flamme augmente de nouveau, jusqu'à une intensité d'environ 80 u.a. : c'est la zone de flamme "jet décollé". On remarque bien que cette image moyenne permet d'observer les différentes zones de la flamme décrite lors de la recherche bibliographique.

La deuxième image obtenue va nous permettre de confirmer ces mesures. C'est une image RMS (*root mean square*, ou *Valeur efficace*), c'est à dire une image permettant d'observer l'écart type de l'intensité lumineuse des images instantanées. Pour l'obtenir, nous avons calculé la somme du carré des intensités lumineuse de toutes les images instantanées pour chaque pixel, puis divisé cette somme par le nombre d'images instantanées, ici 3 000. Ensuite, nous avons soustrait l'image moyenne au carré à ce rapport, et pris la racine carrée du résultat obtenu, afin d'obtenir l'écart-type de l'intensité lumineuse de chaque pixel, et ainsi l'image RMS. Ce calcul est résumé par la formule ci-dessous :

$$\sqrt{\frac{\sum (ImagesInstantannées)^2}{NbImages} - (ImageMoyenne)^2}$$

Enfin, de la même manière que pour l'image moyenne, on met une échelle à l'image obtenue, afin d'obtenir l'image RMS finale. La voici :

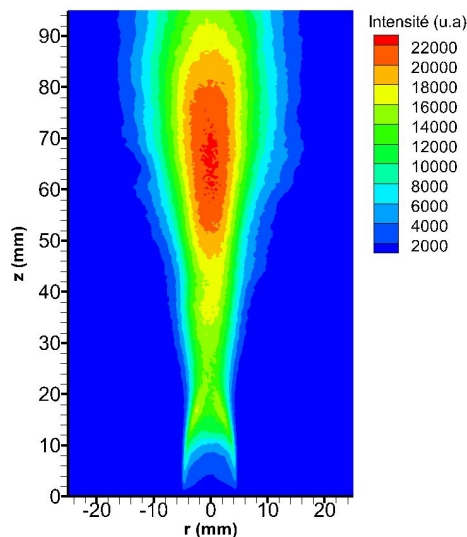


Image RMS OH (annexe 4)

3.4.4. Analyses

Dans le cadre de nos expériences, nous avons réalisé deux acquisitions d'images avec des paramètres d'enregistrement différents. Dans un premier temps on a fixé la cadence d'acquisition à 1 kHz et le temps d'exposition à 40 μ s. Il s'est révélé que le suivi temporel de la flamme avec ces paramètres ne permet pas d'observer les intermittences de la FJD et l'éjections des paquets réactifs. Afin de recueillir une séquence d'image instantanées exploitables nous avons augmenté la cadence d'acquisition jusqu'à 10 kHz et le temps d'exposition à 99 μ s. Le bruit de fond a été considérablement réduit et la séquence d'image (**annexe 1**) permet bien d'observer le processus d'éjection d'un paquet chaud. De plus le calcul de l'image moyenne des image instantanée permet d'observer une structure de flamme séparée en trois régions :

- 1) une première zone de combustion intense correspondant à la ZDR depuis le nez du brûleur jusqu'à 25 mm environ.
- 2) Une zone de transport convectif de paquets réactifs de 25 à 48 mm.
- 3) Enfin la flamme jet décollée étirée jusqu'à 100 mm environ.

L'étude d'une image RMS permet de quantifier la fluctuation de la flamme dans la fenêtre d'étude. Le calcul de cette image (**annexe 4**) à partir de nos enregistrements confirme l'hypothèse selon laquelle la FJD est certes présente sur l'image moyenne mais de façon très instable.

4. Conclusions et perspectives

Après avoir effectué des recherches approfondies sur notre sujet, nous avons réussi à valider le modèle théorique développé lors de ces recherches bibliographiques, grâce à un dispositif expérimental que nous avons mis en place.

Nous pouvons ajouter que nous avons pu, grâce à ce dispositif, observer l'image moyenne de la flamme turbulente. Ainsi nous avons mis en évidence les phénomènes de stabilisation tout comme l'émission de paquets réactifs. De plus, nous avons donc pu acquérir de nombreuses connaissances en chimie de la combustion, notamment sur la chimiluminescence de la combustion du méthane avec l'air.

Nous avons également su appréhender la mise en place d'un protocole expérimental afin d'observer les phénomènes attendus, grâce à des recherches personnelles.

D'un point de vue personnel, ce projet nous a permis de découvrir le monde de la recherche ainsi que la manipulation des outils de haute précision, comme par exemple la caméra Phantom V2512 ou encore l'intensificateur HiCATT 25. Ce projet a également contribué à notre enrichissement personnel en nous faisant étudier un sujet qui sort du cadre de nos études en cycle préparatoire.

Notre sujet étant en partie le sujet de thèse de M.Valdez Paulino, nous avons parfois eu des difficultés à obtenir des informations dû au fait que le sujet soit novateur. En effet, les brûleurs prémélangés sont actuellement sujets à des recherches sur leur rendement et efficacité. Ceci explique le nombre restreint de documentation utilisée.

On peut affirmer par ailleurs que la recherche sur ce dispositif est en plein essor et les appareils existants sont continuellement améliorés, comme par exemple par la création d'un dispositif d'aide à la stabilisation grâce à l'émission de décharges plasma nanosecondes, ce qui pourra augmenter la stabilité de la flamme, et donc son rendement.

Nous pouvons conclure en affirmant que ce travail de groupe nous sera bénéfique tout au long de notre cursus à l'INSA, tout comme les connaissances que ce projet nous a apportés.

5. Bibliographie

- [1] Olivier CADOT, « Introduction à la turbulence, cours de l'ENSTA-ParisTech 2A », novembre 2015.
- [2] « Le dictionnaire de la combustion - FLAMME TURBULENTE », [En ligne : http://www.combustioninstitute.fr/index.php?option=com_seoglossary&view=glossary&catid=1&id=452&Itemid=0]
- [3] « Nombre de Reynolds — Wikipédia », [En ligne : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Reynolds].
- [4] « Le dictionnaire de la combustion - NOMBRE DE REYNOLDS », [En ligne : http://www.combustioninstitute.fr/index.php?option=com_seoglossary&view=glossary&catid=1&id=641].
- [5] Nelson Valdez Paulino, « Etude expérimentale de la stabilisation de flammes turbulentes de brûleur Bluff-Body par PIV », Février-Juin 2017.
- [6] Benoît TAUPIN, « Etude de la combustion turbulente à faible richesse haute température et haute pression. », Décembre 2003, [En ligne : http://www.coria.fr/spip.php?article265&titre_mot=these]
- [7] Arnaud SUSSET, « Développement de traitements d'images pour l'étude de la stabilisation de flammes turbulentes non-prémélangées générées par des brûleurs industriels modèles. », Décembre 2002, [En ligne : <http://www.theses.fr/2002POIT2323>]
- [8] « Recirculation Zone », [En ligne : <https://definedterm.com>].
- [9] MORALES, Anthony, LASKY, Ian, GEIKIE, Marissa, [et al.], « Mechanisms of flame extinction and lean blowout of bluff body stabilized flames », *Elsevier*, février 2019, p. 31-45.
- [10] WU, Bifen, ZHAO, Xinyu, CHOWDHURY, Bikram Roy, [et al.], « A numerical investigation of the flame structure and blowoff characteristics of a bluff-body stabilized turbulent premixed flame », *Elsevier*, janvier 2019, p. 376-393.
- [11] Franck NEVEU, Frédéric CORBIN, M. PERRIN et Michel TRINITÉ, « Characterization of the coupling of aerodynamics and combustion in a nonpremixed turbulent flame », dans *Revue générale de thermique*, vol. 34, 1995.

[12] Karim MOKADDEM, Contribution à la validation expérimentale de deux modèles de combustion turbulente. », 1997, [En ligne : <https://www.theses.fr/1997ECAP0685>]

[13] Le dictionnaire de la combustion - CHIMILUMINESCENCE », [En ligne : http://www.combustioninstitute.fr/index.php?option=com_seoglossary&view=glossary&catid=1&id=180].

[14] « Chimiluminescence — Wikipédia », [En ligne : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Chimiluminescence>].

[15] J. Saintagne, « Mise au point d'un dispositif de spectroscopie d'émission spontanée de flamme sur un brûleur modèle », 1998.

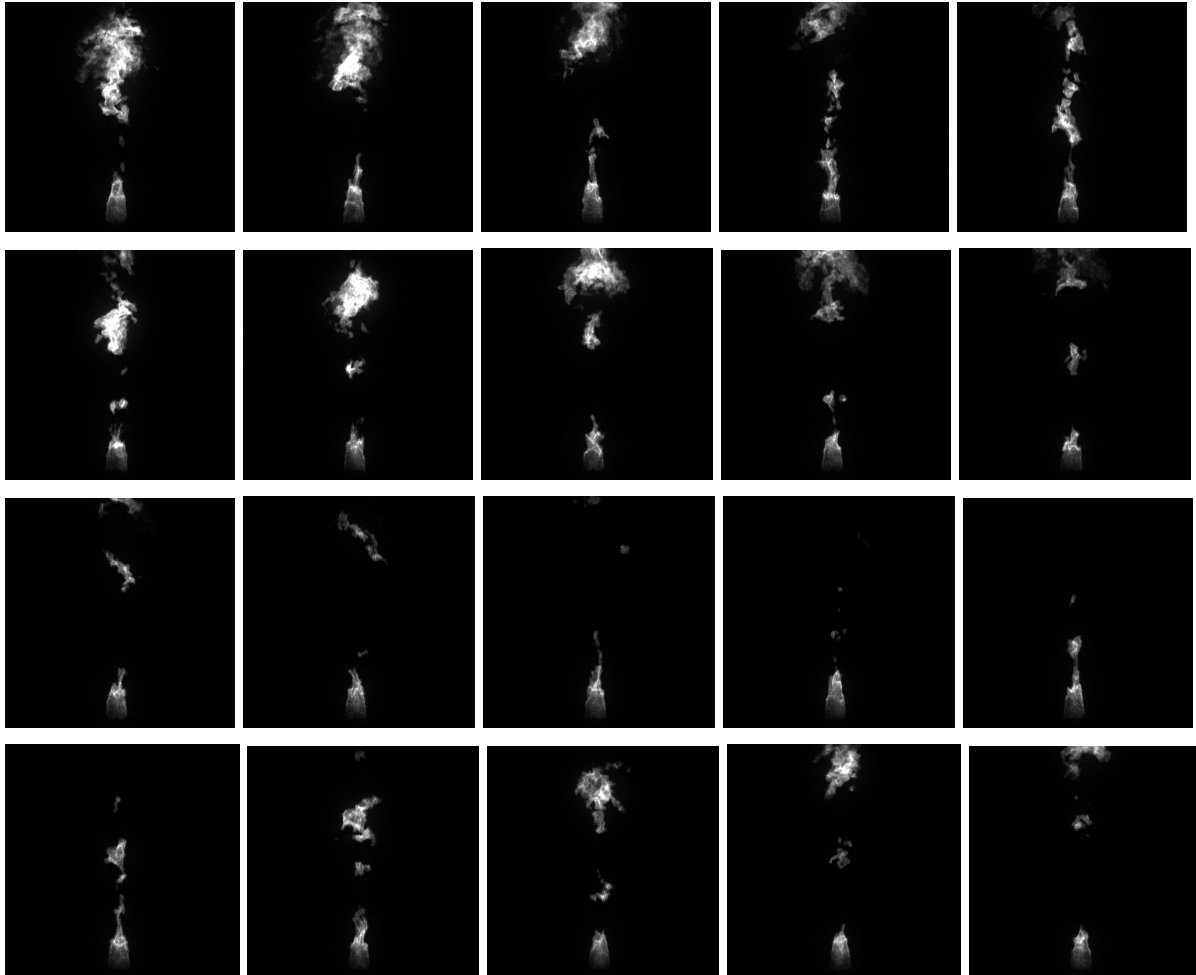
[16] Jiesheng Min, « Comportement transitionnel et stabilisation de flammes-jets non-prémélangés de méthane dans un coflow d'air dilué en CO₂ », mai 2011.

[17] « HiCATT », [En ligne : <https://www.lambertinstruments.com/hicatt#hicatt-features>]

[18] « Phantom v2512 », [En ligne : <https://www.phantomhighspeed.com/products/cameras/ultrahighspeed/v2512>].

6. Annexes

6.1. ANNEXE 1 : Images Instantanées



6.2. ANNEXE 2 : Code MatLab pour obtenir les images moyenne et RMS

```

clear all
close all
clc

%%% OUVERTURE IMAGES %%%
home = 'C:\Users\valdezpn\Desktop\Chimi_OH_Hassan'; % nom du répertoire des images tif brutes
FileTifPrefix = '2018 novembre 14
16_22_38_Qm1p6_Qa7p0_ouv2p8_G9000_T60micros_img1000-Frame-0'; % nom du préfixe des
images tif brutes
NbImages = 3000; % nombre d'images tif brutes
FileOut = 'imagemoyenne.dat'; % nom du fichier de sortie data
SizeX = 800; % 512 si IMAX2
SizeY = 1280; % 512 si IMAX2

ImageMOY = zeros(SizeX,SizeY);

cd(home)

%%% CALCUL MOYENNE %%%
disp('calcul image moyenne DEBUT')

for n = 1:NbImages;
    n=n+0;
    disp(['Traitement Image ',num2str(n)])

    if n < 10
        FileTifName = strcat(FileTifPrefix, '00', num2str(n), '.tif');
    elseif n >= 10 && n < 100
        FileTifName = strcat(FileTifPrefix, '0', num2str(n), '.tif');
    elseif n >= 100
        FileTifName = strcat(FileTifPrefix, num2str(n), '.tif');
    end

    ImageINST = double(imread(FileTifName));
    ImageMOY = ImageMOY + ImageINST;
end

ImageMOY = ImageMOY./NbImages;

disp('calcul image moyenne FIN')

%%% AFFICHAGE IMAGE MOYENNE %%%
figure

```

```

imagesc(ImageMOY);
axis image
colorbar

%%% ____ MISE A L'ECHELLE LABO ____ %%%
disp('Mise à l"echelle labo DEBUT')

count_pixel = 0;
for i = 1:SizeX
    for j = 1:SizeY
        count_pixel = count_pixel + 1;
        Xmm(i,j) = 0.23*(i-593.0); % grandissement en mm/pixel et position de l'origine du repère de flamme
        Ymm(i,j) = 0.23*(960.0-j); % grandissement en mm/pixel et position de l'origine du repère de flamme

    end
end
disp('Mise à l"echelle labo FIN')

%%% ____ ECRITURE TECPLOT ____ %%%
disp('Ecriture au format Tecplot DEBUT')
fid=fopen(FileOut,'w');
fprintf(fid,'%s\n','TITLE = "IMAGE MOYENNE"');
fprintf(fid,'%s\n','VARIABLES = "xpix","ypix","xmm","ymm","MOY"');
fprintf(fid,'ZONE I=%4.0ft J=%4.0fn',SizeX,SizeY);

count_pixel = 0;
for i = 1:SizeX
    for j = 1:SizeY
        count_pixel = count_pixel + 1;

        fprintf(fid,'%3.0ft %3.0ft %4.3ft %4.3ft %4.3ft %4.3ft %4.3ft %4.3fn
%4.3fn',i,j,Xmm(i,j),Ymm(i,j),ImageMOY(j,i));

    end
end
fclose(fid);

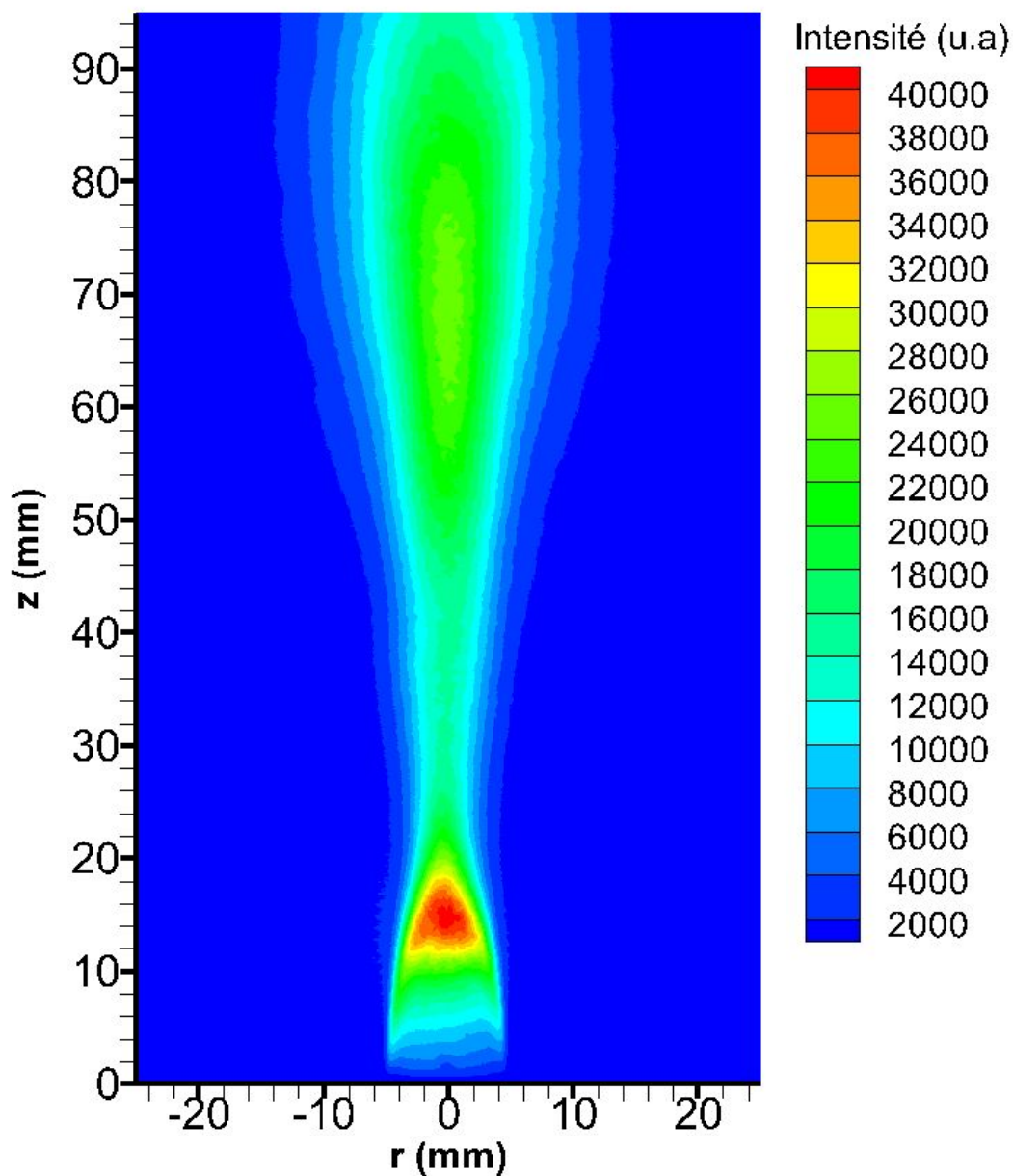
disp('Ecriture au format Tecplot FIN')

%%% ____ FIN ____ %%%
disp("")

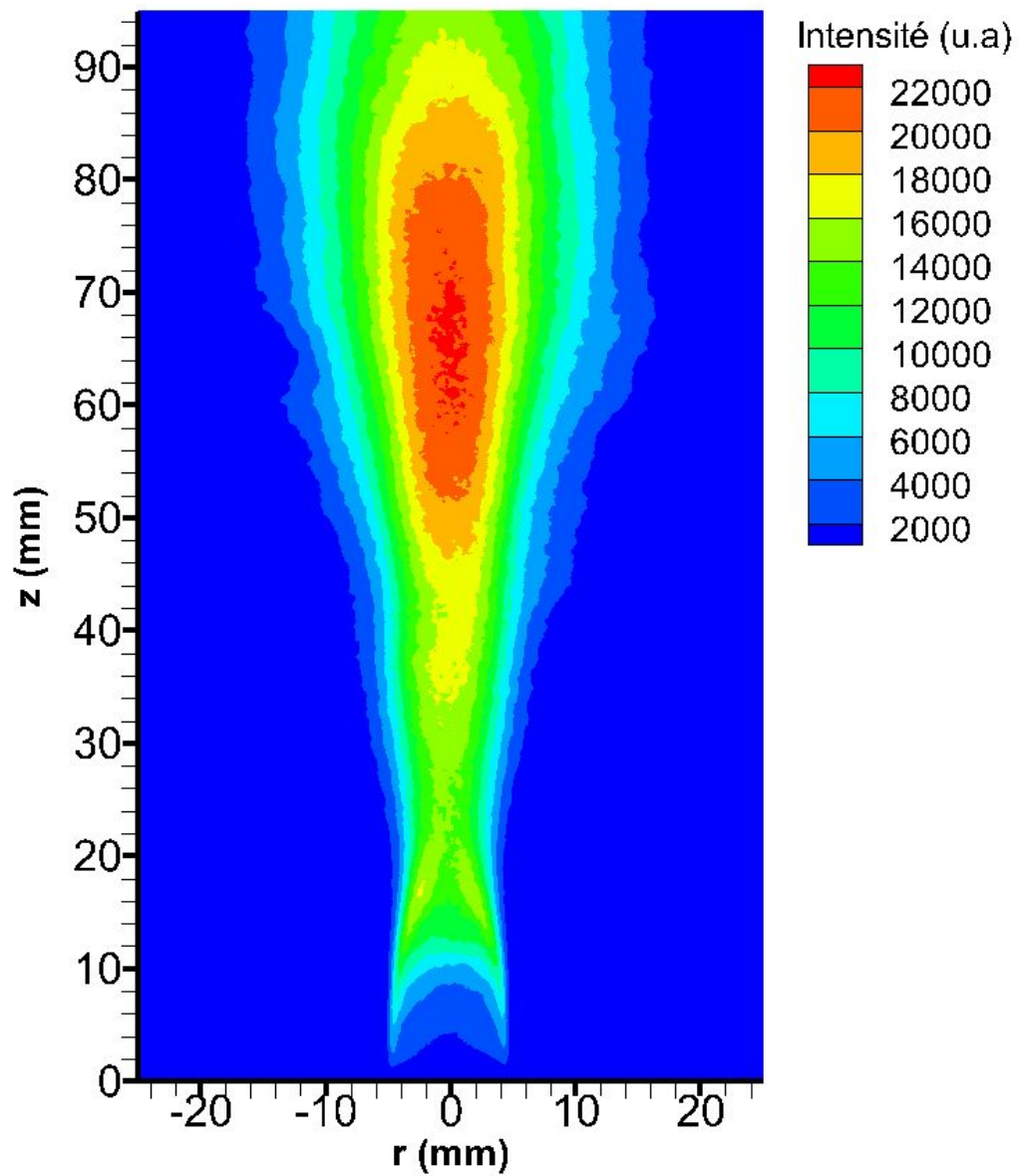
disp('This is the End...')
beep

```

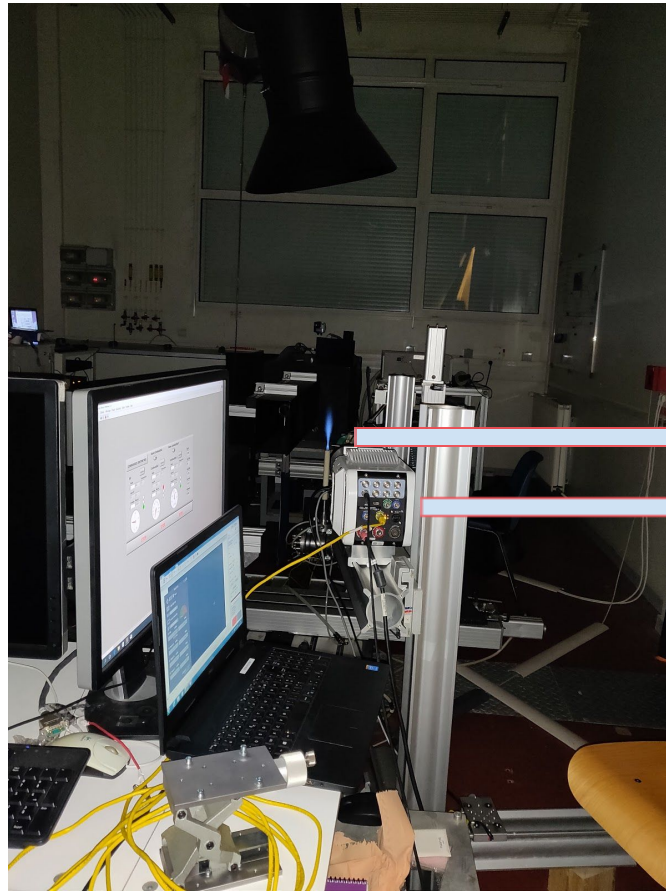
6.3. ANNEXE 3 : Image Moyenne



6.4. ANNEXE 4 : Image RMS



6.5. ANNEXE 5 : Photos du montage expérimental



Flamme et
brûleur
Caméra
avec filtre

