

Étude de la stabilisation des flammes de diffusion avec dilution des gaz chimiquement faibles



Etudiants :

DRU Valentin
BACHELOT Elen
MUSY Solène
YU Miao
DANICAN Amaury

Enseignant-responsable du projet :

MARIN Manuel

Date de remise du rapport : 20/06/2014

Référence du projet : STPI/P6/2014 – 54

Intitulé du projet : **Étude de la stabilisation des flammes de diffusion avec dilution des gaz chimiquement faibles (CO₂,N₂ et CO₂+N₂)**

Type de projet : **théorique et expérimental**

Objectifs du projet :

- **Une recherche bibliographique**
- **Réalisation des expériences de décrochage et d'extinction des flammes dans le cas d'une dilution dans l'écoulement du combustible**
- **La confrontation théorie/expériences sur la stabilisation des flammes**

Mots-clefs du projet :

Combustion gazeuse	Flammes de diffusion (non prémélangées)
Décrochage de flamme	Extinction de flamme
Dilution	Stabilisation de flamme

Table des matières

Notations - Acronymes	5
1. Introduction	6
2. Méthodologie	6
3. La théorie des flammes	8
3.1 La combustion gazeuse	8
3.2 Type de flammes	9
3.2.1 Applications des Flammes de prémélange	10
3.2.2 Applications Flammes de diffusion.....	10
3.3 Les formules importantes	11
3.4 Phénomènes de stabilisation des flammes	13
3.4.1 Décrochage	13
3.4.2 Extinction	13
3.4.3 Flamme suspendue	13
3.5 Les définitions importantes	14
3.5.1 Nombre de Reynolds : Re	14
3.5.2 Coefficient Joule - Thompson	15
3.5.3 Etat standard	15
4. De la théorie à la pratique	16
4.1 Expérience	16
4.1.1 Description du montage expérimentale.....	16
4.1.2 Description de la manipulation	18
4.1.3 Analyse visuelle de la flamme	18
4.2 Résultats et Analyse	19
5. Conclusion.....	25
6. Bibliographie	26
7. Annexe	27

NOTATIONS - ACRONYMES

U : vitesse (m.s^{-1})

M : masse molaire (g.mol^{-1})

X : fraction molaire

Y : fraction massique

v : rapport stœchiométrique

Q : débit (SLM)

Cp : capacité thermique / calorifique molaire ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

ρ : masse volumique (g.cm^{-3})

Z : fraction de mélange

μ : viscosité dynamique (Pa.s)

γ : viscosité cinématique ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

T : température (K)

Re : nombre de Reynolds

n : quantité de matière (mol)

1. INTRODUCTION

La combustion est aujourd'hui un des principaux moyens de conversion de l'énergie. On l'utilise dans toutes sortes de domaines pour obtenir de l'énergie thermique (ex : chaudière) ou électrique (ex : centrale thermique). On l'utilise également dans les transports (ex : moteurs) ou encore pour détruire des déchets (incinérateurs). La combustion est définie comme une réaction exothermique irréversible, dans laquelle intervient un combustible et un comburant.

Aujourd'hui l'étude de la dilution joue un rôle important dans l'étude des systèmes de combustion avec la recirculation des gaz. Cette dilution dans la flamme vise à diminuer les émissions de polluants (NOx, CO, ...) mais tout en gardant une bonne efficacité de la combustion et une flamme stable, d'où l'importance de notre projet.

Le but de ce projet est d'étudier l'influence de la dilution de gaz chimiquement faibles issus de la combustion (CO₂, N₂) dans la stabilisation des flammes de diffusion, c'est-à-dire des flammes issues de la combustion de gaz non prémélangés. On étudie la stabilité de ces flammes, à partir des conditions de décrochage et extinction de flammes. Par la suite on poursuivra l'étude lorsque les gaz servant à la combustion seront dilués.

Si les flammes de diffusion sont moins performantes, elles sont par contre plus sûres, car la zone de réaction ne peut pas remonter l'écoulement, contrairement aux flammes prémélangées (phénomène de flash-back), et donc la flamme ne peut pas remonter vers l'intérieur des installations. De plus la réalisation pratique est plus simple (ex : briquet) car il n'y a pas besoin d'étudier les conditions de mélange des gaz.

2. METHODOLOGIE

Le travail sur notre projet a débuté en deux phases.

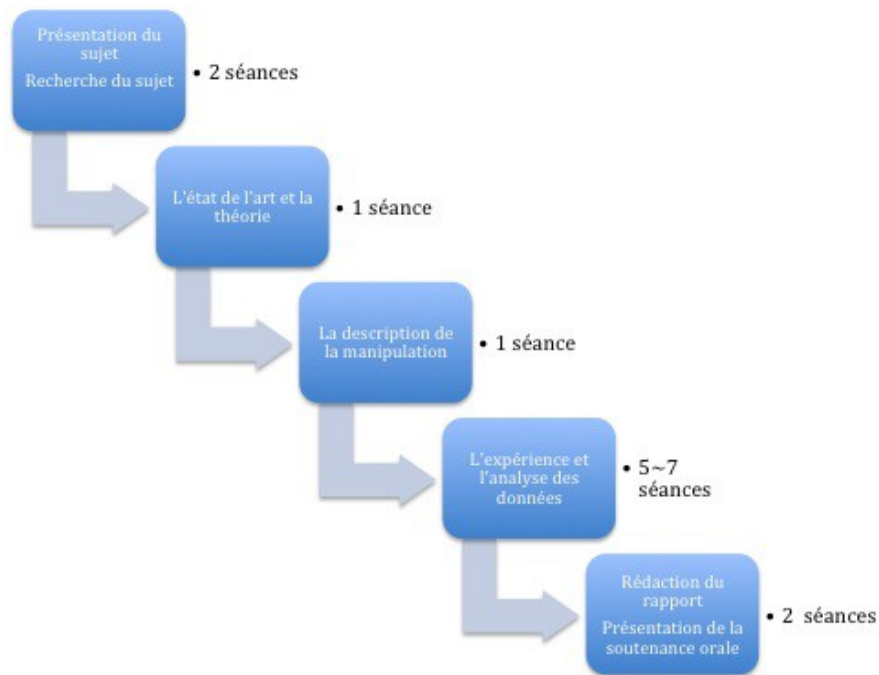
Au tout début du projet, nous travaillions tous ensemble sur une même tâche, à savoir la recherche bibliographique. Chaque membre du groupe faisait ses recherches sur ce sujet, puis lors des séances, une mise en commun des résultats des recherches était effectuée, puis nous discutions tous du projet qui faisait appel à des notions nouvelles pour nous et que nous nous devions de connaître pour avancer. Il nous apparaissait évident que tout le monde fasse ses propres recherches afin d'avoir les mêmes bases. Ces séances étaient complétées par les explications de notre responsable de projet afin d'avoir une vision complète du projet.

Par la suite, lors ce que nous avons commencé à travailler en laboratoire, nous nous sommes séparés en deux équipes. Une équipe de trois personnes qui avait pour but d'effectuer les manipulations, et une équipe de deux personnes sur ordinateur, qui s'occupait de l'exploitation des résultats des manipulations, en créant les tableaux et les graphiques à partir des formules vues lors de l'étude de la partie théorique.

Pour nous tenir au courant durant la semaine, ou en cas de questions, nous avons utilisé un groupe Facebook. Ce groupe nous permettait de poster des messages visibles par tous les membres du groupe. Ces messages pouvaient servir à poser des questions, à communiquer le travail à effectuer et les difficultés rencontrées. De plus, dans le but de partager tout les éléments du projet, nous avons créé un "gdoc". Ce site de partage nous a permis de mettre en commun tout les documents récupérés pendant les séances ou les recherches. Un compte-rendu de chaque séance y était également disponible. De ce fait chaque personne pouvait avoir une vue sur l'ensemble du projet et utiliser toutes les données disponibles pour travailler chez elle.

Lorsque cela était nécessaire, le groupe se rassemblait à la Bibliothèque Universitaire comme par exemple, lors de la préparation de la première manipulation. Ces réunions permettaient de faire un point sur le projet, entre le travail fait et le travail à faire. Elles permettaient également d'expliquer certains points obscurs du projet de manière plus claire que par le biais s'internet.

Ce projet s'est déroulé dans une bonne ambiance, malgré la difficulté à communiquer au départ car nous ne nous connaissions pas avant le début du projet. Une fois l'organisation mise en place et la communication bien établie, le travail effectué ne fut que plus efficace.



3. LA THÉORIE DES FLAMMES

3.1 La combustion gazeuse

La combustion est une réaction exothermique d'oxydo-reduction. Une combustion vive se traduit par une flamme. Cette réaction nécessite un combustible (qui joue le rôle de réducteur), un comburant (qui joue le rôle d'oxydant) et d'une énergie d'activation => triangle du feu.



Le combustible peut être sous plusieurs formes, et chaque forme correspond à une classe de feu :

Classe de feu (européen)	Combustible
A	- solide (charbon, bois, ...)
B	- liquide (essence, kérosène, ...)
C	- gazeux (méthane, propane, ...).
D	- métallique (fer, aluminium, ...)
F	- huile et graisse

Notre projet se limitera à l'étude de la combustion des gaz.

Le comburant, l'autre réactif, est la plupart du temps, l'air ambiant (surtout le dioxygène). On remarque que privé le feu d'air revient à l'éteindre.

Enfin l'énergie d'activation est généralement de la chaleur, par exemple, le frottement pour une allumette, un câble électrique suralimenté qui chauffe un isolant. Il y a également, les arcs électriques, les radiations, l'élévation de la température par compression de l'air (ex : moteur Diesel).

Une flamme est une manifestation visible de la combustion vive, qui dégage suffisamment d'énergie thermique pour brûler les produits de combustion gazeux émis au-dessus de la zone de réaction. La combustion vive s'oppose à la combustion lente qui elle se fait sans flamme. Les produits d'une combustion vive sont portés à une température suffisamment haute pour émettre incandescence et émission spectrale. Cette zone lumineuse c'est la flamme. Une flamme peut avoir plusieurs apparences, un cône régulier lorsque l'écoulement des produits gazeux est ordonné : on appelle cela un écoulement laminaire.

Si l'écoulement est désordonné : on appelle cela un écoulement turbulent. L'apparence d'une flamme dépend de la nature du combustible et de la vitesse de combustion. D'une manière générale, plus la combustion est rapide et plus le combustible est inflammable, plus la flamme est chaude.

3.2 Type de flammes

Il existe 2 types de flammes. Les flammes de diffusion (figure 1) dont le mélange comburant-combustible se fait pendant la réaction de combustion et les flammes de prémélange (ou prémixées) (figure 2) pour lesquelles le mélange comburant – combustible se fait avant la combustion.



Figure 1



Figure 2

Le prototype de ces flammes est obtenu par injection d'un combustible gazeux dans une atmosphère oxydante (le plus souvent l'air) au repos. C'est, par exemple, la géométrie d'une flamme de bec Bunsen quand la virole est fermée (pas de prémélange d'air à la base du brûleur), d'une flamme de briquet ou encore d'une veilleuse de chauffe-eau. Si cette configuration est moins performante, en terme de dégagement d'énergie, puisque la réaction est principalement limitée, pour les combustibles les plus courants, par le transport des réactifs l'un vers l'autre, la flamme de diffusion offre, comme nous l'avons déjà vu, deux avantages indéniables : la simplicité et la sécurité.

La combustion prémélangée est, a priori, la situation la plus efficace en terme de dégagement d'énergie puisque les réactifs sont déjà en contact avant la zone de flamme. En revanche, une telle flamme est susceptible de se propager dans le mélange combustible/oxydant donc de remonter l'écoulement en amont de la chambre de combustion, jusqu'à l'endroit où s'effectue le mélange, ce qui pose des problèmes de sécurité (phénomène de flashback).

En revanche, si la flamme de diffusion est, a priori, moins performante qu'une flamme prémélangée puisqu'il faut, en plus, apporter, par diffusion moléculaire, les réactifs à la zone de réaction, celle-ci ne peut en aucun cas remonter l'écoulement et est donc plus sûre. En outre, la réalisation pratique d'une flamme de diffusion est sensiblement plus simple puisqu'elle ne nécessite pas un mélange des réactifs aussi parfait que possible dans des proportions bien définies (c'est-à-dire dans les limites d'inflammabilité). Un brûleur non prémélangé peut être simplement constitué, par exemple, d'un injecteur de combustible dans de l'air ambiant (bec Bunsen dont la virole est fermée, veilleuse de chauffe-eau, fours industriels,...) ou d'un ou plusieurs groupes d'injecteurs de combustible et de comburant (moteurs-fusée, fours à oxygène,...).

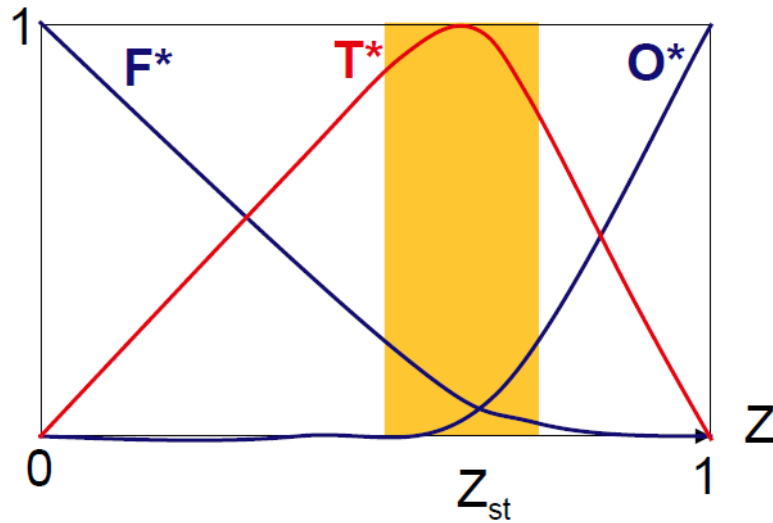


Schéma descriptif de la température de la fraction de mélange dans les flammes de diffusion

3.2.1 Applications des Flammes de prémélange

Dans le cas de la flamme de prémélange, le combustible est toujours un gaz, mélangé au comburant. On parle aussi de flamme aérée.

Voici quelques façons d'utiliser ce type de flammes :

- Le bec Bunsen et le brûleur de la cuisinière : ces dispositifs présentent une entrée d'air permettant aux gaz de se mélanger avant de sortir ;
- Le chalumeau : il est alimenté en gaz combustible et en dioxygène pur, le mélange se faisant avant la buse ;
- Le moteur à allumage commandé (moteur essence), l'allumage des gaz prémélangés est réalisé par une bougie. L'essence et l'air sont mélangés, au passage de l'air dans le carburateur
- Les explosions de gaz, et dans les incendies, les phénomènes de propagation rapide du feu (explosion de fumées, embrasement généralisé éclair, coup de grisou).

Même si le mélange n'est pas parfait, le mélange intime des réactants fait que la combustion est plus efficace, la flamme est donc plus chaude et produit peu de particules imbrûlées, elle est donc bleue.

3.2.2 Applications des flammes de diffusion

La flamme de diffusion est appelée ainsi car, les réactants étant séparés, ils doivent venir au contact l'un de l'autre, par le phénomène de diffusion.

Voici quelques applications de ce type de flammes :

- La combustion des solides (bois, bougie, papier, ...)
- La combustion des liquides (essence, gazole, pétrole, ...), sous forme « massive » (flaque, réservoir) ou de brouillard (moteur Diesel).
- Le moteur-fusée utilise des flammes de diffusion, typiquement hydrogène/oxygène ou kérosène/oxygène.

- La combustion des gaz non mélangés à l'air, par exemple un gaz sortant directement d'une bouteille ne contenant pas d'air, une fuite sur une canalisation qui s'enflamme tout de suite.

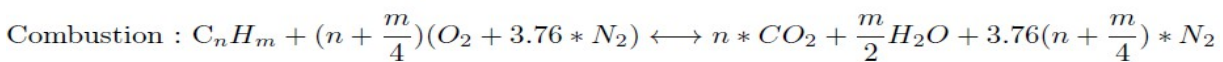
Dans le cas d'un feu de solides ou de liquides, la combustion produit de la chaleur ; cette chaleur provoque un phénomène de distillation, de pyrolyse ou simplement de fusion puis de vaporisation qui produit un gaz inflammable, qui vient alimenter la flamme. Que ce soit donc un feu de solide, de liquide ou de gaz, on a :

- Au centre de la flamme : un gaz combustible ;
- La flamme elle-même est une mince couche de gaz au sein de laquelle se déroule la réaction de combustion ;
- A l'extérieur de la flamme : le gaz comburant, en général le dioxygène de l'air, et les produits de réaction (gaz et particules).

Cette réaction est souvent incomplète, puisque sur le lieu de la réaction, la mince couche de la flamme, le rapport entre combustible et comburant n'est pas idéal (non-stœchiométrique). On a donc des gaz très divers — dioxyde de carbone (CO₂) et vapeur d'eau (H₂O), souvent monoxyde de carbone (CO), autres gaz de réaction et gaz imbrûlés — ainsi que des particules de suie qui brûlent à leur tour.

3.3 Les formules importantes

Hydrocarbure : C_nH_m



Avec le CH_4 on obtient : $CH_4 + 2(O_2 + 3.76 * N_2) \longleftrightarrow CO_2 + 2 * H_2O + 7.52 * N_2$

$$z_{st,derochage} = \frac{1}{\frac{vY_F^0}{Y_o^0} + 1}$$

$$\text{or } v = \frac{n_{O_2} * M_{O_2}}{n_{CH_4} * M_{CH_4}} = \frac{2 * 32}{1 * 16} = 4$$

$$Y_F^0 = \frac{n_{CH_4} * M_{CH_4}}{n_{CO_2} * M_{CO_2} + n_{CH_4} * M_{CH_4}}$$

$$Y_o^0 = \frac{n_{O_2} * M_{O_2}}{n_{air} * M_{air}} = \frac{1 * M_{O_2}}{1 * M_{O_2} + 3.76 * M_{N_2}}$$

Remarque : cette formule de la fraction molaire est applicable dans le cas général d'un diluent peu importe lequel.

$$\text{De plus, } \frac{n_{CO_2}}{n_{CH_4}} = \frac{V_{CO_2}}{V_{CH_4}} = \frac{Q_{CO_2}}{Q_{CH_4}}$$

On sait que : $Q_m = Q_{CO_2} + Q_{CH_4} \Rightarrow U_m = U_{CO_2} + U_{CH_4}$

Et $m_m = m_{CO_2} + m_{CH_4}$

L'indice m représente le mélange.

$$\text{Or } \rho = \frac{m}{V}$$

$$\text{On obtient donc : } \rho_m * V_m = \rho_{CO_2} * V_{CO_2} + \rho_{CH_4} * V_{CH_4}$$

$$\rho_m = \rho_{CO_2} * \frac{V_{CO_2}}{V_m} + \rho_{CH_4} * \frac{V_{CH_4}}{V_m}$$

$$\text{Donc } \rho_m = \sum X_i * \rho_i$$

Calcul des températures :

On obtient les formules suivantes :

$$T_{st} = z_{st} * T_F^0 + (1 - z)T_o^0 + \frac{y_F^0 * Q * z_{st}}{C_{p,produit}}$$

$$\text{Ansi si } T_F^0 = T_o^0 \text{ alors } T_{st} = \frac{y_F^0 * Q * z_{st}}{C_{p,produit}} + T_{ambiante}$$

Expérience de dilution avec le CO_2 et le N_2 :

L'objectif de cette expérience est de s'affranchir de l'effet thermique de la dilution du à la différence de capacité thermique d'un diluant et le fuel dans ce cas le méthane.

On cherche ainsi les proportions de N_2 et de CO_2 a mettre en présence de CH_4 pour optimiser la dilution :

$$\text{On sait que : } C_{p,CH_4} = C_{p,N_2+CO_2}$$

$$\text{Or } C_{p,m} = \sum_{i=1}^n X_i * C_{p,i}$$

$$C_{p,CH_4} = X_{N_2} * C_{p,N_2} + X_{CO_2} * C_{p,CO_2}$$

$$X_{N_2} = \frac{Q_{N_2}}{(Q_{N_2} + Q_{CO_2})}$$

$$X_{CO_2} = \frac{C_{p,CH_4} - X_{N_2} * C_{p,N_2}}{C_{p,CO_2}}$$

$$\text{Ainsi : } Q_{CO_2} = \frac{C_{p,CH_4}}{C_{p,CO_2}} * (Q_{N_2} + Q_{CO_2}) - Q_{N_2} * \frac{C_{p,N_2}}{C_{p,CO_2}}$$

$$\text{Donc } Q_{CO_2} = \frac{C_{p,CH_4} - C_{p,N_2}}{C_{p,CO_2} - C_{p,CH_4}} * Q_{N_2}$$

Pour une valeur de débit de CH_4 , on fixe une valeur de débit de N_2 qui doit être inférieure à celle de décrochage, pour ce débit de méthane, lorsque l'azote est le seul diluant et on trouve ainsi, grâce à cette formule, la valeur du débit qu'il faut imposer au CO_2 , cette valeur imposée est valable si elle est inférieure à celle de décrochage, pour ce débit de méthane, lorsque le dioxyde de carbone est le seul diluant. De plus il faut que la somme des valeurs imposées de N_2 et de CO_2 soit inférieure à la somme des valeurs de décrochage, pour ce débit de méthane, lorsque le dioxyde de carbone et l'azote sont les seuls diluants. On obtient donc plusieurs couples valables que l'on teste durant l'expérience, le couple de plus petites valeurs, où le décrochage se produit, est le couple recherché.

3.4 Phénomènes de stabilisation des flammes

Dans cette partie nous allons vous exposer les différents phénomènes de la stabilisation des flammes.

3.4.1 Décrochage

Phénomène de déstabilisation d'une flamme (prémélangée ou non) qui quitte vers l'aval sa position d'équilibre statique apparent au nez du brûleur lorsque sa vitesse de propagation devient trop faible devant la vitesse de l'écoulement. Le décrochage de flamme peut être obtenu soit par une augmentation de l'aérodynamique (augmentation du débit du méthane ou de l'air) soit pour la dilution d'un gaz inerte (CO_2 , N_2). Lors de ce mouvement certaines flammes peuvent trouver en aval une position d'équilibre turbulent.

Inversement de telles flammes suspendues en aval peuvent se raccrocher au brûleur si on réduit la vitesse de l'écoulement, mais la vitesse pour laquelle ces flammes se raccrochent est inférieure à la vitesse pour laquelle elles avaient décroché.

3.4.2 Extinction

Arrêt naturel ou provoqué de la combustion vive. L'approche pratique de l'extinction d'une flamme conduit à distinguer sept stratégies d'extinction : isoler le combustible, isoler l'oxydant, refroidir le combustible condensé, refroidir ou diluer la phase gazeuse, inhiber la réaction chimique de façon homogène, inhiber la réaction chimique de façon hétérogène, souffler la flamme. L'utilisation des moyens classiques d'extinction d'un feu revient à suivre une ou plusieurs des stratégies précédentes. Par exemple l'utilisation de l'eau peut isoler le combustible, si celui-ci est recouvert d'une couche d'eau, refroidir le combustible, inhiber la réaction en phase homogène. Dans notre cas, l'extinction est provoquée par l'ajout d'un gaz diluant et elle dépend de la quantité de diluant ajoutée, la vitesse du méthane et la vitesse de l'air.

3.4.3 Flamme suspendue

Flamme notablement décrochée en aval du brûleur, ayant trouvé des conditions locales d'écoulement (et de richesse dans le cas des combustions non prémélangées) qui permettent sa stabilisation. Dans un écoulement libre ces conditions peuvent être réalisées par le couplage entre la turbulence et la vitesse de flamme ou de réaction. La stabilisation suspendue se produit alors, là où la vitesse moyenne de l'écoulement est égale à la vitesse de flamme turbulente, dans la mesure où le temps de séjour (ou de mélange) des réactifs est compatible avec le temps de réaction.

3.5 Les définitions importantes

3.5.1 Nombre de Reynolds : Re

La force de la turbulence d'une flamme est généralement caractérisée par son intensité mais ce n'est cependant pas un paramètre suffisant pour décrire la turbulence d'une combustion. Un problème important est : comment l'énergie de la turbulence est distribuée dans la flamme et quelles parties portent assez d'énergie pour interagir avec le front de la flamme. Ainsi l'agitation peut être caractérisée par un nombre de Reynolds qui dépend de la géométrie du système. Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre est sans dimension.

Calcul du nombre de Reynolds :

$Re = \frac{V * L}{\nu}$ avec V : vitesse, L : dimension ici $L=2R$ et ν : viscosité cinématique $\nu = \frac{\rho}{\mu}$ avec ρ : masse volumique et μ : viscosité dynamique

D'où $Re = \frac{\rho * V * L}{\mu}$

De plus on peut calculer la viscosité dynamique du mélange (μ) grâce à l'équation de Herning et Zipper suivante :

$$\mu = \frac{\sum \mu_j * X_j * M_j^{0,6}}{\sum X_j * M_j^{0,6}} = \frac{\mu_{CH_4} * X_{CH_4} * M_{CH_4}^{0,5} + \mu_{diluant} * X_{diluant} * M_{diluant}^{0,5}}{X_{CH_4} * M_{CH_4}^{0,5} + X_{diluant} * M_{diluant}^{0,5}}$$

avec X_j : fraction molaire du composant j du mélange

μ_j : viscosité dynamique de chaque composant j

M_j : masse molaire de chaque composant j

En fonction des nombres de Reynolds croissants on distingue quatre régimes principaux, régime de Stokes, régime laminaire, régime transitoire, régime turbulent. L'écoulement de Stokes correspond aux très faibles valeurs du Reynolds (inférieures à 1). Or dans la plupart des dispositifs de combustions le nombre de Reynolds est compris entre 100 et 20000 (ou bien $Re < 20000$ régime laminaire, $20000 < Re < 30000$ régime transitoire et $Re > 30000$ régime turbulent) donc on ne s'intéressera pas à ce phénomène.

On observe d'abord un écoulement laminaire. À partir d'un certain Reynolds se produit une transition qui fait apparaître des instabilités dues à l'amplification des perturbations. La valeur du Reynolds de transition et la nature des instabilités dépendent essentiellement du type d'écoulement considéré. Ensuite, les instabilités augmentent au point de donner naissance à un phénomène chaotique dans lequel il est difficile de voir une organisation : c'est la turbulence.

3.5.2 Coefficient joule - Thompson

La détente isenthalpique : souvent appelée « détente JOULE-THOMPSON » d'un gaz sous pression au travers d'un orifice ou d'une vanne, sans échange de travail ni de chaleur avec le milieu extérieur est un processus à enthalpie constante. Cette détente, si elle s'effectue au dessous de la température d'inversion, s'accompagne d'un refroidissement du gaz . Elle ne produit du froid qu'au dessous de la température d'inversion (T_i) or l'hélium, l'hydrogène et le néon ont une température d'inversion inférieure à la température ambiante ce qui explique que le détendeur de la bombonne de gaz contenant l'hydrogène gèle.

L'abaissement de température en fonction de la pression peut être caractérisé par le coefficient JOULE -THOMSON.

3.5.3 État standard

L'état standard d'un composé physico-chimique est défini par son état physique stable à la température T , sous la pression standard : $P = 1$ bar. Il n'y a donc pas un état standard mais des états standards à chaque température T , pour laquelle le composé est stable. Le plus souvent la température de référence de 298 K (25 °C) est choisie pour constituer des tables de grandeurs thermodynamiques standard. Litres standards par minute (SLM ou SLPM) est le débit volumétrique d'un gaz ramené aux conditions «normalisées» de température et de pression .

En chimie, l'UICPA établi température et pression standard (officieusement abrégé STP) comme une température de 273,15 K (0 ° C, 32 ° F) et une pression absolue de 100 kPa (14,504 psi, 0,987atm, 1 bar).

4. De la théorie à la pratique

4.1 Expérience

4.1.1 Description du montage (cf. annexe)

Avant toute manipulation, il faut allumer le circuit d'eau qui permet le refroidissement de la vapeur produite par la flamme. Ainsi l'eau ne se condense pas dans les tuyaux d'évacuation, et la partie haute du montage ne chauffe pas trop. De plus on souhaite éviter que l'eau produite par la combustion reste dans le foyer car cela diluerait la réaction et gênerait l'expérience.

Les gaz utilisés sont stockés dans des bouteilles à haute pression, c'est pourquoi il y a des détendeurs qui réduisent la pression des gaz avant qu'ils ne soient transportés par des tuyaux vers les débitmètres. Ces débitmètres permettent de mesurer précisément le débit de chaque gaz qui va être utilisé.

Le montage est constitué de deux tableaux de débitmètres, l'un pour les comburants et l'autre pour les combustibles. Ainsi, chaque gaz est relié à un débitmètre différent, et l'on peut faire varier leurs débits pour étudier la dilution.

Chaque débitmètre possède un débit maximal, une pression maximale et un gaz de référence. Selon le gaz utilisé, il faudra multiplier le résultat mesuré par un facteur qui dépend de la nature du gaz.

Ensuite, dans le cas de la dilution, les combustibles sont mélangés entre eux avant d'être transportés jusqu'à la cheminée, de même que les différents comburants, ceci garantit un mélange homogène et de concentration constante.

En bas de la cheminée se trouvent des billes de verre, qui ont pour but de laminer et d'homogénéiser les gaz avant qu'ils ne soient envoyés dans le foyer pour réagir.

Le four utilisé pour les expériences a été conçu pour étudier la réponse des flammes à des diluants choisis parmi les produits issus de la combustion. Dans ce but, le foyer ne présente pas de zone de recirculation et l'injection directe des diluants est contrôlée. Ainsi il est constitué d'une veine axisymétrique comprenant un coflow d'air au centre duquel est positionné un tube cylindrique servant à injecter le méthane. Plusieurs hublots ont été implantés sur deux faces opposées du foyer pour observer l'évolution de la flamme. La veine qui permet l'injection d'air est placée au-dessus d'une chambre de tranquillisation qui homogénéise les gaz avant de les injecter dans le foyer.

La réaction de combustion a donc lieu dans le foyer où l'on peut observer la flamme grâce aux hublots. Enfin, au-dessus de la cheminée se trouve un tuyau d'évacuation pour les gaz produit, et ce dernier est muni d'un circuit de refroidissement. Il y a également un tuyau qui recueille l'eau produite par la combustion puis condensée par ce circuit.

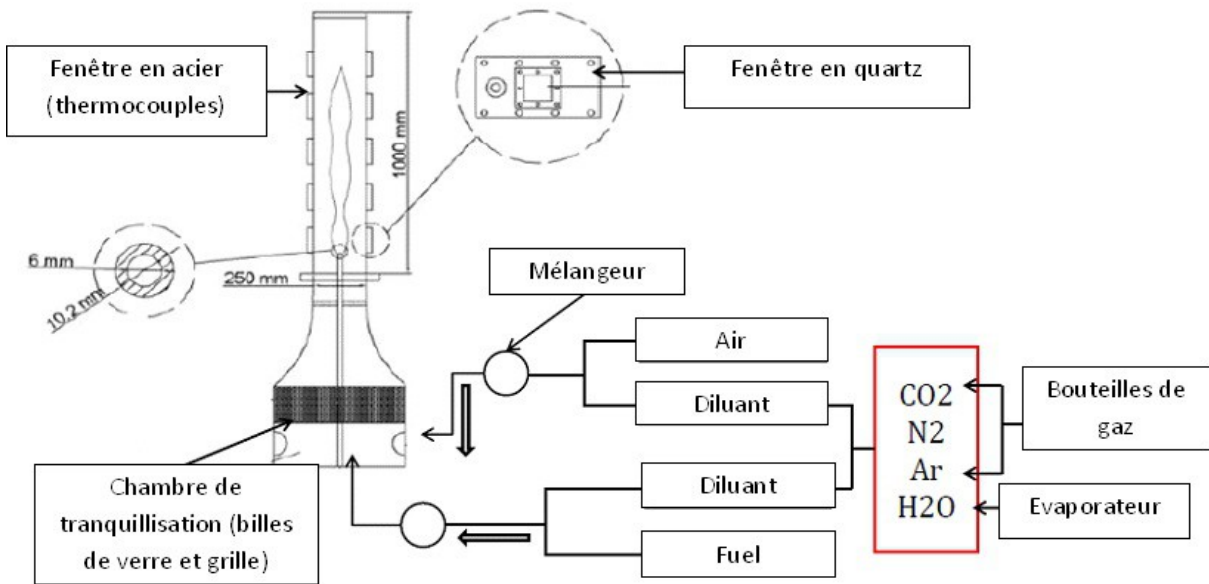
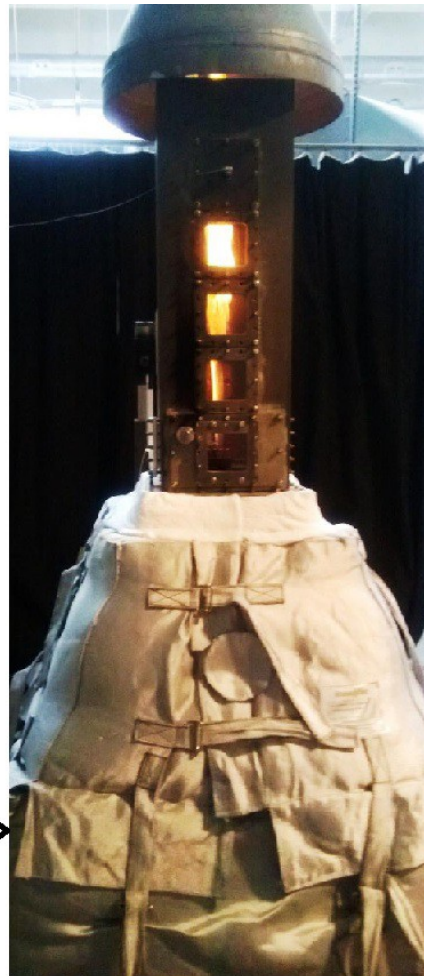
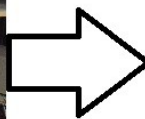
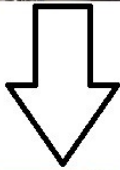


Schéma du montage – Marin Manuel, Coria



Photos du montage

4.1.2 Description de la manipulation

La manipulation est la même pour les différentes dilutions étudiées, voici donc une description générale de la manipulation à faire pour observer le phénomène de décrochage des flammes de diffusion avec une dilution au CO₂ ou/et au N₂.

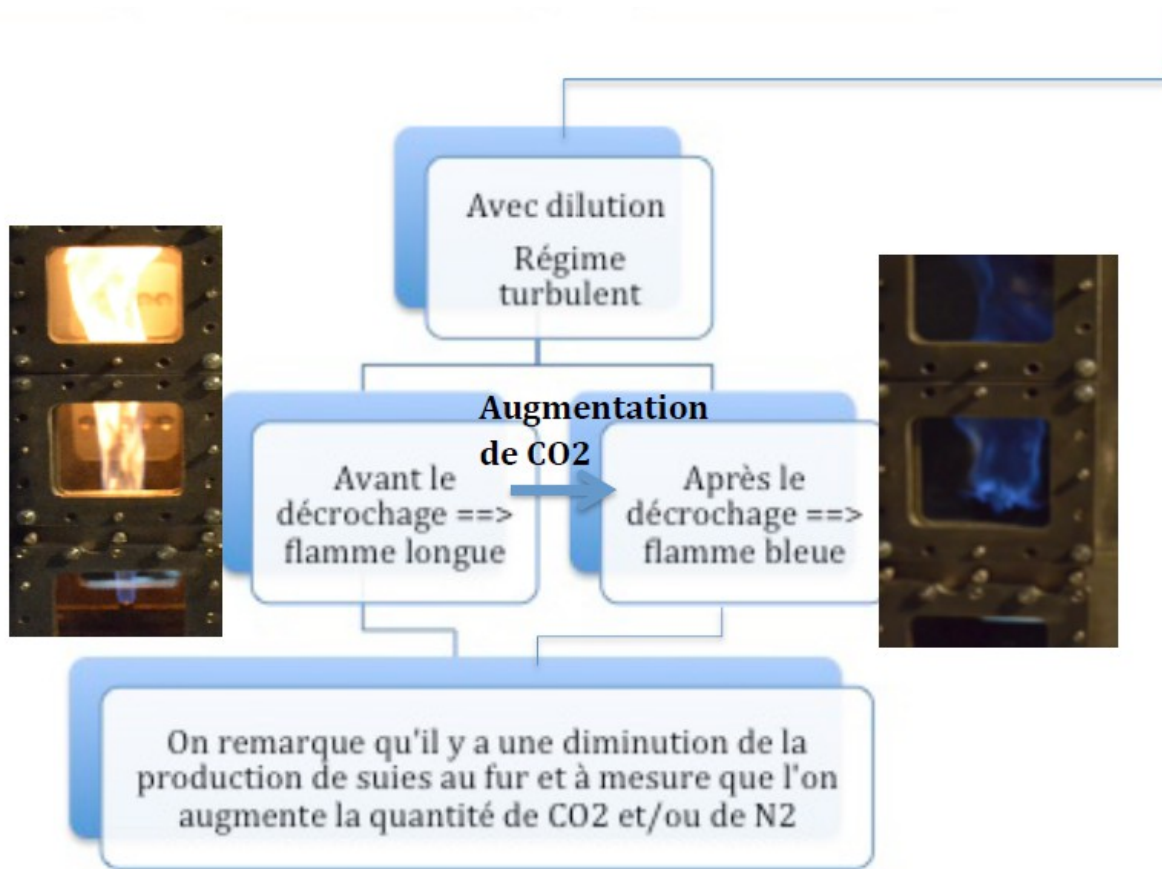
On commence par ouvrir le robinet de l'eau pour le circuit de refroidissement. On ouvre ensuite les vannes au niveau des bouteilles de gaz, selon les gaz utilisés. Puis on ouvre les robinets à côté des débitmètres, en réglant dans un premier temps un faible débit pour le mélange de méthane et de diluant, et un débit de 375 SLM pour l'air ($U_{air} = 0,1 \text{ m/s}$)

On allume la flamme en plaçant une petite flamme au-dessus du brûleur dans le foyer, grâce à un chalumeau, ensuite, on règle le débit du combustible (méthane) à la valeur d'étude souhaitée. On peut alors commencer à observer les phénomènes de décrochage et accrochage de la flamme en faisant varier les débits. On répète 2 fois l'expérience pour chaque valeur de débit de méthane, et en relevant la valeur du débit du diluant au moment du décrochage et de l'extinction de la flamme.

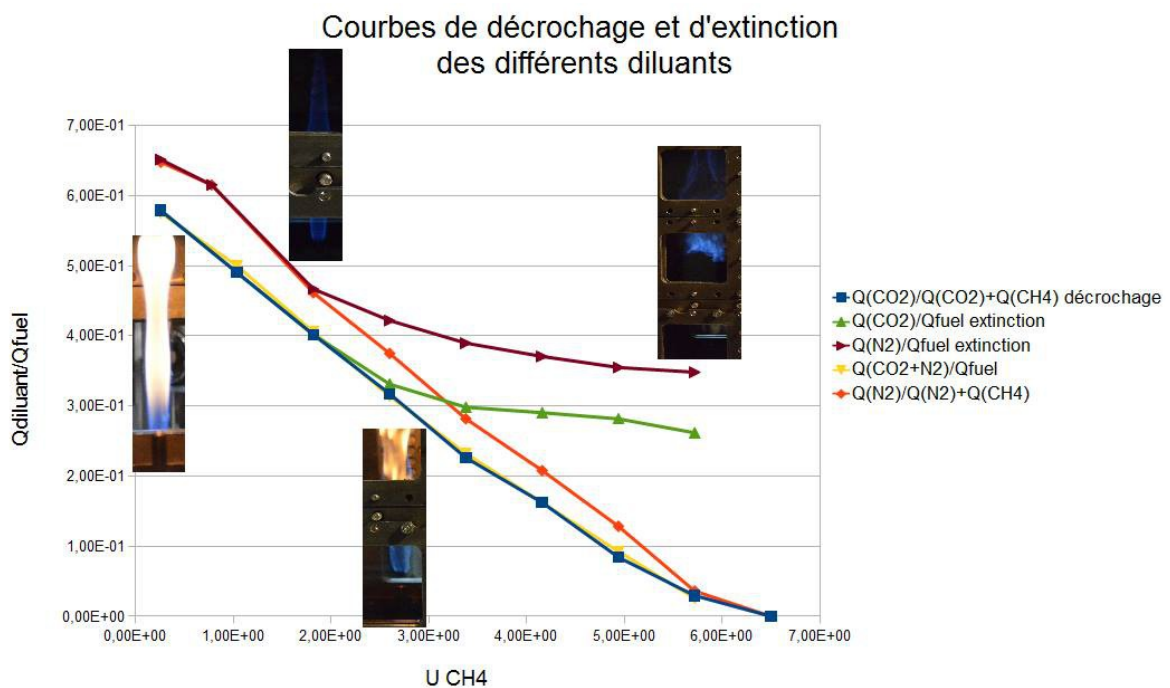
Nous avons choisi d'étudier le décrochage pour une dizaine de valeurs de CH₄ avec $0,26 \text{ m/s} < U_{méthane} < 6,5 \text{ m/s}$, avec 6,5m/s la vitesse correspondant au décrochage naturel de la flamme. Nous avons réalisé ces expériences de dilution avec tout d'abord le dioxyde de carbone (CO₂) comme diluant, puis avec l'azote (N₂) et finalement avec un mélange CO₂ + N₂ en gardant la même capacité thermique ($C_{p_{CH_4}}$).

4.1.3 Analyse visuelle de la flamme





4.2 Résultats et Analyse



Les courbes représentent la quantité de diluant nécessaire au décrochage puis à l'extinction de la flamme, en fonction de la vitesse du CH₄ arrivant dans le foyer. La quantité de diluant est mise sous forme d'un rapport entre la quantité de diluant injecté et la quantité totale de combustible.

On observe des résultats similaires pour les 3 expériences, c'est-à-dire lors des dilutions au CO₂, au N₂ ou au CO₂+N₂. Pour le phénomène de décrochage, la quantité de diluant nécessaire au décrochage diminue lorsqu'on augmente la vitesse du méthane. Cependant pour l'extinction de la flamme, nous pouvons voir que la quantité de diluant nécessaire diminue moins rapidement.

Pour le décrochage et l'extinction, la courbe de N₂ est supérieure à celle de CO₂, c'est-à-dire que pour une même vitesse de méthane, la quantité de diazote nécessaire est plus grande.

Pour l'expérience réalisée avec le mélange de CO₂+N₂, nous pouvons voir que les résultats sont très proches de ceux pour une dilution seulement au CO₂.

Nous pouvons donc dire que le décrochage de la flamme est contrôlé par l'effet combiné de l'aérodynamique et de la dilution.

L'effet aérodynamique, c'est le décrochage naturel du CH₄, qui consiste au fait que même sans dilution, un fort débit de CH₄ provoque le décrochage puis l'extinction de la flamme. Pour atteindre le point de décrochage dans un cas où l'aérodynamique est faible, cela nécessite une quantité critique de diluant : cette quantité critique diminue au fur et à mesure que la vitesse du jet augmente jusqu'à la valeur nulle, correspondant à la condition de décrochage naturelle de la flamme par le seul effet aérodynamique.

En ce qui concerne l'effet de la dilution, on observe que le dioxyde de carbone possède la plus grande capacité de déstabilisation de la flamme accrochée. La quantité de N₂ à injecter est deux fois plus grande que celle du CO₂ pour atteindre le point de décrochage. Cet ordre relatif CO₂ > N₂, récapitulant la facilité à décrocher la flamme par l'ajout du diluant, a été vérifié sur toute la gamme de vitesses étudiées dans ce travail. L'ajout de N₂ réduit la stabilité de flamme essentiellement via la voie de dilution pure, car ses propriétés physiques sont quasi-identiques à celles de l'air.

En revanche, ce raisonnement en thermique proposé n'est pas suffisant pour le CO₂ qui, d'après les travaux de Guo and Smallwood [*A numerical study on the influence of CO₂ addition on soot formation in an ethylene/air diffusion flame. Combustion Science and Technology, 180 : 1695–1708, 2008*], possède un effet chimique faible mais certain.

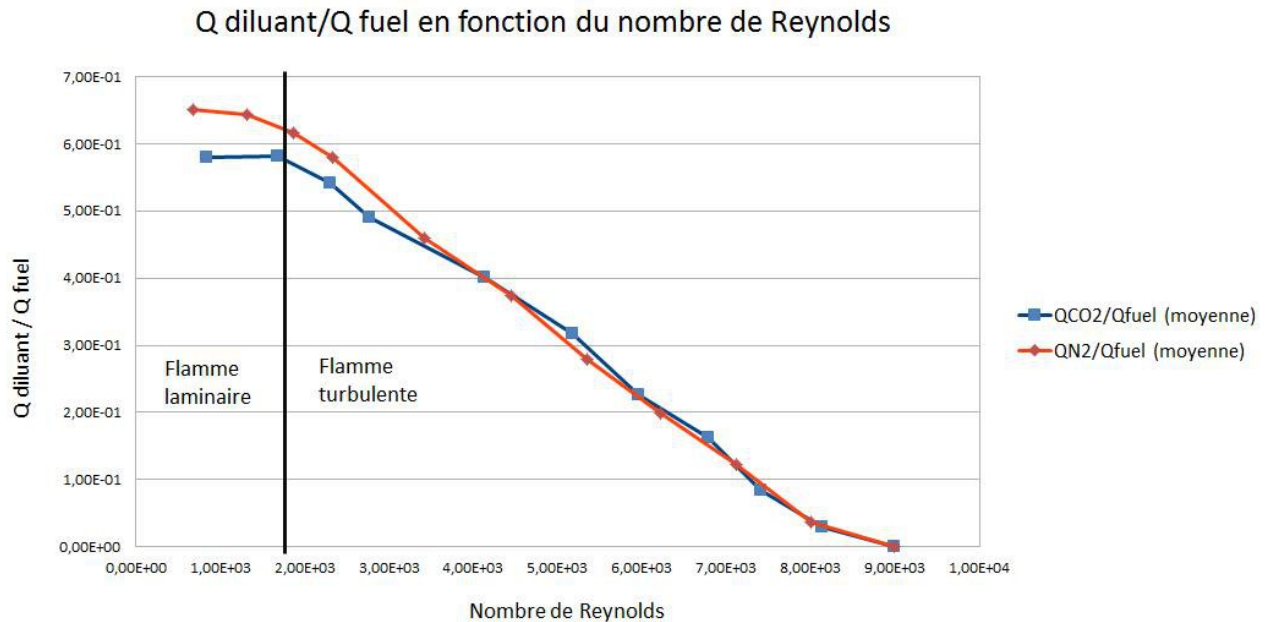
Ainsi la légère différence entre la courbe de CO₂ et celle du mélange CO₂ + N₂ peut être attribuée à l'effet chimique. La présence de N₂ déstabilise peu la flamme ici car la quantité ajoutée est trop faible par rapport aux quantités nécessaires pour un décrochage de la flamme avec ce seul gaz.

On peut donc déduire 2 facteurs importants qui déterminent le point de décrochage d'une flamme :

- La taille des molécules qui va influencer le côté cinétique de la réaction. La molécule de CO₂ est plus volumineuse que la molécule de N₂ et va donc davantage gêner la réaction en empêchant la réaction entre les molécules.

- La différence entre les capacités calorifiques molaires qui va influencer le côté thermique de la réaction. Etant donné que la capacité calorifique molaire du CO₂ est supérieure à celle de N₂, il est rationnel d'avoir besoin de moins de CO₂ pour atteindre le point de décrochage.

Cependant, aucune influence chimique n'a été mentionnée lors de la dilution par le N₂ et elle est très faible pour le CO₂, car les deux diluants sont considérés comme des gaz inertes.

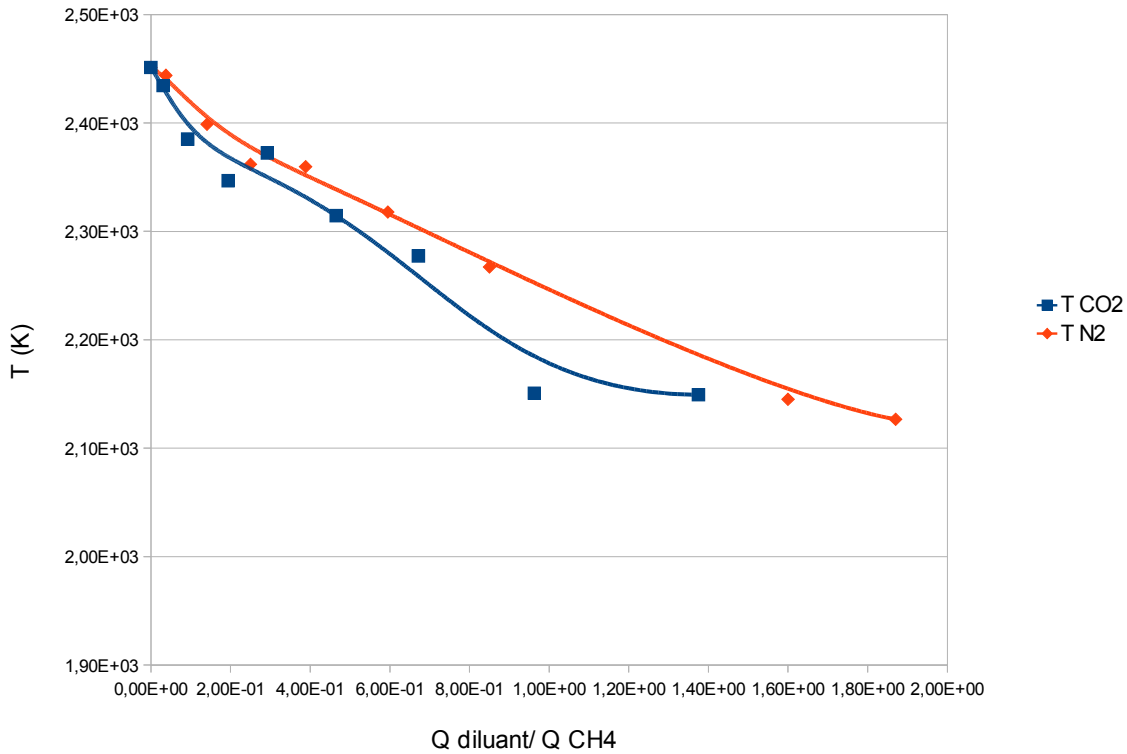


Cette courbe représente le rapport entre la quantité de diluant nécessaire au décrochage et la quantité de CH₄ introduite, en fonction du nombre de Reynolds. On observe que la pente de la courbe change pour un nombre de Reynolds autour de 2000, cela correspond au passage d'une flamme laminaire à une flamme turbulente.

Une fois de plus, les allures des courbes pour les 2 diluants sont vraiment similaires, avec toujours une quantité de diazote nécessaire au décrochage plus importante que celle de dioxyde de carbone.

Le passage à un écoulement turbulent accélère le décrochage de la flamme, puisqu'en effet il y a besoin de moins de diluant pour déclencher le décrochage pour $Re > 2000$. C'est ce que montre la pente de la courbe plus forte sur la deuxième partie du graphique.

Température en fonction de Q diluant / Q CH4



Ce graphique représente la température de la flamme au moment du décrochage en fonction de l'évolution du rapport de diluant par rapport au méthane. Les valeurs de la température ont été obtenues par le calcul, en utilisant les valeurs des vitesses de diluant injecté. Cela peut en partie expliquer l'allure de la courbe qui est peu linéaire.

Nous pouvons voir que la température évolue de façon similaire pour les deux expériences, pour les dilutions au CO2 et au N2. Pour une même quantité de diluant, nous remarquons que la température est plus basse dans le cas du dioxyde de carbone. Cela rejoint les résultats précédents qui montraient qu'il y a besoin de moins de CO2 que de N2 pour décrocher la flamme.

Nous remarquons que plus il y a de diluant, plus la température diminue. En effet la présence de diluant dans le foyer gêne et ralentit la combustion, il y a donc moins de chaleur créée par la réaction. Ainsi dans le cas d'une utilisation industrielle de la dilution des flammes, il faudrait prendre en compte la diminution de la température et les effets que cela pourrait entraîner.

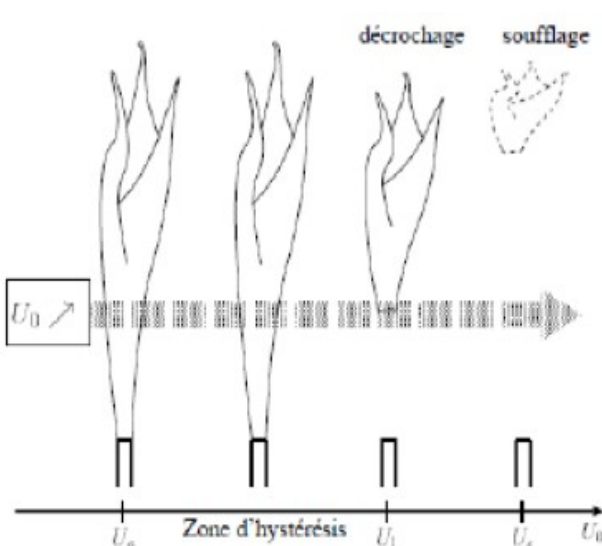
Zone d'hystérésis :

Dans certaines conditions d'écoulement, les flammes se trouvent suspendues au-dessus du brûleur. Dans le cas des jets de combustible d'une flamme de jet non-prémélangée la flamme se décroche lorsque la vitesse atteint une valeur critique U_c (vitesse de décrochage). La flamme se stabilise alors au-dessus du brûleur en une flamme liftée turbulente.

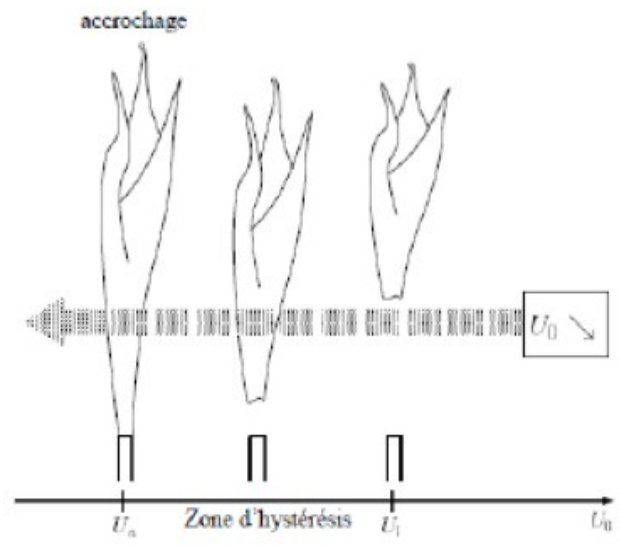
En revanche, dans le cas où la flamme est déjà liftée ($U_{CH4} > U_c$), il est nécessaire d'abaisser la vitesse du combustible jusqu'à une valeur U_a (vitesse d'accrochage) nettement inférieure à U_c pour la raccrocher. Ces conditions d'accrochage - décrochage de la flamme correspondent donc à un phénomène d'hystérésis.

L'intervalle de vitesse entre U_a et U_c est appelé zone d'hystérésis. Ainsi, en fonction de la vitesse du jet de combustible, on a les états de flamme possible suivants :

- $U_{CH4} < U_a$, la flamme reste accrochée au brûleur ;
- $U_a < U_{CH4} < U_c$ (zone d'hystérésis), l'état de la flamme n'est pas fixé à priori : en partant d'une flamme accrochée, la flamme reste accrochée dans cette zone ; en revanche, en partant d'une flamme liftée, la flamme y reste liftée. Mais ces deux états de flamme ne sont pas stables : sous l'effet d'une perturbation extérieure, la flamme peut définitivement soit se raccrocher à l'injecteur soit s'en décrocher ;
- $U_{CH4} > U_c$, la flamme reste liftée, c'est la zone de suspension pure. Cependant, dans ce cas, si la vitesse du jet du combustible continue à augmenter la flamme liftée finit par s'éteindre.



Zone d'hystérésis en situation de décrochage (figure 1)



Zone d'hystérésis en situation d'accrochage (figure 2)

Conclusion des résultats :

On a pu voir que le décrochage de flamme se produit systématiquement, pourvu qu'une quantité critique de diluant soit atteinte.

Nos expériences révèlent la compétition entre la dilution (Q diluant / Q air) et l'aérodynamique (U air et U CH₄). Pour atteindre le point de décrochage, dans le cas où l'aérodynamique est faible, il est nécessaire qu'une quantité importante de diluant soit injectée ; plus l'aérodynamique est renforcée, plus la quantité de diluant à ajouter peut être diminuée pour détacher la flamme.

Ainsi, dans le cas du CO₂, diluant aux propriétés les plus déstabilisatrices, trois effets concourent au décrochage de la flamme, tels que la dilution pure (~ 68%) apparaît comme l'impact le plus important, suivi de la thermique (~ 22.5%) et de la chimie (~ 9.5%). Alors que dans le cas du N₂ c'est essentiellement les effets de la dilution pure qui est à l'origine du décrochage de la flamme. De plus en présence de la dilution, l'extinction de flamme est toujours possible quelles que soient les conditions de vitesse.

5. Conclusion

Dans ce projet nous sommes parvenus à atteindre nos principaux objectifs, à savoir, découvrir et étudier les flammes de diffusions de manière théorique ainsi que leurs applications. Puis nous avons pu étudier expérimentalement ces flammes, l'effet de la dilution du combustible afin de conclure sur cet effet de dilution.

Nous pouvons affirmer également à titre personnel que cette expérience était très enrichissante, par le fait de nous apprendre à évoluer en équipe sur un projet dont la majeure partie du travail s'est effectuée hors des créneaux horaires obligatoires. Nous étions donc libre dans la façon de nous organiser pour réaliser se projet, il a donc fallu apprendre à communiquer afin d'être le plus efficace et le plus autonome possible, et il a également fallu apprendre à gérer le temps pour rendre ce rapport dans les délai.

Cependant, de part notre manque de connaissances dans le domaine étudié, l'aide de notre tuteur était indispensable pour la réalisation des expériences ainsi que dans l'explication des points clés de ce projet. Mais c'est également le fait d'étudier ce domaine totalement inconnu qui a rendu ce sujet d'autant plus intéressant, et nous remercions evidemment notre tuteur de nous l'avoir fait découvrir de manière claire.

Nos principaux objectifs étant atteints, nous pourrions pousser le sujet plus loin en étudiant l'effet de la dilution par d'autres gaz dans un premier temps. Mais nous pourrions également rechercher plus de liens avec des applications concrètes et connues afin de mettre plus en relation la théorie et l'application réelle, non par les expériences réalisées en laboratoire mais par l'utilisation "quotidienne" et industrielle des flammes de diffusions.

6. Bibliographie

Sites web :

- Explication des types de flammes et de la combustion : <http://fr.wikipedia.org>
<http://www.techniques-ingenieur.fr>
http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/74/73/30/PDF/may.chahine_2359_vm.pdf
- Phénomène de stabilisation des flammes :
<http://www.gfcombustion.asso.fr>

Livres :

- *Comportement transitionnel et stabilisation de flammes-jets non-prémélangés de méthane dans un coflow d'air dilué en CO₂*, Jiesheng MIN, 2011
- *A numerical study on the influence of CO₂ addition on soot formation in an ethylene/air diffusion flame*, Guo and Smallwood, Combustion Science and Technology, 180 : 1695–1708, 2008
- *Thermodynamique une approche pragmatique* , Yunus Cengel, Michael Boles
- *Theoretical and numerical combustion* , Thierry Poinsot, Denis Veynante

7. Annexe

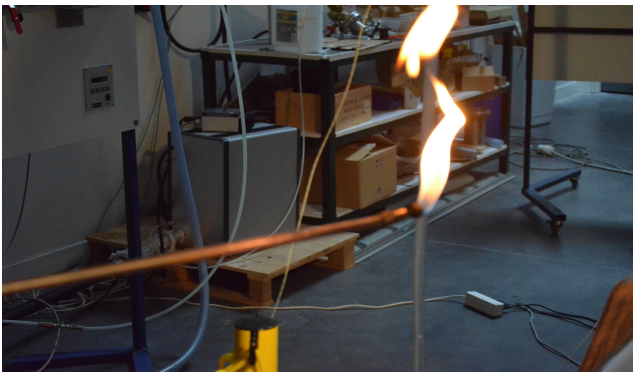
Photos de l'expérience



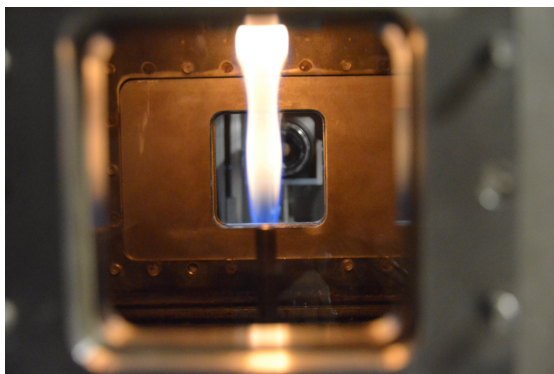
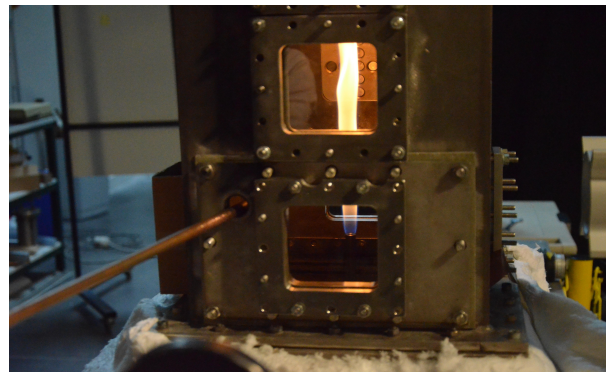
Vannes de controle des gaz



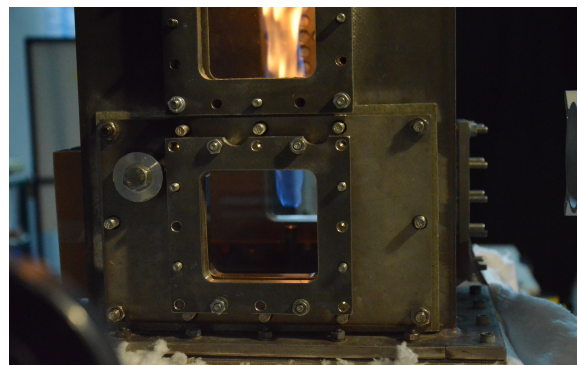
Ecran d'affichage des débitmètres



Allumage de la flamme



Flamme accrochée



Flamme décrochée

Q CH4 (SLM)	Q CO2 Décrochage		Q CO2 Extinction		Ecart type décrochage	Ecart type extinction
1	1,35E+00	1,40E+00	1,35E+00	1,40E+00	0,0354	0,0354
4	4,00E+00	3,70E+00	4,00E+00	3,70E+00	0,2121	0,2121
7	4,70E+00	4,70E+00	4,70E+00	4,70E+00	0,0000	0,0000
10	4,70E+00	4,60E+00	5,00E+00	4,90E+00	0,0707	0,0707
13	3,80E+00	3,80E+00	5,50E+00	5,55E+00	0,0000	0,0354
16	3,30E+00	2,90E+00	6,60E+00	6,50E+00	0,2828	0,0707
19	1,90E+00	1,60E+00	7,50E+00	7,40E+00	0,2121	0,0707
22	7,00E-01	6,40E-01	7,80E+00	7,80E+00	0,0424	0,0000
25	0,00E+00	0,00E+00			0,0000	
Moyenne des écarts type					0,0951	0,0619

Q CH4 (SLM)	Q N2 Décrochage		Q N2 Extinction		Ecart type décrochage	Ecart type extinction
1	1,84E+00	1,90E+00	1,84E+00	1,90E+00	0,0424	0,0424
3	4,80E+00	4,80E+00	4,80E+00	4,80E+00	0,0000	0,0000
7	6,00E+00	5,90E+00	6,13E+00	6,13E+00	0,0707	0,0000
10	6,00E+00	5,90E+00	7,30E+00	7,30E+00	0,0707	0,0000
13	5,10E+00	5,00E+00	8,40E+00	8,20E+00	0,0707	0,1414
16	4,20E+00	3,80E+00	9,50E+00	9,35E+00	0,2828	0,1061
19	2,80E+00	2,55E+00	1,04E+01	1,06E+01	0,1768	0,1344
22	8,20E-01	8,30E-01	1,17E+01	1,18E+01	0,0071	0,0707
25	0,00E+00	0,00E+00			0,0000	
Moyenne des écarts type					0,0801	0,0619

Tableaux des écarts-types