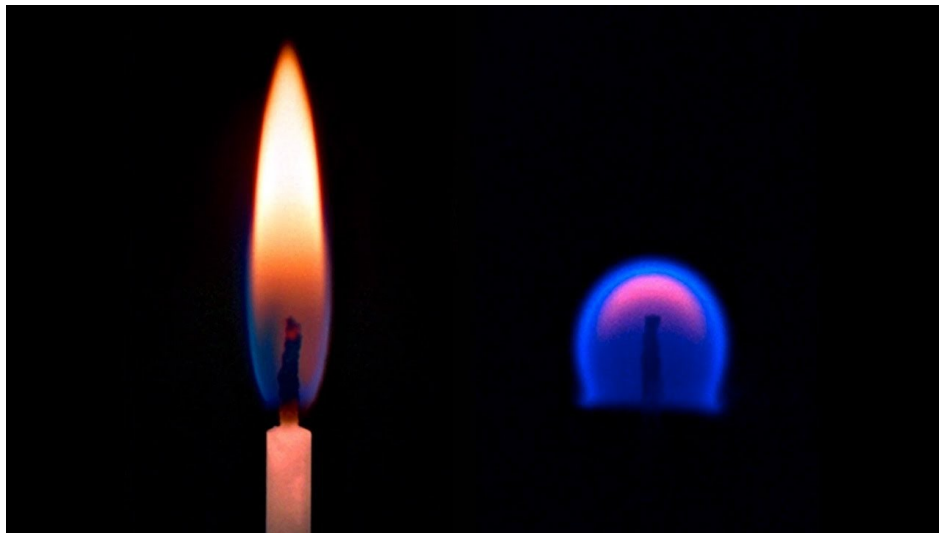


Dynamique d'activation d'une flamme froide dans un brûleur contre plaque.



Étudiants :

Théo GARYGA

Théotime TRESTARD

Pierre THIEUBAUT

Paul TOUTAIN

Alexandre SCHOPPHOFF

Enseignant-responsable du projet :

Nabil MOKRANI

Date de remise du rapport : *12/06/2021*

Référence du projet : *STPI/P6/2021 – 39*

Intitulé du projet : **Dynamique d'activation d'une flamme froide dans un brûleur contre plaque.**

Type de projet : **Recherche bibliographique, Expérimentations**

Objectifs du projet :

L'objectif de ce projet est de découvrir les flammes froides et leurs caractéristiques, notamment grâce à différentes techniques de diagnostic permettant l'analyse de celles-ci. Il permet aussi de comprendre en quoi elles pourraient représenter une alternative intéressante dans le cadre de la recherche pour la génération des moteurs de demain, dans l'optique de lutter contre le réchauffement climatique. Ce projet a aussi pour but de développer nos capacités à rechercher des informations en exploitant plusieurs sources, et de les synthétiser pour en faire un résumé clair et concis.

Mots-clefs du projet : *Flammes froides, techniques de diagnostic, moteur nouvelle-génération, enjeu environnemental*

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	4
TABLE DES FIGURES	5
NOTATIONS, ACRONYMES	6
1. INTRODUCTION ET CONTEXTE.....	7
2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL	7
3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS	8
3.1. Qu'est-ce qu'une flamme ? Comment cela fonctionne en général ?.....	8
3.2. Comparaison flammes chaudes et froides	9
3.2.1. Dynamique d'activation d'une flamme froide	10
3.3. Méthodes de diagnostic dans les milieux réactifs	11
3.3.1. Optique.....	12
3.3.1.1. Ombroscopie (Shadowgraph).....	12
3.3.1.2. Chimiluminescence	13
3.3.1.3. PLIF	14
3.3.1.4. Strioscopie/Schlieren.....	15
3.3.1.5. Back Oriented Schlieren	15
3.3.2. Chimique	16
3.3.2.1. Chimie prélèvement	16
3.3.2.2. Spectroscopie de masse, mesure de températures.	16
3.3.2.3. Chromatographie en phase gazeuse	17
3.3.3. Thermocouples.....	17
3.4. Applications de cette flamme froide ?.....	19
3.4.1. Intérêt d'une flamme froide.....	19
3.4.2. Deux types de moteurs	19
3.4.2.1. Moteur SACI.....	19
3.4.2.2. Moteur PPCI.....	20
3.4.3. Expérimentation : conception d'un schlieren à miroir	21
4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	23
5. BIBLIOGRAPHIE	25

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de la répartition du travail	8
Figure 2 : Différence entre une flamme froide et chaude (Princeton University).....	9
Figure 3 : Montage d'un dispositif d'activation d'une flamme froide (par M.Mokrani et les chercheurs du CNRS de l'université de Lille).....	10
Figure 4 : Dynamique d'activation d'une flamme froide avec du CH_2O^* , par chimiluminescence.....	11
Figure 5 : Schéma du dispositif d'ombroscopie.....	12
Figure 7 : Ombroscopie de flamme.....	13
Figure 6 : Ombroscopie directe d'un projectile	13
Figure 8 : Résultats obtenus par chimiluminescence	13
Figure 9 : Résultats obtenus par PLIF.....	14
Figure 10 : Schéma du dispositif du strioscopie orientée arrière-plan.....	15
Figure 11 : Schéma d'un dispositif de spectroscopie de masse	16
Figure 12 : Domaine d'utilisation en température des couples	17
Figure 13 : Jonction de thermocouple de type K	18
Figure 14 : Schéma de l'expérience réalisée par l'Université de Lille, 2019.....	18
Figure 15 : Fonctionnement d'un moteur SPCCI	20
Figure 16 : Moteur PCCI multiple fabriqué par une combinaison de 2 moteurs PCCI.....	21
Figure 17 : Schéma du schlieren à miroir conçu.....	21
Figure 18 : Photographie du schlieren à miroir.....	22
Figure 19 : Observation d'un briquet.....	22
Figure 20 : Observation d'une main.....	22
Figure 21 : Bloc de glace observé.....	23
Figure 22 : Prix des différents composants du schlieren.....	23

NOTATIONS, ACRONYMES

- **LTC**: *Low Temperature Combustion, combustion à basse température.*
- **LASER**: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement.*
- **PLIF**: *Production LASER Induced Fluorescence, imagerie de fluorescence induite par LASER.*
- **BOS**: *Background Oriented Schlieren, Schlieren orienté arrière-plan.*
- **CPG**: *Chromatographie en Phase Gazeuse.*
- **SACL**: *Spark Assisted Compression Ignition.*
- **SPCCL**: *Spark Controlled Compression Ignition.*
- **PPCL**: *Partially Premixed Compression Ignition.*

1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

Un des plus gros enjeux du XXI^e siècle est la lutte contre le réchauffement climatique, qui pourrait passer par la diminution des émissions des gaz à effet de serre, dont fait partie le dioxyde de carbone. Sachant que 60% des émissions de dioxyde de carbone mondiales sont dues au transport des passagers, il est essentiel d'être en perpétuelle recherche d'une autre façon de faire fonctionner les moteurs de ces transports. L'idée serait donc de développer l'utilisation rigoureuse d'une flamme froide, qui permettrait de diminuer fortement la consommation en carburant, et donc limiter les émissions de CO₂. En effet, les gaz à effet de serre représentent une source majeure de pollution et de dégradation de l'environnement, étant donné l'importance des transports dans le monde d'aujourd'hui. Par conséquent, une baisse des émissions de dioxyde de carbone constituerait une grande avancée dans la lutte contre le réchauffement climatique, et cela pourrait se faire grâce à la flamme froide.

C'est dans ce cadre que nous allons nous demander comment cette flamme froide pourrait réduire les problèmes liés à l'émission des gaz à effet de serre, et plus précisément dans quel contexte l'utiliser.

Pour répondre à cette problématique, nous avons organisé notre rapport en différentes parties. Dans un premier temps, nous expliquerons notre méthodologie de travail, et la manière dont nous nous sommes organisés. S'en suivront les travaux réalisés et les résultats qui représenteront une place majeure dans ce dossier. Nous y définirons la flamme froide, notamment en la comparant à la flamme chaude, pour ensuite nous porter sur toutes les méthodes de diagnostic qu'il peut exister pour caractériser et étudier ces flammes. Une expérience réalisée avec l'une de ces méthodes complètera notre étude et nos explications. Nous parlerons postérieurement des diverses applications de cette flamme froide ainsi que l'intérêt qu'elle peut représenter, et nous finirons par conclure en évoquant certaines perspectives d'avenir.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour la réalisation du rapport, la répartition des tâches s'est faite assez naturellement. Chacun a émis ses préférences quand nous avons eu nos axes de recherches. Pierre et Alexandre se sont occupés de la dernière partie sur les applications de la flamme froide aux moteurs. Quant à Théotime, Paul et Théo, ils se sont occupés de la partie introduction et conclusion, ainsi que la bibliographie. Et nous avons tous travaillé ensemble sur la partie des différentes méthodes de diagnostics, chacun s'occupant d'une méthode. Nous avons ensuite regroupé nos informations chaque vendredi matin sur le créneau en présentiel. Cela nous permettait de les croiser, et de rédiger le rapport tout en se mettant d'accord sur l'organisation de celui-ci. Nous avons également beaucoup échangé sur un groupe Messenger, en fixant parfois certains rendez-vous de travail hors créneau du vendredi, par exemple pour finir de mettre en place le schlieren à miroir.

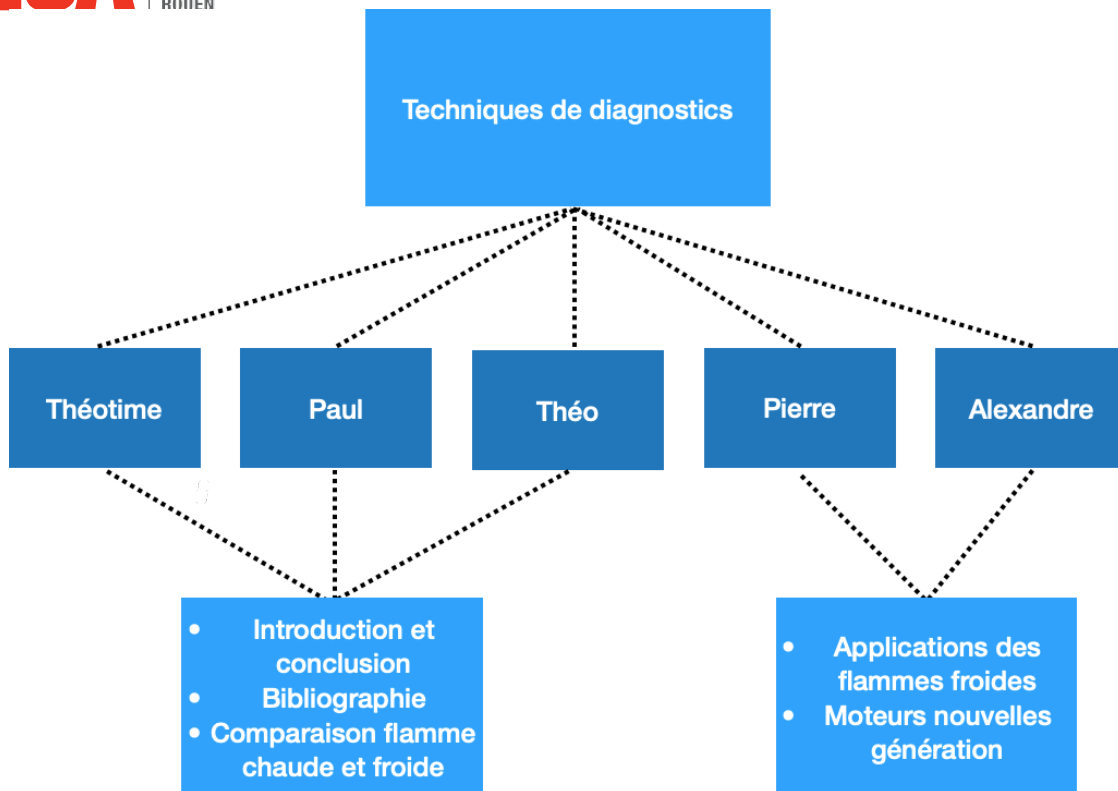


Figure 1 : Organigramme de la répartition du travail

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1. Qu'est-ce qu'une flamme ? Comment cela fonctionne en général ?

Comment parler de flamme sans évoquer la combustion ? C'est précisément cette réaction qui est à l'origine de toute flamme, qu'elles soient froides, comme nous les étudierons plus tard dans le dossier, ou chaudes, comme la plupart d'entre nous les connaissons. Ainsi, qu'est-ce que la combustion ? Ce que l'on nomme combustion est en fait une réaction exothermique d'oxydoréduction entre le réducteur (combustible) et l'oxydant (comburant). En général, le comburant est l'oxygène, pour les flammes usuelles du moins, mais dans notre cas nous verrons que certains de ces paramètres diffèrent lorsque nous désirons obtenir une flamme froide.

Mais qu'est-ce qu'une flamme froide ? Sa découverte remonte au début du XIXe siècle, le chimiste et physicien Anglais Sir Hemphry Davy, inventeur de la lampe Davy (conçue pour prévenir des explosions dues au grisou dans les mines), est le premier à observer en 1812 les réactions des hydrocarbures dans l'air à basse température, celles-ci s'amorçant après une période d'induction et produisant une pâle chimiluminescence bleue. Cependant, les chercheurs ont découvert bien plus tard leurs potentiels, seulement vers la fin du XXe siècle. Nous le verrons en détail plus tard, mais les propriétés des flammes froides pourraient révolutionner les moteurs à combustion tels que nous les connaissons, inventés dans les années 1860. L'appellation flamme froide arrive en 1929. Il est aussi découvert que plusieurs espèces peuvent produire une flamme froide comme les hydrocarbures, les alcools, aldéhydes, cétones etc... Mais quelles sont les caractéristiques d'une flamme froide, et qu'est-ce qui les différencie des flammes standards ? (Yiguang Ju, Christopher B. Reuter, Omar R. Yehia, Tanvir I. Farouk, 2019) [1]
(Cool Flame, Wikipédia) [2]

3.2. Comparaison flammes chaudes et froides

Premièrement, comme l'induit leur nom, la température à laquelle brûle les flammes froides est bien plus faible que pour les flammes chaudes. En effet, cette température se situe entre 200 et 400°C environ, tandis que celle des flammes chaudes est d'environ 1200°C. Les réactions de combustion produisant des flammes froides (appelées parfois Low Temperature Combustion (LTC)) sont également caractérisées par une faible augmentation de pression. (*Griffiths, 2004*) [3]

Le triangle du feu est toujours valide pour les flammes froides. Il y a, comme nous l'avons évoqué dans l'introduction toujours un combustible, un comburant et une énergie d'activation. Cette dernière peut être une étincelle, une focalisation LASER, une surface chaude (plaque), ou éventuellement une auto-inflammation, c'est le processus intervenant dans les moteurs diesel par exemple. Ce qui diffère cependant sont les combustibles et comburants utilisés. En effet, les principaux comburants intervenant dans la production de flammes froides sont l'ozone (O₃) et l'oxygène (O₂).

Une autre différence est que les molécules de la flamme chaude s'associent très rapidement à de l'oxygène, formant du CO₂ en grand nombre, ce qui n'est pas le cas de la flamme froide. Chez cette dernière, les molécules réagissent en chaîne entre elles, cela crée donc beaucoup moins de CO₂ et la réaction peut donc durer beaucoup plus longtemps, puisque beaucoup moins de comburant est consommé. On dit alors que la vitesse de combustion des flammes chaudes est supérieure à celle des flammes froides.

Comme nous l'avons précisé précédemment, on utilise de l'ozone pour la flamme froide, avec une petite quantité de fuel basse richesse (richesse autour de 0,5). On parle de richesse stœchiométrique lorsque la richesse vaut 1 et on parle de fuel haute richesse lorsque la combustion est complète. Un fuel haute richesse peut aussi être utilisé mais son emploi n'est pas intéressant car il produit bien plus de polluants. Ainsi, le fuel basse richesse réagit très peu avec l'O₂ donc produit moins de CO₂ et autres produits polluants comme le monoxyde de carbone (CO), d'où son utilité. Les espèces produites avec les flammes froides sont souvent du formaldéhyde/méthanal qui sont des espèces très dangereuses : cancérigène, mutagène. C'est l'une des limites des flammes froides, et pour l'instant un de ses plus gros inconvénients.

Les flammes froides sont beaucoup plus faibles en intensité, plus sombres donc moins visibles. Elles sont caractérisées par une faible émission de lumière, principalement à cause du CH₂O* (formaldéhyde excité par chimiluminescence), qui requiert une adaptation des yeux pour être vue, ou une caméra spécialisée. (*N. Mokrani*) [4]

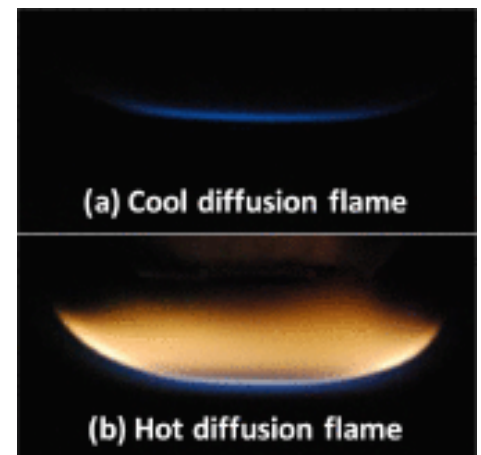


Figure 2 : Différence entre une flamme froide et chaude (Princeton University)

	<i>Flammes froides</i>	<i>Flammes normales</i>
ΔT (°C) (dans l'air)	10-200 (400)	1600-2700
$P_{\text{explosion}}/P_0$ (en espace confiné)	< 2	6-11
Vitesse de flamme (cm/s)	3-8	30-80
Domaine d'inflammabilité	Large	Etroit
Exothermicité	Faible	Forte
Coefficient de température	Négatif	Positif
Produits caractéristiques	CH ₂ O, CO	H ₂ O, CO ₂

Figure 2 : Comparaison entre les flammes froides et les flammes en combustion normale

Facteurs de perturbation de la flamme froide :

Les flammes froides sont facilement perturbables notamment par l'air extérieur et la pression. Il faut donc créer un environnement isolé avec une pression déterminée, sans interaction avec l'expérimentateur car les réactifs et les produits de la réaction sont très nocifs comme expliqué précédemment. L'O₃ est un neurodégénérateur par exemple.

3.2.1. Dynamique d'activation d'une flamme froide

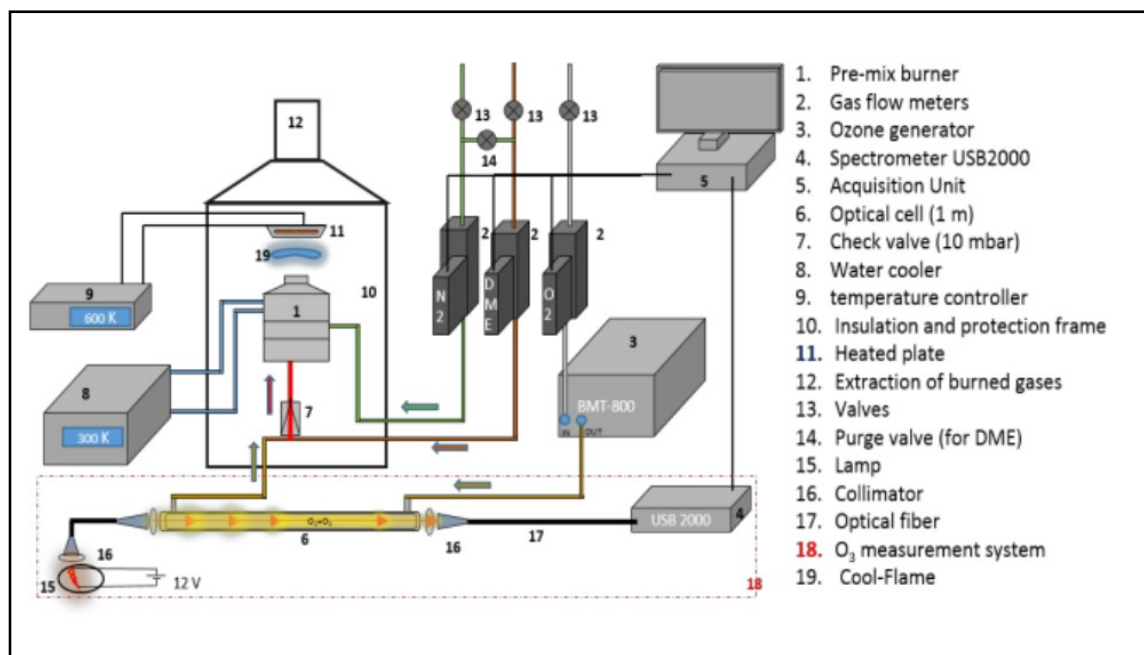
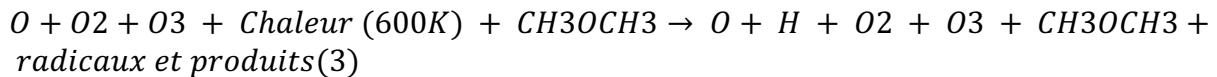


Figure 3 : Montage d'un dispositif d'activation d'une flamme froide (par M.Mokrani et les chercheurs du CNRS de l'université de Lille)

La dynamique d'activation d'une flamme froide dans un brûleur contre plaque est très compliquée d'un point de vue chimique, la cinétique de l'ozone, même largement étudiée dans plusieurs domaines, reste incomplète. Il est connu que l'ozone se décompose à une température inférieure à 500 K. L'effet du chauffage de la plaque à 600 K décompose l'ozone selon l'équation (Eq. 2), l'oxygène atomique quand on ajoute du carburant réagit avec. Ce processus provoque des collisions et une surchauffe qui donne un emballement thermique pour activer la combustion à faible cinétique (Eq. 3).



L'activation de la flamme froide passe par trois étapes principales :

Activation pariétale (1 s après l'ouverture du gaz) : L'ozone se décompose en dioxygène et en oxygène atomique qui réagit avec le mélange gazeux ; à ce stade, la zone réactive adhère à la plaque de surface, les effets catalytiques ne sont pas négligeables pendant cette étape.

Formation d'un front de flamme et détachement de la plaque de surface (entre 1s et 9.6 s après l'ouverture du gaz) : À ce moment la réactivité augmente et devient beaucoup plus élevée que la réaction catalytique qui tend à accrocher la flamme à la surface.

Stabilisation de la flamme (à 10.2 s dans la Figure 4) : Dans cette étape la flamme est stabilisée entre le brûleur et la paroi et le front de flamme prend une position fixe pour chaque mélange réactif étudié.

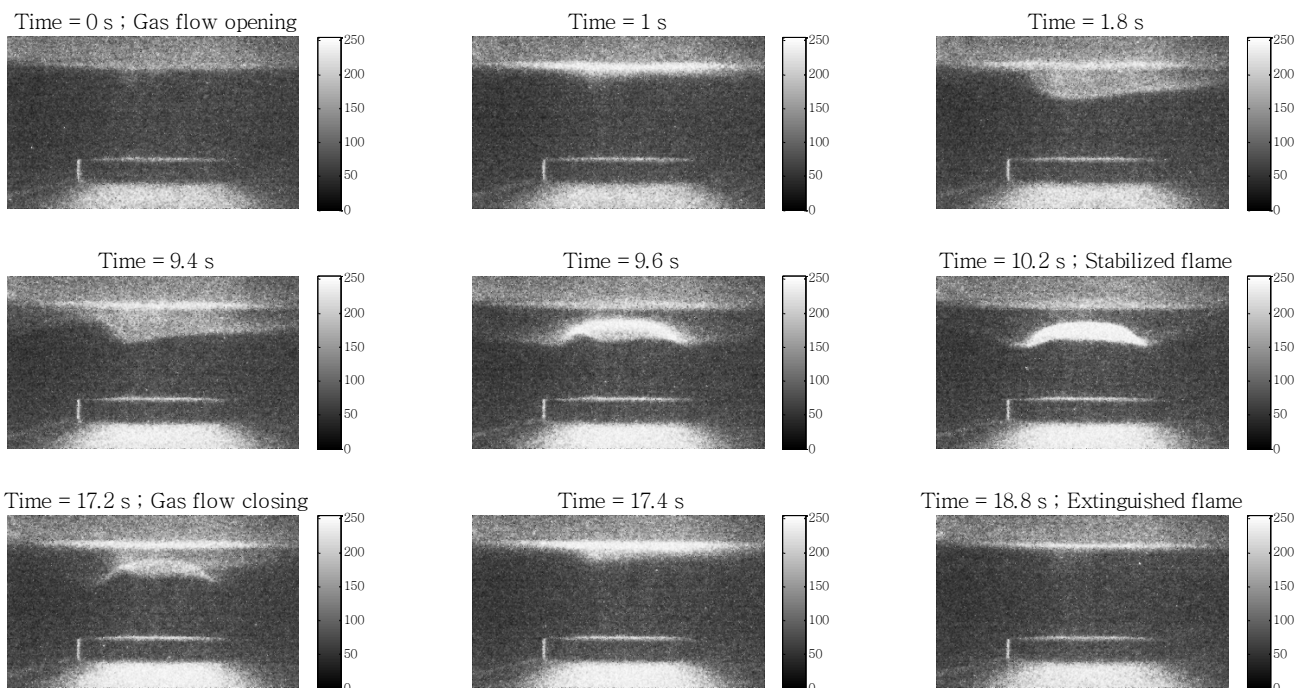


Figure 4 : Dynamique d'activation d'une flamme froide avec du CH_2O^* , par chimiluminescence

Une autre étape à ajouter est l'extinction qui représente le chemin inverse en fermant le gaz réactif. La Figure 4 représente un cas d'activation de flamme froide. La durée de chaque étape dépend de toutes les conditions expérimentales.

3.3. Méthodes de diagnostic dans les milieux réactifs

Les méthodes dites de diagnostic permettent de visualiser les espèces, les formes, zones réactives... tout ce qui caractérise la flamme en somme, tout ce qui les différencie. Plusieurs grandeurs caractérisent la combustion et les flammes, elles peuvent être mesurées par

l'utilisation de diagnostics optiques. Par exemple, la température, la vitesse des phases gazeuses, la taille des gouttes ou des particules solides, l'évaporation de gouttes et la concentration de certaines espèces chimiques etc...

Les techniques de mesure de température ont fortement évolué ces 30 dernières années. Dans les années 1970-80, les méthodes intrusives à base de sondes étaient encore les plus utilisées, mais ensuite ces techniques ont vu leur emploi diminuer avec l'arrivée de techniques optiques non intrusives, composée dans la plupart du temps de LASER. Cette évolution a permis l'exploration et l'analyse de milieux réactifs jusque-là difficilement abordables.

De nombreuses techniques de mesure basées sur les diagnostics optiques ont été développées depuis plusieurs décennies. L'arrivée des lasers en a été l'élément moteur. De nos jours, plusieurs d'entre elles sont devenues des outils indispensables pour aborder la compréhension de phénomènes complexes (combustion, chimie réactionnelle, interaction entre chimie et turbulence...).

Les méthodes intrusives (utilisation d'un thermocouple pour la température par exemple) perturbent l'écoulement mais sont idéales pour mesurer la température. Les méthodes non intrusives sont néanmoins plus précises. Nous allons classer les différentes méthodes de diagnostics en deux grandes catégories : les techniques optiques et les techniques chimiques. (N.Mokrani) [4]

3.3.1. Optique

La première grande famille est donc celle des techniques de diagnostic optiques. Ces techniques LASER reposent sur l'interaction entre la lumière émise par le laser et la matière du milieu sondé. Il faut également différencier deux types de diagnostics : les méthodes intrusives et les méthodes non-intrusives. Chacune de ces méthodes ont leurs avantages et inconvénients, c'est pour cela qu'une seule ne suffit pas, elles se complètent. Les méthodes intrusives perturbent le milieu, mais la mesure d'une température y est idéale, et les méthodes non intrusives quant à elles sont plus précises.

3.3.1.1. Ombroscopie (Shadowgraph)

L'ombroscopie est une méthode de visualisation optique qui nécessite une source de lumière parallèle et une caméra placée face à celle-ci. La lumière éclaire l'objet transparent à étudier et la caméra enregistre l'ombre de cet objet. C'est une technique non-intrusive de visualisation d'écoulement qui consiste à placer le fluide perturbé que l'on étudie entre une source lumineuse quasi-punctuelle et un capteur réceptionnant la lumière. Il est possible d'observer des variations locales d'éclairement d'un milieu transparent si celui-ci présente des variations d'indice de réfraction. (Parsinejad et al., 2007) [5], (Techniques de Visualisation)

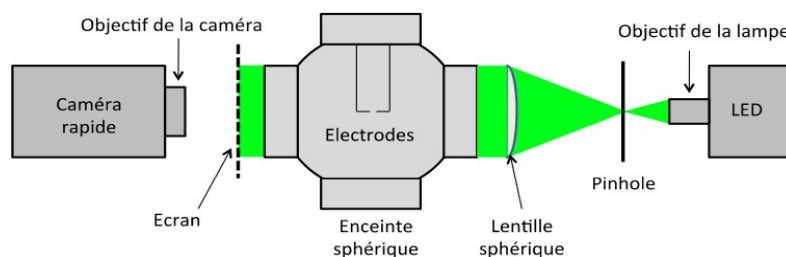


Figure 5 : Schéma du dispositif d'ombroscopie

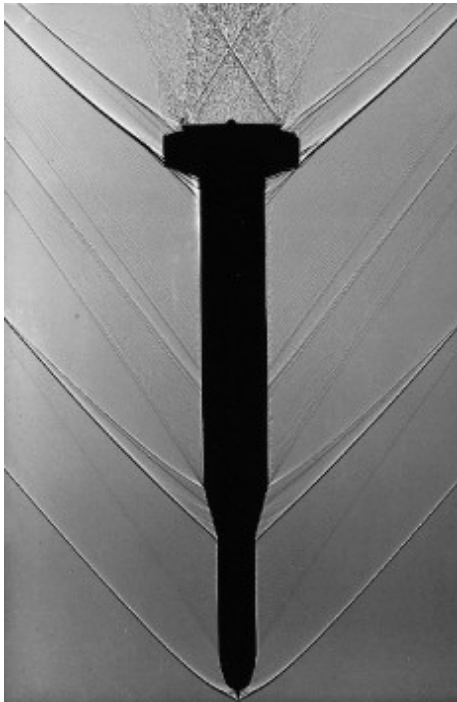


Figure 6 : Ombroscopie directe d'un projectile

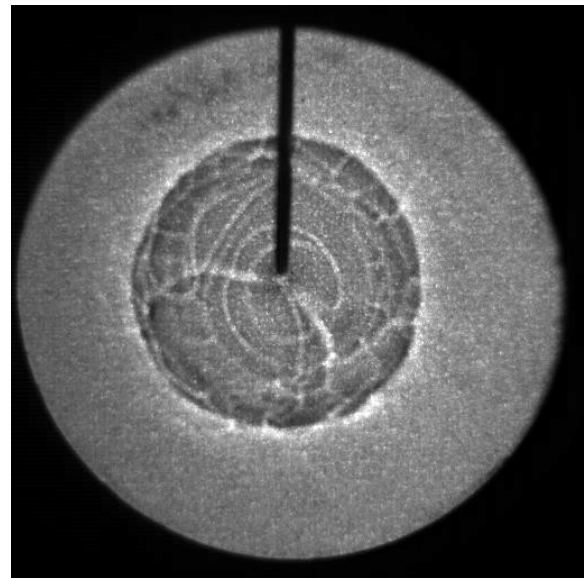


Figure 7 : Ombroscopie de flamme

3.3.1.2. Chimiluminescence

La méthode de la chimiluminescence requiert l'usage d'une caméra intensifiée, celle-ci capte les photons et les accentue par 100 voire 1000 (pour voir une flamme froide, il faut intensifier les photons car la flamme n'est pas visible à l'œil nu). La subtilité de cette technique est qu'il faut filtrer les longueurs d'onde, car toutes les espèces ne sont pas intéressantes, par exemple, pour ne pas voir le CO_2 autour de la flamme, on peut utiliser un filtre qui va capter les longueurs d'ondes émises par le CO_2 . Dans le cas d'une combustion, l'espèce est déjà excitée (CH_2O), cette dernière émet donc des photons qui seront captés grâce à la caméra intensifiée. (N.Mokrani)[4]

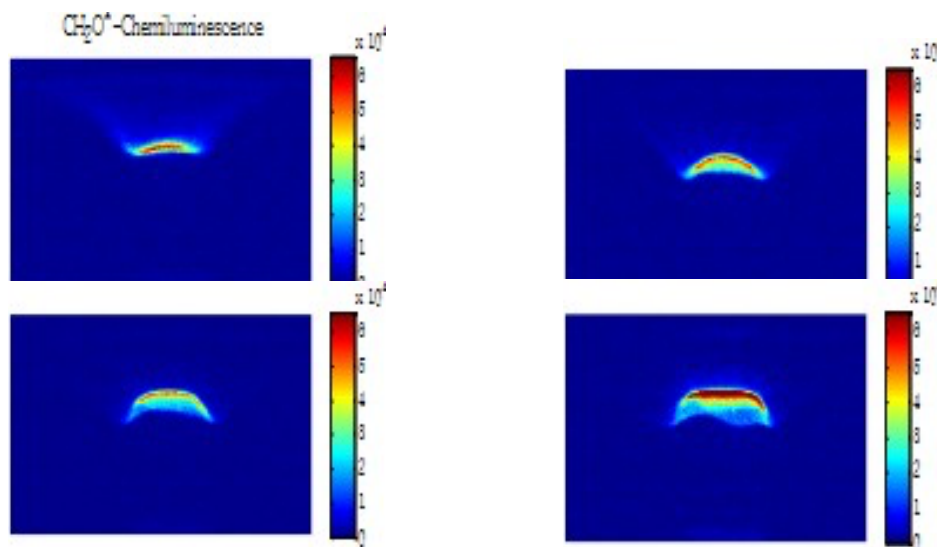


Figure 8 : Résultats obtenus par chimiluminescence

Exploitation des données à partir de l'image obtenue : La caméra intensifiée nous rend une image en 3D, on la traite grâce à des logiciels (par exemple Matlab) pour obtenir une image dans le plan focal de la caméra.

3.3.1.3. *PLIF (Production Laser Induced Fluorescence, imagerie de fluorescence induite par laser)*

La méthode du PLIF consiste en l'excitation d'une espèce (formaldéhyde dans le cas d'une Low Temperature Combustion) avec un LASER pour qu'elle émette un photon et soit observable. Un faisceau laser est transformé en un plan de lumière (ou volume) puis traverse la zone du fluide d'intérêt. La lumière émise par le photon passe ensuite à travers un filtre, et arrive dans l'objectif de la caméra intensifiée. Les images de PLIF sont converties en champs de concentration ou de température. (*Fluorescence Induite Par Laser*) [7]

En général, ce sont les OH qui émettent les photons pour les fronts de flammes chaudes. La PLIF est une méthode spécifique à une espèce chimique et à un état quantique, elle est donc sensible à la température, la densité numérique, la composition et la rapidité des espèces. Autre avantage : elle donne des informations instantanées sur tout le plan du champ de flux, sans lumière visible comme avec les méthodes Schlieren ou Shadowgraph. Elle peut cependant être assez compliquée à mettre en place car les effets de l'extinction collisionnelle, processus qui inhibe la fluorescence des espèces, doivent être pris en compte dans l'analyse du signal. L'étalonnage du PLIF se fait par chromatographie, avec un capillaire. Chaque prélèvement peut durer entre 1 et 2 heures, il permet de mesurer la concentration de l'espèce sondée. (*N.Mokrani*)[4]

Pour résumer, grâce à la PLIF, il est possible d'exciter une espèce pour qu'elle émette de la lumière dans un mélange qui peut contenir des centaines d'espèces. Grâce à sa sensibilité, la PLIF permet de détecter des radicaux de flammes ou autres espèces à des niveaux ppm (partie par million) et même sous-ppm. La sélectivité est le principal avantage de cette technique. Néanmoins, il faut noter que la PLIF est inutile si l'espèce que l'on veut observer est déjà excitée.

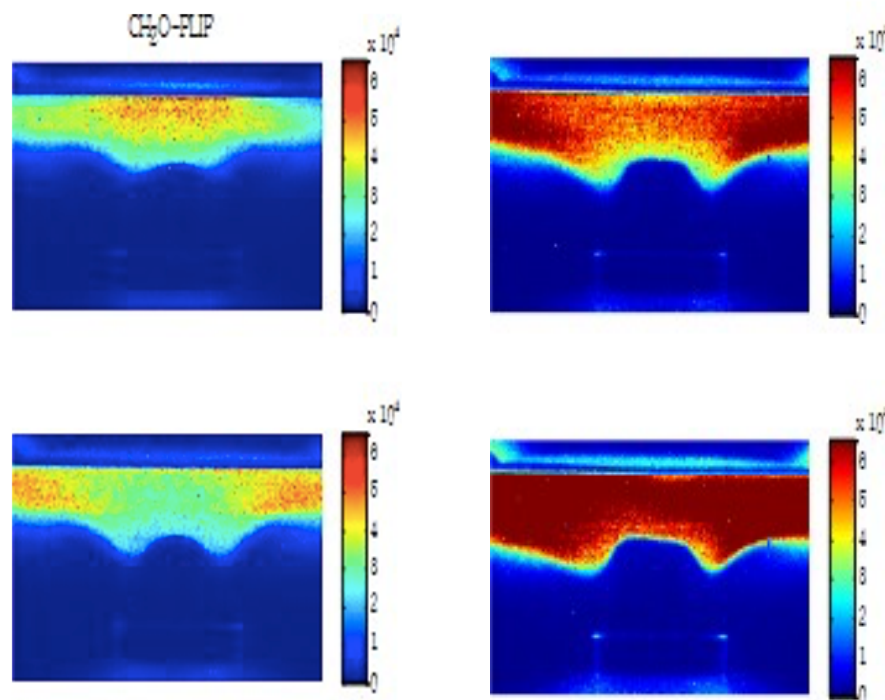


Figure 9 : Résultats obtenus par PLIF

3.3.1.4. *Strioscopie/Schlieren*

La strioscopie est une méthode optique de visualisation qui permet d'isoler dans une image les détails et petites variations, notamment des faibles variations d'indice de réfraction comme lors de la compression de l'air ou d'autres fluides ou lorsqu'il y a un changement de température. Cela est possible car il y a un changement d'indice de réfraction à cause de la chaleur ou de la densité, cela permet notamment de visualiser des flux d'air, des flammes etc... Il existe différents types de schlieren : les schlieren à lentilles, les schlieren à miroir ou encore le Back Oriented Schlieren (BOS). Un schlieren classique est composé de 2 lentilles tandis que pour avoir un BOS, il suffit de remplacer la première lentille par une grille de points. Cette grille ressemble à une plaque transparente avec des "points" (notée Background screen sur le schéma ci-dessous). (Kumar & Krishnamurthy Muralidhar, 2012) [8] ; (Imagerie BOS, n.d.) [9]

3.3.1.5. *Back Oriented Schlieren (BOS) / Strioscopie orientées arrière-plan*

Le BOS est un type de Schlieren synthétique. Il nécessite un grand traitement d'image mais permet de visualiser la vorticité, les sillages, les turbulences de l'espace et le gradient de densité, ce qui peut être très utile. La technologie du BOS consiste à mesurer des déviations lumineuses (dérivées du front d'onde) sur une grille de points et d'en déduire les caractéristiques du composant. Dans des configurations classiques de Schlieren, un faisceau lumineux collimaté est dévié à travers une lame ou « couteau de Foucault », provoquant un changement d'intensité lumineuse dans la direction perpendiculaire à la lame. Classiquement, la technique BOS utilise un mouchetis, composé d'un ensemble de points monochromes générés de manière aléatoire par ordinateur et placé à l'arrière du volume de test. Ce mouchetis doit avoir une fréquence spatiale élevée et présenter un fort contraste. Des études préliminaires ont montré qu'une répartition optimale consistait en un nombre de points recouvrant entre 30% et 50% de la surface de l'image d'arrière-plan. Cette méthode est généralement utilisée pour observer des écoulements hydrodynamiques, prendre en photos les avions qui passent le mur du son, filmer les flammes froides. (Kumar & Krishnamurthy Muralidhar, 2012) [8] ; (N. Mokrani) [4]

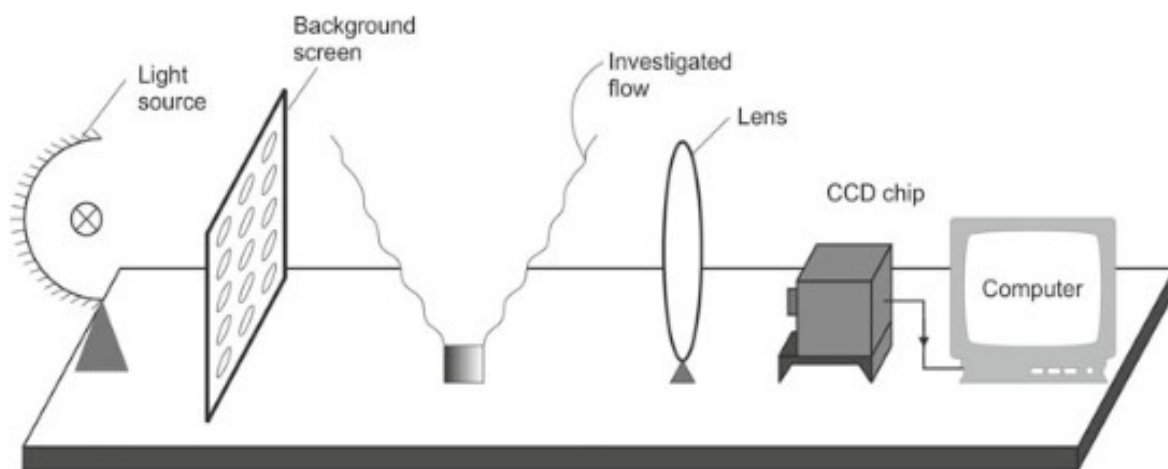


Figure 10 : Schéma du dispositif de strioscopie orientée arrière-plan

3.3.2. Chimique

La deuxième grande famille des méthodes de diagnostics sont les méthodes dites chimiques. Nous allons vous présenter quelques exemples de ces techniques chimiques, utilisées pour caractériser les flammes. Nous les classerons en deux familles, les méthodes dites ex-situ et celles in-situ.

3.3.2.1. Chimie prélèvement

C'est un terme général qui désigne les méthodes dites ex-situ, c'est-à-dire les analyses s'effectuant sur un mélange qui n'est plus dans son milieu d'origine. Par exemple sur un mélange qui a été prélevé. Donc pour analyser les caractéristiques d'une flamme, on prélève un échantillon de la flamme, avec une sonde ou un capillaire (dans notre étude des flammes froides, leur ouverture est de l'ordre d'une centaine de microns). Il faut cependant veiller à ne pas perturber la flamme, ce qui est assez délicat. On transporte ensuite ce prélèvement à travers des tubes pour l'analyser après par chromatographie, spectroscopie de masse etc... (N. Mokrani) [4]

3.3.2.2. Spectroscopie de masse, mesure de températures.

La spectroscopie de masse est une technique qui consiste à identifier les espèces moléculaires par mesure de leur masse. Elle permet aussi de déterminer la structure chimique des molécules en les fragmentant. Cette technique se base sur la séparation des composants en fonction de leur rapport masse/charge. Pour simplifier, le spectromètre accélère les composants, et puisque les espèces du mélange prélevé ont des masses différentes, il est capable de les séparer et de les identifier. Un spectromètre de masse est composé de quatre parties : un système d'introduction de l'échantillon, la source d'ionisation, l'analyseur, le détecteur et système de traitement. Un des gros avantages de cette méthode est de pouvoir transmettre des informations à partir d'une quantité infime d'échantillons (de l'ordre du picogramme). (N. Mokrani) [4]

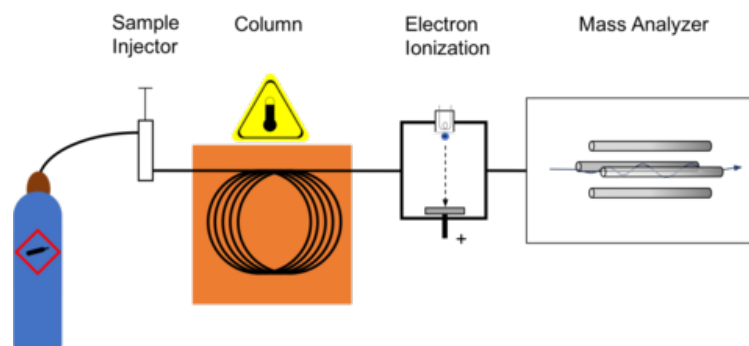


Figure 11 : Schéma d'un dispositif de spectroscopie de masse

3.3.2.3. Chromatographie en phase gazeuse

La chromatographie est une méthode d'analyse très répandue, utilisée dans quasiment tous les domaines, dès qu'il s'agit d'analyser les espèces d'un mélange.

Il en existe différents types : chromatographie sur couche mince, chromatographie en phase liquide etc... mais ici nous nous intéressons uniquement à la chromatographie en phase gazeuse (CPG) car c'est celle utilisée pour les flammes.

La CPG permet, comme avec la spectroscopie de masse, de séparer et d'analyser les composants d'un mélange gazeux, en prélèvement un échantillon de la flamme. La CPG permet également d'analyser et d'identifier tous les composants aspirés, donc par exemple les espèces ayant réagi (vapeur d'eau, oxygène, composants organiques comme le formaldéhyde non-excité). Cependant, il est important de préciser que la CPG repère uniquement les espèces stables.

3.3.3. Thermocouples

Contrairement à la méthode de chimie prélèvement, cette méthode est dite "in situ", c'est-à-dire qu'on relève les températures directement sur le lieu de la combustion. (*Frédéric GRISCH, Pierre GICQUEL, 2009*) [10]

Ce type de capteur intrusif est un des moyens les plus utilisés dans l'industrie pour les mesures de température. Les thermocouples sont en général bon marché et permettent d'effectuer des mesures dans une gamme très étendue de température (typiquement de -200 °C à environ 1850 °C).

Dans notre cas, pour la mesure de températures dans une flamme, le diamètre des thermocouples est généralement très faible (de l'ordre des micromètres) donc cela ne perturbe pas énormément la flamme. Il existe également différents types de thermocouples (Types, K, S...) leur forme peut changer, leur diamètre, mais également le matériau de ceux-ci, certains sont en nickel, d'autres en platine...

Code	Sensibilité moyenne ($\mu\text{V}/\text{°C}$)	Domaine d'utilisation (°C)
T	51	- 200 à 370
J	55	- 40 à 800
E	78,5	- 270 à 870
K	41	- 270 à 1 270
S	11,4	- 50 à 1 600
R	12,9	- 50 à 1 600
B	10,6	0 à 1 700
N	38	- 270 à 1 300

Figure 12 : Domaine d'utilisation en température des couples

Lorsque les températures restent assez faibles (inférieures à 700 K), les mesures des températures par un thermocouple restent assez précises, mais lorsque la température est élevée,

il y aura des échanges par rayonnement et donc les mesures seront faussées, ou alors il faudra corriger les erreurs avec des formules adaptées.-

Ainsi, l'utilisation d'un thermocouple dans le cadre d'une flamme reste pertinente pour une flamme froide, car les mesures sont assez précises, mais dans le cas d'une flamme chaude, il est nécessaire de corriger les erreurs dues au rayonnement. Un type K par exemple, sera tout à fait adapté pour la mesure des températures d'une flamme froide.

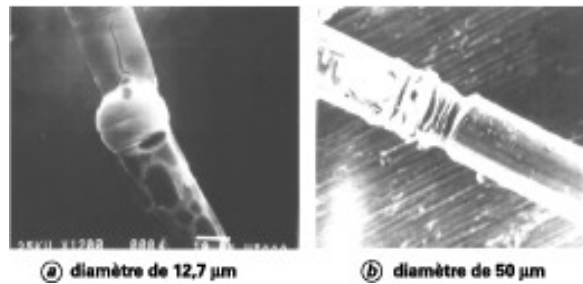


Figure 13 : Jonction de thermocouple de type K

Nous avons donc présenté différentes méthodes de diagnostic, optiques chimiques, intrusives, ex-situ... Nous les avons présentées séparément, mais en réalité elles se complètent, car comme nous l'avons expliqué, certaines ont des avantages que les autres n'ont pas, et elles ne permettent pas de visualiser toutes les mêmes données. Voici un exemple d'expérience réalisée par les chercheurs CNRS de l'Université de Lille en 2019, celle-ci avait pour but de stabiliser une flamme froide et d'étudier, d'analyser les caractéristiques d'une combustion basse température. (Mokrani et al., 2019) [11]. Ce montage utilise à la fois la méthode de la chimiluminescence (A) et la méthode du PLIF (B).

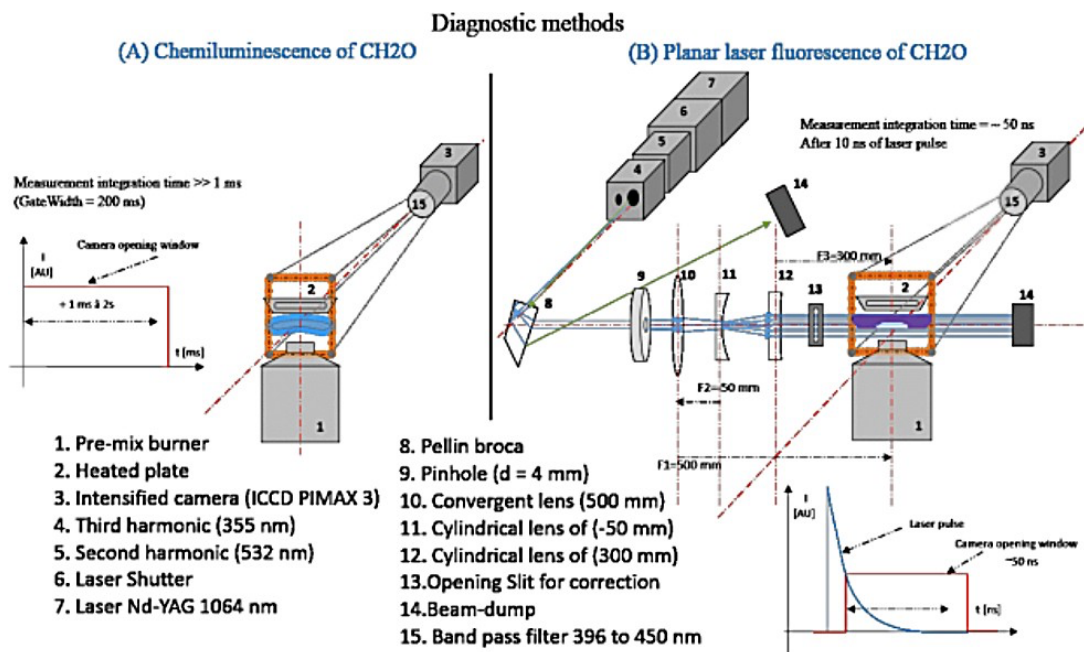


Figure 14 : Schéma de l'expérience réalisée par l'Université de Lille, 2019

3.4. Applications de cette flamme froide ?

3.4.1. Intérêt d'une flamme froide

Les flammes froides ont été découvertes depuis plus d'un siècle, mais les scientifiques et les chercheurs leur ont trouvé une réelle utilité sur les moteurs à combustion que depuis quelques décennies. Ainsi, les moteurs nouvelle génération ne sont pour l'instant que des prototypes, des idéaux loin d'être produits pour le moment. Ils pourraient cependant révolutionner le moteur à combustion que l'on connaît tous, inventé dans la deuxième moitié du 19^e siècle.

En effet, ces nouveaux moteurs ont de multiples avantages : ils sont bien moins polluants, ils consomment 3 fois moins de carburant, et rejettent moins de CO₂.

Quelle est l'utilité d'un brûleur ? Un brûleur basse température permet d'étudier les flammes froides en régime permanent, et en outre de les stabiliser, l'arrivée de combustible/comburant est bien contrôlée. Le principe est d'étudier le comportement de différents combustibles, notamment les biocarburants. (N. Mokrani) [4]

3.4.2. Deux types de moteurs

3.4.2.1. Moteur SACI (Spark Assisted Compression Ignition)

Nous venons d'évoquer le fait que les flammes froides pourraient révolutionner les moteurs à combustions classiques, nous allons donc les présenter. SACI (Spark Assisted Compression Ignition) ou SPCCI (Spark controlled Compression Ignition) est une méthode de combustion utilisant une bougie d'allumage afin d'initier une flamme de déflagration qui entraîne une énergie d'allumage suffisante pour déclencher l'auto-inflammation dans la charge restante. La phase de propagation de la flamme limite la vitesse de montée en pression du cylindre, alors que l'auto-inflammation complète rapidement la combustion. Une forte dilution dans la charge auto-allumée est généralement nécessaire pour maintenir des vitesses de réaction réalisables pour la production. Cependant, cette forte dilution peut ne pas être allumée de manière fiable par la bougie d'allumage. Ces contraintes concurrentes exigent de nouvelles stratégies de préparation du mélange pour que le SACI soit réalisable en production. Le SACI avec stratification de charge a démontré une propagation de flamme suffisamment stable pour déclencher de manière fiable l'auto-inflammation sur une grande partie de la carte de fonctionnement du moteur.

(Yvonnick Gazeau, 2018) [12]

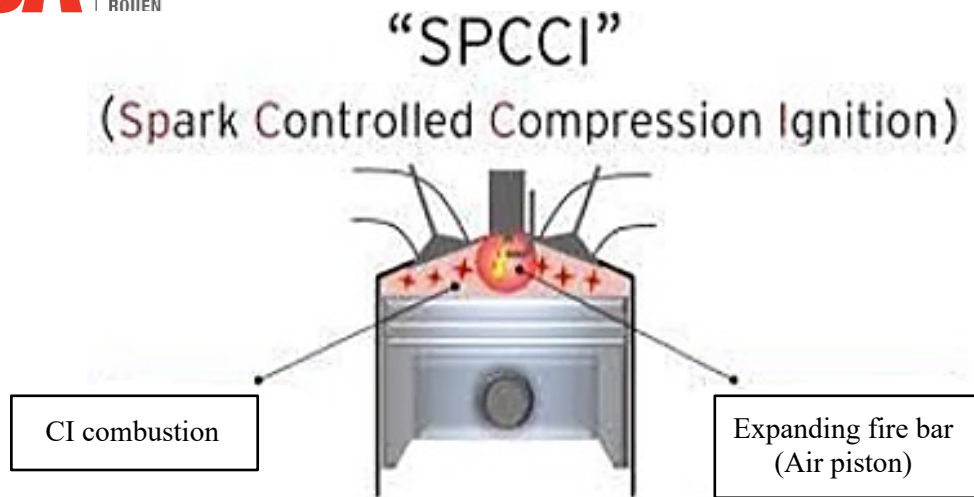


Figure 15 : Fonctionnement d'un moteur SPCCI

3.4.2.2. Moteur PPCI (Partially Premixed Compression Ignition)

Selon le Traité de coopération sur les brevets (Patent Cooperation Treaty), l'objectif d'un moteur PPCI est de produire un moteur à allumage par compression de mélange pré-mélangé. Ce dernier présente un injecteur (22) de carburant situé dans un collecteur d'aspiration (8), ce dernier permettant de préparer un mélange pré mélangé de carburant et d'air ainsi que d'induire un allumage naturel du mélange dans une chambre de combustion (20) à température et pression élevées (**voir Figure 15**). Le moteur PPCI comprend, de plus, une tige de connexion améliorée de manière structurelle, présentant un ressort associé de manière organique à d'autres éléments du moteur. L'invention concerne également un générateur alternatif PPCI produit par association d'une unité générateur alternatif et d'un moteur PPCI, de sorte que le générateur alternatif PPCI fonctionne avec une efficacité fonctionnelle accrue. Selon l'invention, deux moteurs PPCI peuvent être disposés face à face l'un par rapport à l'autre de manière symétrique, ce qui permet de produire un moteur PPCI multiple. (*La Chimie Au Cœur de l'atmosphère et Des Moteurs à Combustion, 2014*) [13]

L'intérêt de la flamme froide réside dans l'explosivité. En effet, une flamme froide présente de faibles variations de température (entre 200 et 500°C) ce qui constitue donc un faible danger comparé aux flammes chaudes. Mais ce n'est pas pour autant qu'on ne les voit pas dans les installations industrielles. Au contraire, les peroxydes peuvent se révéler plus explosifs (ce qui peut causer des problèmes dans le réacteur/moteur ou jouer un rôle inattendu dans la source d'allumage). Ainsi, notamment dans les procédés continus (mode de production industriel destiné à fabriquer, construire ou traiter des matériaux sans interruption) où la concentration en oxygène reste constante, la limite supérieure d'explosivité du mélange réactionnel augmente et la zone d'inflammabilité s'élargit, rendant le système plus dangereux. (*Chan-Jae Lee et al., 1998*) [14]

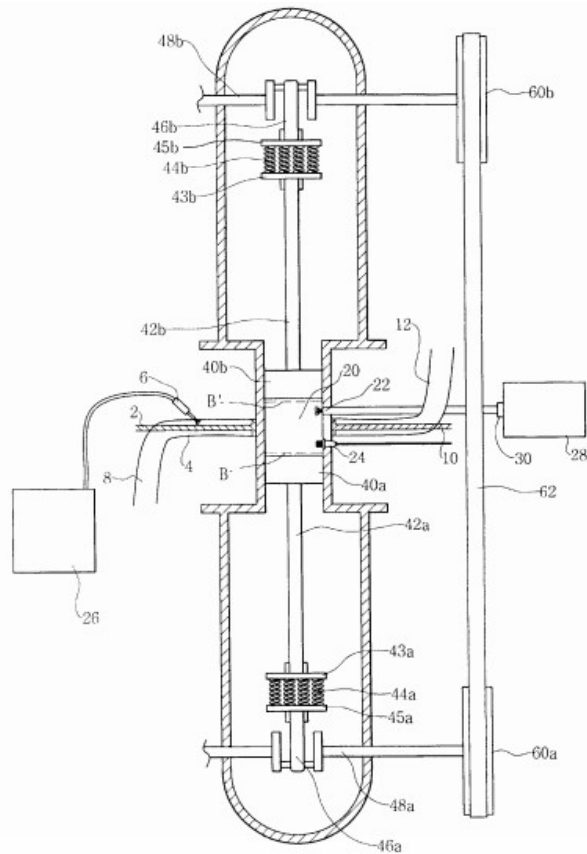


Figure 16 : Moteur PCCI multiple fabriqué par une combinaison de 2 moteurs PCCI

3.4.3. Expérimentation : conception d'un schlieren à miroir

Dans le cadre de projet, nous avons mis en application une de ces méthodes de diagnostic, à savoir le schlieren, en particulier le schlieren à miroir. Avec la grande aide de M. Mokrani, nous l'avons conçu de A à Z, et avons donc dû penser à des mécanismes pour qu'il fonctionne, ce qui était assez difficile pour nous au début. Ce schlieren à miroir est donc composé d'un miroir concave de 20 centimètres de diamètre avec une focale de 750 mm. La caméra est placée à 1m50 du miroir, pour garder les proportions de l'objet étudié. Voici le schéma du dispositif, ainsi qu'une photographie :

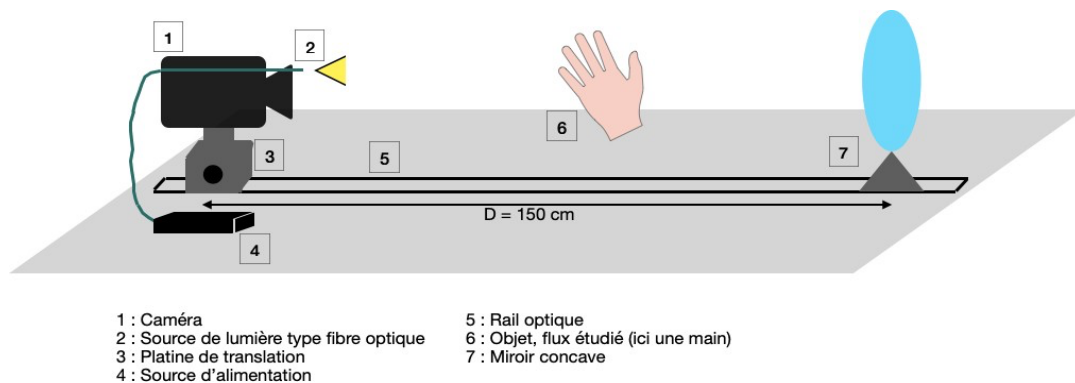


Figure 17 : Schéma du schlieren à miroir conçu



Figure 18 : Photographie du schlieren à miroir

Pour avoir un maximum de contraste, nous avons eu besoin d'une source de lumière unidirectionnelle, et avons donc utilisé une fibre optique, composée d'une LED et d'un petit tube. Pour que ce soit aligné, le tout est placé sur un rail optique. Il faut ensuite faire la bonne mise au point avec la caméra, en plaçant le spot de lumière au centre de l'image. En mettant un objet chaud ou à l'inverse froid devant le miroir, on peut observer à l'écran les gradients de température de l'objet. Avec un briquet ou simplement une main, on peut voir que les gradients de température sont orientés vers le haut et à l'inverse dans le cas d'un objet froid comme un bloc de glace, les gradients sont vers le bas, tout cela est visible sur les photographies que nous avons prises ci-dessous :



Figure 19 : Observation d'un briquet



Figure 20 : Observation d'une main

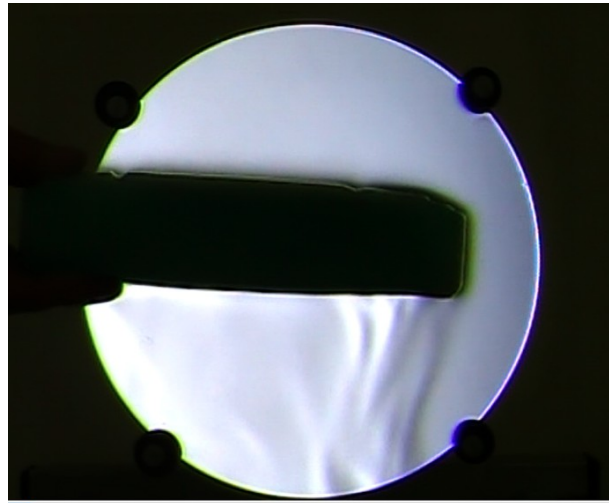


Figure 21 : Bloc de glace observé

La réalisation du dispositif aura coûté environ 300€, la plus grande dépense étant le miroir concave.

Caméra	Miroir concave	LED	Source d'alimentation	Platines de translation	Rail optique
Environ 100€	200 €	2€	Environ 10€	Prêtées par L'INSA (350€)	Prêté par l'INSA (20€)

Figure 22 : Prix des différents composants du schlieren

La mise en place de ce schlieren nous aura montré de manière concrète l'utilité des techniques de diagnostics. Elles permettent, entre autres, de mettre en évidence des phénomènes non-visibles à l'œil nu, et donc d'analyser différents types de flux, comme dans notre cas les flammes.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour conclure, durant ce projet, nous avons découvert les flammes froides et leurs caractéristiques. Elles ont des points communs avec les flammes chaudes : la réaction à leur origine est la combustion. On peut remarquer qu'elles respectent aussi le triangle du feu. Cependant, elles diffèrent sur de nombreux points : elles ont une température bien plus faible, elles sont beaucoup plus instables, elles consomment et produisent des espèces bien plus compliquées à manipuler, et sont souvent nocives. Du fait de leur instabilité, elles sont bien plus difficiles à caractériser, il a donc fallu développer des méthodes de diagnostics diverses pour les étudier. Il en existe donc deux grandes familles : les méthodes optiques et chimiques dont nous avons détaillé les fonctionnements dans la deuxième partie.

Ces flammes constituent un espoir pour la recherche automobile et pour la société moderne, car si leur activation est rigoureusement contrôlée, elles seraient un vrai bond en avant. En effet, les flammes froides réduiraient conséquemment la consommation de carburant et donc les émissions de dioxyde de carbone. Néanmoins, elles sont à l'heure actuelle encore difficiles à stabiliser, leurs produits sont très dangereux ; ces moteurs nouvelles générations ne sont donc pour l'instant qu'à l'état de prototype.

Ce projet, nous a permis d'étendre notre culture scientifique, car aucun de nous n'avait entendu parler des flammes froides avant le projet, de même pour la plupart des techniques de diagnostic : le BOS, les Schlieren étaient des mots inconnus pour nous il y a à peine 5 mois. Ce travail de groupe nous a également introduit au monde de la recherche. En effet, les flammes froides sont un sujet assez nouveau et difficile, ainsi, il n'était donc pas évident de, premièrement trouver des informations pertinentes, et deuxièmement, si par chance nous avions un site intéressant, fallait-il encore comprendre ce qui était écrit dans l'article. Ce n'était pas facile au début pour nous. En effet, nous n'avons pas tout de suite pensé à utiliser les sites de la bibliothèque de l'INSA, qui s'est révélée être par la suite une source précieuse d'informations. Par conséquent, nous ne trouvons que très peu d'informations, et devons donc faire appel à M. Mokrani, qui savait répondre à toutes les questions sur le sujet.

Ce projet nous a également permis de travailler notre esprit bricoleur, d'ingénieur. Effectivement, durant la conception du Schlieren à miroir, M. Mokrani nous demandait d'essayer de trouver un dispositif pour le faire fonctionner, en créant un mécanisme pour ajuster la position de la lame de rasoir, et même si nous n'avons pas trouvé et l'avons regardé le concevoir, nous avons pu voir ce qu'il aurait fallu faire et comprendre le fonctionnement de celui-ci en le manipulant et en traitant les résultats. Si un jour nous avons besoin de refaire un Schlieren à miroir, nous saurons comment faire !

Si nous avons eu plus de temps, ou si nous devons poursuivre ce projet, nous pourrions cette fois-ci nous lancer dans une expérimentation plus poussée, en concevant notamment un schlieren en Z, qui ferait office d'interféromètre, comme ceux étudiés en optique au semestre 3. Cet interféromètre serait plus précis que le dispositif que nous avons conçu, et les images des flux étudiés seraient de meilleure qualité, et donc les analyses plus pertinentes.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Yiguang Ju, Christopher B. Reuter, Omar R. Yehia, Tanvir I. Farouk, *Dynamics of cool flames*. Princeton University,
- [2] *Cool flame*, https://en.wikipedia.org/wiki/Cool_flame, (valide à la date du 04/06/2021).
- [3] Griffiths, J., *Des flammes froides qui chauffent mais ne brûlent pas*, Courrier International, <https://www.courrierinternational.com/article/2004/07/01/des-flammes-froides-qui-chauffent-mais-ne-brulent-pas>, (valide à la date du 04/06/2021).
- [4] Monsieur Nabil Mokrani, professeur encadrant du projet.
- [5] Parsinejad, F., Keck, J. C., & Metghalchi, On the location of flame edge in Shadowgraph pictures of spherical flames: A theoretical and experimental study, *Experiments in Fluids*, <https://doi.org/10.1007/s00348-007-0355-6>, (valide à la date du 04/06/2021). <https://collaborate.princeton.edu/en/publications/dynamics-of-cool-flames>, (valide à la date du 04/06/2021).
- [6] *Techniques de visualisation*, Laboratoire de Mécanique Des Fluides et d'Acoustique (LMFA), <http://lmfa.ec-lyon.fr/spip.php?article1315&lang=fr>, (valide à la date du 04/06/2021).
- [7] *Fluorescence Induite par Laser*, <https://www.smart-piv.com/fr/techniques/lif-plif/>, (valide à la date du 04/06/2021).
- [8] Kumar, P., & Krishnamurthy Muralidhar, *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer*, <http://www.springer.com/series/10305>, (valide à la date du 04/06/2021).
- [9] *Imagerie BOS*, <http://www.lavision.de/fr/techniques/schlieren-bos/index.php#:~:text=Background Oriented Schlieren%3A BOS%2C Schlieren&text=> (valide à la date du 04/06/2021).
- [10] Frédéric GRISCH, Pierre GICQUEL, *Mesures de températures dans les gaz et les flammes, mesures intrusives et mesures optiques intégrées*, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/thermometrie-par-contact-42651210/mesures-de-temperatures-dans-les-gaz-et-les-flammes-r2752/>, (valide à la date du 04/06/2021).
- [11] Mokrani, N., Batut, S., Pillier, L., Hecquet, C., & Vanhove, Experimental study of premixed ozone-seeded DME/O₂ cool flames on a stagnation plate burner, *9th European Combustion Meeting*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02380597>, (valide à la date du 04/06/2021).

- [12] Yvonnick Gazeau, *Mazda SPCCI, premier moteur essence à auto-allumage partiel dès 2019*,
<https://www.auto-innovations.com/site/dossier5/mazdaSkyactivX.html#:~:text=Auto%2Dinnovations%20%3A%20Mazda%20SPCCI%2C,auto%2Dallumage%20partiel%20d%C3%A8s%202019>, (valide à la date du 04/06/2021)
- [13] *La chimie au cœur de l'atmosphère et des moteurs à combustion*, Le Monde et Nous,
<https://lemondeetnous.cafe-sciences.org/2018/12/la-chimie-au-coeur-de-latmosphere-et-des-moteurs-a-combustion/>, (valide à la date du 04/06/2021).
- [14] Chan-Jae Lee, Jeong-Woo Lee, & Sang-Hyeon Lee. (1998). *moteur à allumage par compression de mélange prémélangé (PPCI)*,
<https://patents.google.com/patent/WO2004090302A1/fr> (valide à la date du 04/06/2021).