

Chapitre 4 *Flammes de diffusion ou Non-pré mélangées*

4.1 Introduction

Dans plusieurs procédés de combustion le fuel et l'oxydant sont séparés avant d'entrer dans la zone de réaction ou ils se mélangent et brûlent. Ce type de combustion est dit non pré mélangée ou de diffusion car le transport du fuel et de l'oxydant dans la zone de réaction se fait premièrement par diffusion. La bougie est l'exemple le plus courant et le plus simple d'une flamme de diffusion, ce mode de combustion est sûre, puisque le combustible et l'oxydant sont séparés, il n'y peut avoir d'explosion. Les réactions chimiques se passent à l'échelle moléculaires, c'est pourquoi il faut que le fuel et l'oxydant soient mélangés avant de réagir.

Généralement, les réactions chimiques sont rapides et la combustion où le taux de combustion est plus limité par le transport et le mélange que par la cinétique chimique. Par conséquent, la flamme est très stable, c'est pourquoi ce mode de combustion est attractif pour plusieurs applications notamment les moteurs d'avions.

4.2 Description de la flamme d'une bougie

La figure 1 décrit les procédés chimiques et physiques compliqués présent dans la combustion non-pré mélangée, la surface de la flamme est là où le fuel vaporisé et l'oxygène se mélangent, forment un mélange stœchiométrique.

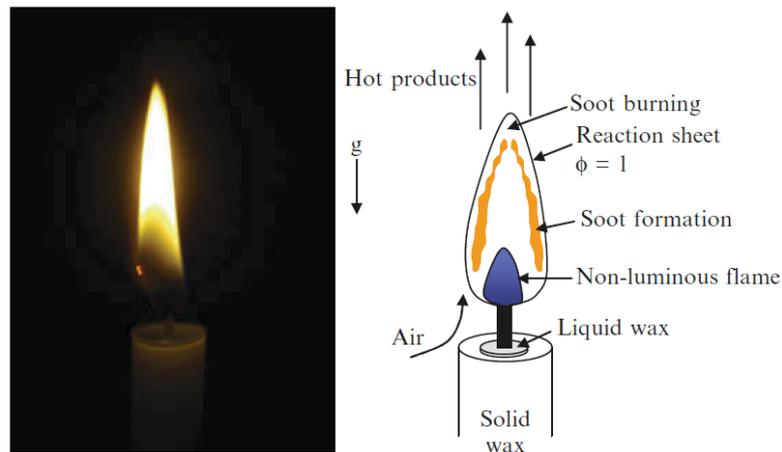


Figure 1. Gauche : L'apparence simple d'une bougie masque le procédé compliqué.

Droite : Procédé physique associé et l'effet de la flottabilité sur la flamme.

A la surface de la flamme, la combustion donne des températures élevées qui maintiennent la flamme, les éléments du procédé sont les suivants:

- La chaleur de la flamme fait fondre la cire à la base de la flamme.
- Le liquide de cire monte par capillarité dans la mèche.
- La chaleur de la flamme vaporise la cire liquide.
- La vapeur de cire migre vers la surface de la flamme, en se brisant en hydrocarbonés simples.
- L'oxygène ambiant migre vers la surface de la flamme par diffusion et convection.

La flottabilité convective se développe lorsque l'air chaud à faible densité entourant la flamme monte transportant simultanément l'oxygène à la flamme et les produits de combustion loin de la flamme.

La flamme qui résulte a la forme d'une goutte étirée dans la direction opposée à la force gravitationnelle. La partie jaune de la flamme est le résultat des particules solides de suies, formées entre la flamme et la mèche, qui brûlent en allant vers la flamme.

4.3 Structure de la flamme laminaire en jets libres

Les flammes de jets sont bien caractérisées et très utiles pour comprendre la localisation, température et la hauteur globale de la flamme. Les caractéristiques d'une flamme de jet sont similaires à celles d'une bougie sauf que le fuel dans ce cas est gazéifié et injecté dans l'air à une vitesse pré déterminé.

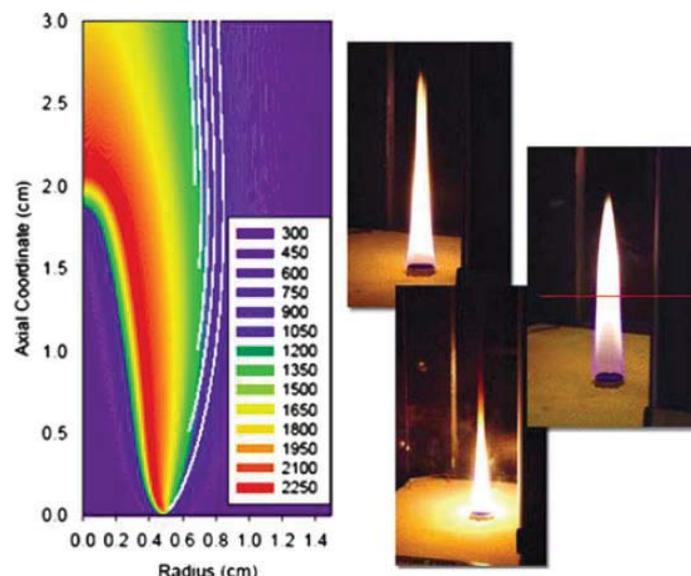
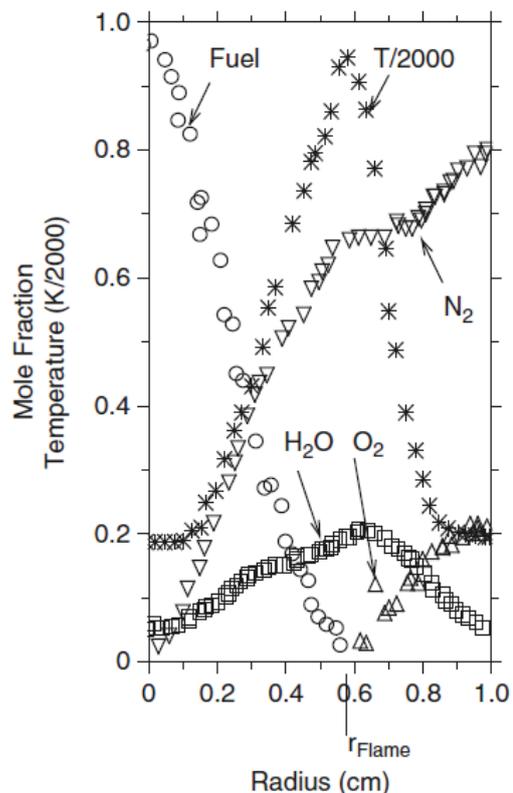


Figure 2. Gauche : Température calculées d'un jet non-prémélangé. Droite : Flamme de diffusion laminaire de l'éthylène (gauche), JP-8 (centre), et méthane (droite).

A droite de la figure 2; on voit une flamme non prémélangée en jet utilisant l'éthylène, JP-8 "Jet Propellant 8", et le méthane. Le fuel est injecté à travers une tuyère dans l'air environnant. La combustion est initiée par une flamme pilote, lorsque la flamme est stabilisée, la source d'ignition est supprimée. A gauche la figure représente la distribution typique de la température obtenue par simulation sur ordinateur. Le fuel est injecté à travers une conduite de diamètre 1 cm, la hauteur globale de la flamme est de 2.5 cm. Les fractions molaires des espèces mesurées et des températures le long de la ligne horizontale sont montrées par la figure 3.

Figure 3. Données expérimentaux des profils d'espèces et de température dans une flamme laminaire. La flamme est localisée approximativement à 0.6 cm de la ligne centrale



- Sur la figure 3, on voit que la fraction massique du fuel diminue de l'unité sur l'axe à zéro vers la flamme.
- Au-delà de $r > r_{flamme}$, la fraction massique du fuel est nulle car la chimie est assez rapide pour consommer tout le fuel à la surface de la flamme.
- La fraction massique de l'oxydant diminue de sa valeur d'ambiance à zéro à r_{flamme} .
- Il n'y a pas d'oxydant dans la zone où $< r_{flamme}$, les espèces produites ne sont pas nulles sur l'axe à cause de l'accumulation des produits issus de la flamme.
- La fraction massique des produits est maximale sur r_{flamme} .

- Puisque les espèces produites et la chaleur ont des procédés de production et de transport similaires, le profil de température et de la fraction massique des produits sont similaires.
- On va voir que la cinétique chimique est toujours plus rapide que le procédé de diffusion, d'où la zone de réaction est concentrée près de $\approx r_{flamme}$. Seulement dans cette zone le fuel et l'oxydant existent avant la réaction, la température est maximale donnant des réactions chimiques très rapides.

Similairement aux flammes prémélangées, les différentes espèces deviennent moléculairement excitées et émettent des radiations visibles, donnant la couleur de la flamme. La zone externe de la réaction est de couleur bleuâtre due à la radiation des radicaux CH. La zone interne est rougeâtre due au C_2 et le rayonnement des suies. Généralement, les derniers radicaux dominant donnant la couleur de la plupart des flammes de diffusion.

Les gradients des fractions massiques résultantes de la consommation du fuel et de l'oxydant provoquent le transport diffusif du fuel et de l'oxydant vers la flamme ou ils se mélangent et réagissent. Le flux massique du fuel et de l'oxydant à travers la zone de réaction est déterminé par la loi de Fick de la diffusion de la masse. Si l'un des gradients de la masse, disons de l'oxygène par exemple, augmente pour n'importe quelle raison, alors le flux massique de l'oxygène va augmenter dans la zone de réaction. Puisqu'il y a plus d'oxygène dans la réaction, plus de fuel va être consommé et la réaction va bouger vers la zone du fuel, augmentant le gradient de fraction massique du fuel. Le même phénomène va se produire si la concentration du fuel augmente. En conséquent, la flamme va toujours se positionner de telle façon que les flux massiques du fuel et de l'oxydant entrant dans la zone de réaction soient toujours en condition stœchiométrique. Cet aspect est très important dans les flammes de diffusion car il détermine leurs formes et leurs caractéristiques.

4.4 Hauteur de la flamme laminaire de jet L_f

La longueur où la hauteur d'une flamme non-pré mélangée est une propriété importante qui indique la taille de la flamme. Les simulations sur ordinateur peuvent prédire avec précision la structure de la flamme de diffusion; cependant, quelques paramètres qui contrôlent l'allure des flammes de jets peuvent être déterminés par une analyse adimensionnelle simple.

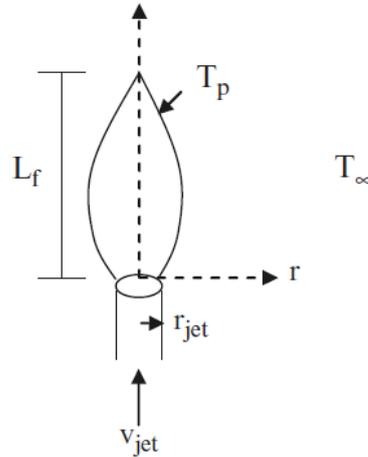


Figure 4. Flamme de jet libre

Soit une flamme de jet libre montrée par la figure 4, les équations qui la gouvernent sont :

Equation d'énergie :

$$\rho u C_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \bar{r}_{fuel} \bar{Q}_C \quad (4.1)$$

Equation des espèces :

$$\rho u C_p \frac{\partial Y_f}{\partial x} = \frac{\rho D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial y_f}{\partial r} \right) + \bar{r}_{fuel} M_f \quad (4.2)$$

Introduisant les quantités adimensionnelles :

$$\bar{x} \equiv \frac{x}{L_f} ; \quad \bar{r} = \frac{r}{r_{jet}} ; \quad \bar{T} \equiv \frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty} ; \quad \bar{Y}_f \equiv \frac{Y_f}{Y_{f,s}} ; \quad \bar{u} = \frac{u}{V_{jet}}$$

$Y_{f,s}$ est la fraction massique du fuel pour un mélange stœchiométrique, r_{jet} est le rayon du jet de fuel et V_{jet} est la vitesse du jet.

Et utilisant les relations :

$$\bar{Q}_C [Fuel]_s = \rho C_p (T_p - T_\infty) \quad \text{et} \quad [Fuel]_s \equiv \frac{\rho Y_{f,s}}{M_f} \quad (4.3)$$

On obtient :

$$\frac{V_{jet}}{L_f} \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \frac{\alpha}{r_{jet}^2} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{\bar{r}_{fuel}}{[Fuel]_s} \quad (4.4)$$

Or

$$\frac{1}{\tau_{conv}} \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \frac{1}{\tau_{diff}} \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{1}{\tau_{chem}} \quad (4.5)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \underbrace{\frac{\tau_{conv}}{\tau_{diff}}}_{\text{Groupe 1}} \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}} \right) + \underbrace{\frac{\tau_{conv}}{\tau_{chem}}}_{\text{Groupe 2}} \quad (4.6)$$

Et

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{Y}_f}{\partial \bar{x}} = \underbrace{\frac{\tau_{conv}}{\tau_{diff}}}_{\text{Groupe 1}} \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial \bar{Y}_f}{\partial \bar{r}} \right) + \underbrace{\frac{\tau_{conv}}{\tau_{chem}}}_{\text{Groupe 2}} \quad (4.7)$$

Il y'a deux groupes distinct qui apparaissent, examinons l'échelle de temps associées à chaque groupe .

$\tau_{conv} = L_f/V_{jet}$, représente l'échelle de temps convectif pour la flamme en jet par contre,

$\tau_{diff} = r_{jet}^2/D$, est l'échelle de temps diffusif de l'oxydant pour diffuser jusqu'à l'axe du jet;

$\tau_{chem} = [Fuel]_s/\bar{r}_{fuel}$, est le temps de la chimie .

- Le groupe 2 contient le rapport entre le temps convectif et chimique . C'est le nombre de Damköhler. Il devient infini pour une chimie infiniment rapide, indiquant que le procédé de transport gouverne les caractéristiques de ce type de flammes.
- Le groupe 1 est le rapport entre le temps convectif et diffusif. A la base de la flamme , les deux temps sont approximativement égaux de telle que .

$$L_f \propto \frac{V_{jet} r_{jet}^2}{D} \propto \frac{\dot{V}_{fuel}}{D} \quad (4.8)$$

Pour un fuel et oxydant donnés (diffusivité massique fixe), cette équation implique que la hauteur de la flamme augmente linéairement avec le débit volumique (\dot{V}_{fuel}) , cette dépendance est observée en expériences.

4.5 Corrélations empiriques pour la hauteur de la flamme laminaire L_f

La hauteur de la flamme dépend aussi du type de fuel et de la stœchiométrie, ceci n'est pas considéré dans la relation. Pour les calculs pratiques, la hauteur de la flamme, est donnée par la corrélation semi empirique suivante :

$$L_f = \frac{\dot{V}_{fuel}(T_\infty/T_f)}{4\pi D_\infty \ln(1+1/S)} \left(\frac{T_\infty}{T_p}\right)^{0.67} \quad (4.9)$$

$$\approx \frac{\dot{V}_{fuel}(T_\infty/T_f)}{4\pi D_\infty} \left(\frac{T_\infty}{T_p}\right)^{0.67} S \quad \text{pour } S \text{ grand} \quad (4.10)$$

Où T_∞ est la température de l'oxydant (K) .

T_p est la température moyenne de la flamme (K).

T_f est la température du fuel.

S rapport stœchiométrique molaire $Air/fuel$.

D_∞ coefficient de diffusion moyenne évalué à T_∞ (m^2/s).

\dot{V}_{fuel} débit du fuel (m^3/s).

L_f hauteur de la flamme (m).

Le rapport stœchiométrique molaire $Air/fuel$ est évalué pour

$$S = \begin{cases} 4.76 \left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2} \right) \text{ pour le fuel } C_\alpha H_\beta O_\gamma \text{ avec l'air} \\ (1 + x_{N_2}/x_{O_2}) \left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2} \right) \text{ avec l'O}_2 \end{cases}$$

En plus de la physique intégrée dans cette équation, elle inclut aussi la dépendance de L_f sur le type de fuel. Lorsque S est grand, L_f varie linéairement en fonction de la pression. Cette dépendance est tracée sur la figure 5.

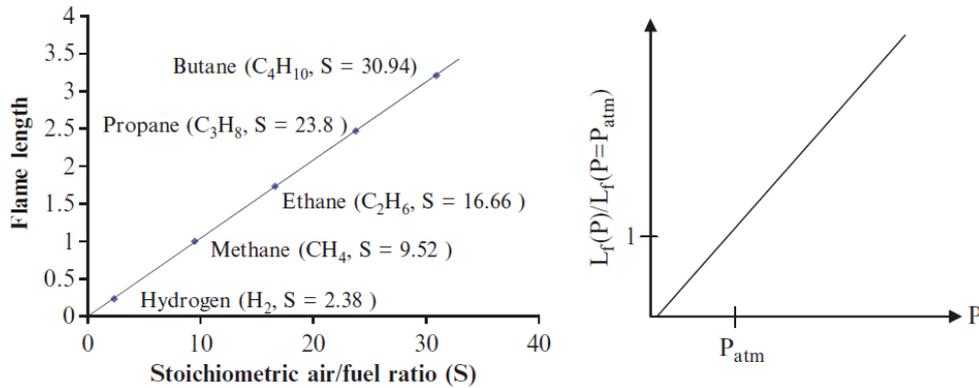


Figure 5. Augmentation de la hauteur de la flamme en fonction de la complexité du fuel et de la pression ambiante

4.6 Flamme de jet de Burke-Schumann

Lorsqu'un jet de fuel est issu dans un tube, la quantité de l'oxydant disponible pour la combustion est contrôlée par le débit volumique du fluide qui entoure ce jet. Dans ce cas la quantité de l'oxydant est limitée, contrairement au jet libre. Soit la figure 6 qui représente ce type de flamme. Dans cette flamme confinée, les débits du fuel et du fluide qui l'entoure sont fixes, tandis que la quantité d'oxygène (Y_{O_2}), dans le fluide entourant est variée pour avoir plusieurs configurations.

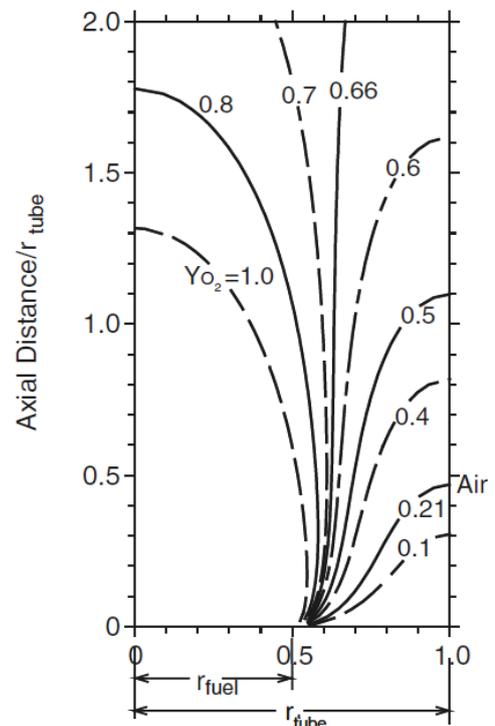
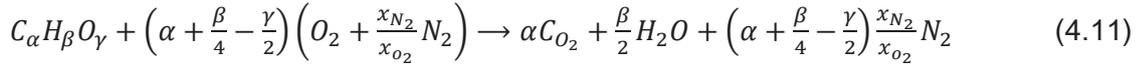


Figure 6. Flamme de diffusion de Burke-Schumann : La forme de la flamme depend de la quantité de l'oxydant contenu dans le fluide en co flow entre r_{fuel} et r_{tube}

Considérons les différentes situations pour le cas général d'hydrocarbure/oxygène .



Où la quantité d'oxygène dans le fluide entourant et variée par l'ajustement du rapport $\frac{x_{N_2}}{x_{O_2}}$ (= 3.76 pour l'air) , la fraction massique de l'oxygène dans le jet d'oxydant :

$$Y_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{M_{O_2} + \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}} M_{N_2}} = \frac{1}{1 + \frac{x_{N_2} M_{N_2}}{x_{O_2} M_{O_2}}} \quad (4.12)$$

Le rapport $\frac{x_{N_2}}{x_{O_2}}$ peut être exprimé en terme de Y_{O_2} par :

$$\frac{x_{N_2}}{x_{O_2}} = \left(\frac{1}{Y_{O_2}} - 1\right) \frac{M_{O_2}}{M_{N_2}} \quad (4.13)$$

Le rapport stœchiométrique oxygène / fuel (OFR_{st}) basé sur le volume (*moles*) est :

$$OFR_{st} = \left(\frac{\dot{n}_{O_2}}{\dot{n}_{fuel}}\right)_{sto} = \left(\frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{fuel}}\right)_{st} = \alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2} \quad (4.14)$$

Le débit volumique de l'oxygène est :

$$\dot{V}_{O_2} = X_{O_2} \dot{V}_{oxidant} = \frac{x_{O_2}}{x_{O_2} + x_{N_2}} \dot{V}_{oxidant} = \frac{\dot{V}_{oxidant}}{1 + \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}}} \quad (4.15)$$

où $\dot{V}_{oxidant}$ est le débit volumique du l'oxydant en (*cc/s*) .

Puisque le jet contient 100% fuel , le rapport OFR en débit volume (*moles*) :

$$OFR = \left(\frac{\dot{n}_{O_2}}{\dot{n}_{fuel}}\right) = \frac{\dot{V}_{oxidant} / \dot{V}_{fuel}}{1 + \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}}} \quad (4.16)$$

$$= \frac{\dot{V}_{oxidant}}{\dot{V}_{fuel}} \frac{Y_{O_2}}{Y_{O_2} + (1 - Y_{O_2})} \frac{M_{O_2}}{M_{N_2}} \quad (4.17)$$

Différentes formes de la flamme sont développée en fonction du rapport OFR/OFR_{st} comme suite :

- (1) Lorsque $OFR/OFR_{st} > 1$, le jet de l'oxydant fournit plus d'oxygène que celui nécessaire pour la combustion stœchiométrique la flamme est dite « sur ventilée » , sa forme est similaire à celle de la flamme du jet car tout le fuel va être consommé.
- (2) Si $OFR/OFR_{st} = 1$, le jet fournit piste la quantité stœchiométrique, la surface de la flamme devient parallèle à la direction axiale.
- (3) Lorsque $OFR/OFR_{st} < 1$, le jet fournit une quantité inférieure à celle stœchiométrique , la flamme est dite « sous-ventilée » , elle a une forme d'une trompète , dans le quel fuel n'est pas consommé à 100%.