

**Chapitre II :**  
**Notion sur les**  
**flammes**

## Chapitre II : Notion sur les flammes

### II.1. l'état de l'art

Ce n'est que dans les années 40 qu'on a commencé à étudier sérieusement les flammes turbulentes avec des travaux théoriques et expérimentaux. **Damköhler [6]** par exemple a montré l'influence du nombre de Reynolds sur la vitesse de la flamme en le régime turbulent et l'effet de la géométrie a été exploré.

**Hotell et Hawthorne [7]**, en 1949 ont montré que la longueur d'une flamme de diffusion turbulente ne dépend pas de la vitesse d'arrivée des gaz alors que celle d'une flamme de diffusion laminaire est proportionnelle à celle-ci.

**Kuo et al [8]** ont considéré dans leur approche que l'échelle temporelle associée à la flamme turbulente est différente de celle de la flamme laminaire.

La modélisation de la combustion non prémélangée a commencée par l'approche de **Bilger [9]**, celle-ci permet de calculer le champ des fractions massiques moyen et de leurs fluctuations sans faire appel au taux de réaction, lorsque les fractions massiques sont reliées à la fraction de mélange de façon parfaitement déterministe.

Une formule plus au moins empirique, proposée par **Magnussen [10]** est largement utilisée dans l'industrie. La modélisation ou le taux moyen de réaction est supposé proportionnel à une « surface moyenne de flamme par unité de volume » a été proposé en **1978** par **Marble et Broadwel [11]**. C'est le modèle dit « de la flamme cohérente », qui a été ensuite transposé aux flammes de prémélange.

**Bray [12]** en **1979** a étudié l'interaction entre la turbulence et la combustion d'un point de vue modélisation. Les effets de la combustion sur la structure de la turbulence et ceux de la turbulence sur les taux de réactions chimiques ont été discutés.

**Borghi et Dutoya [13]** ont traité le problème de fermeture du flux diffusif turbulent et la destruction moléculaire des fluctuations des espèces réactives (ou de la température) en considérant les formes de la PDF (Probability Density Function) pour les vitesses et les concentrations des espèces.

Une comparaison de calcul d'expériences tiré de [14] démontre que les profils des fractions massiques des espèces chimiques sont majoritaires, ainsi que la température. Il s'agit là encore de valeurs moyennes, bien sûr. L'accord semble tout à fait satisfaisant, compte tenu des difficultés de mesure.

**Vervisch et al [15]** ont utilisé la méthode PDF pour l'étude des flammes turbulentes non prémélangées. Son intérêt est qu'elle montre une extinction partielle lorsque la vitesse du gaz qui l'alimente ( $\text{CH}_4$ ) est suffisamment forte. Les résultats sont comparés aux tests expérimentaux publiés par **Masri, Bilger et Dibble [16]**. L'accord peut être considéré comme tout à fait satisfaisant.

## II.2. Définition d'une flamme

Une flamme est un milieu réactionnel dans lequel se déroule une réaction de combustion. Elle est généralement associée à une zone réactive, lumineuse appelée front de flamme, onde de combustion ou encore zone de combustion. Les propriétés de propagation spatiale de la flamme résultent de l'action conjuguée de processus chimiques (production rapide de chaleur et d'espèces chimiques réactives), physiques (transport, diffusion), ainsi que de déplacement de matière (diffusion moléculaire) et de chaleur (convection). Donc, la flamme (zone de réaction) est le résultat du transport des espèces, du transport de la chaleur et de la réaction chimique. [17]

## II.3. Paramètre et caractérisation d'une flamme

La notion de flamme englobe différents processus et peut être caractérisée à l'aide de différents paramètres qui présentent l'avantage de permettre une classification [Warnatz et al. 2006]. Les trois paramètres principaux sont :

- ✚ La nature et le nombre de réactifs ;
- ✚ le mode d'introduction des réactifs ;
- ✚ Le régime d'écoulement des gaz dans le milieu réactionnel. [17]

## II. 4. Classification des flammes :

### II.4.1. Classification selon les mélanges (air+méthane)

Deux situations généralement rencontrées sont identifiées selon la procédure utilisée pour introduire les réactifs dans la zone de flamme. Elles sont schématisées sur la figure (II.2).

#### II.4.1.1. Les flammes prémélangées

Le carburant et l'oxydant sont prémélangés avant d'atteindre le front de flamme. Ce mode est souvent utilisé en mélange pauvre permettant ainsi d'augmenter le rendement et réduire la production des NOx. Ce type de flamme augmente le risque d'explosion qui provient du mode stockage du mélange réactif. [18]

#### II.4.1.2. Les flammes de diffusion

Le carburant et le comburant sont injectés différemment, le front de flamme qui résulte se positionne dans la zone de rencontre des deux courants.

Plus facile à maîtriser. Ces flammes ont le désavantage de produire une quantité importante de polluants car les températures atteintes sur les fronts de flammes sont généralement élevées. [18]

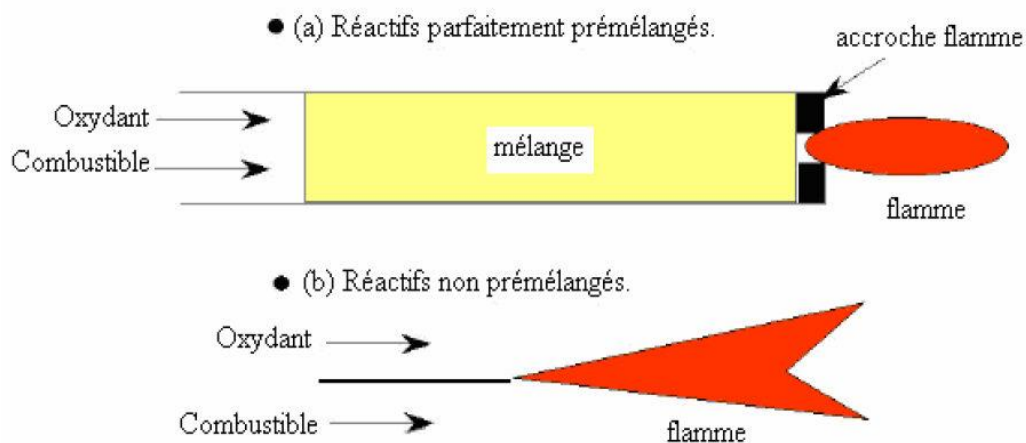


Figure II.1 Types de flamme : (a) prémélangée, (b) non prémélangée. [19]

### II.4.2. Classifications selon les types d'écoulements

Le régime d'écoulement des gaz dans le milieu réactionnel permet également de classer les flammes en deux catégories, les flammes laminaires et les flammes turbulentes. La transition entre les deux types d'écoulement est observée pour une certaine valeur du nombre de Reynolds (Equation. (II.1)):

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot X}{\mu} \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

- +  $\rho$  : la masse volumique du mélange gazeux ( $g.m^{-3}$ );
- +  $V$  : la vitesse de l'écoulement des gaz ( $m.s^{-1}$ );
- +  $X$  : la dimension critique du système ( $m$ );
- +  $\mu$  : la viscosité dynamique ( $Kgm / s$ );

Pour fixer les idées, la figure (II.2), résume ces quatre situations génériques et y associe quelques application industriel.

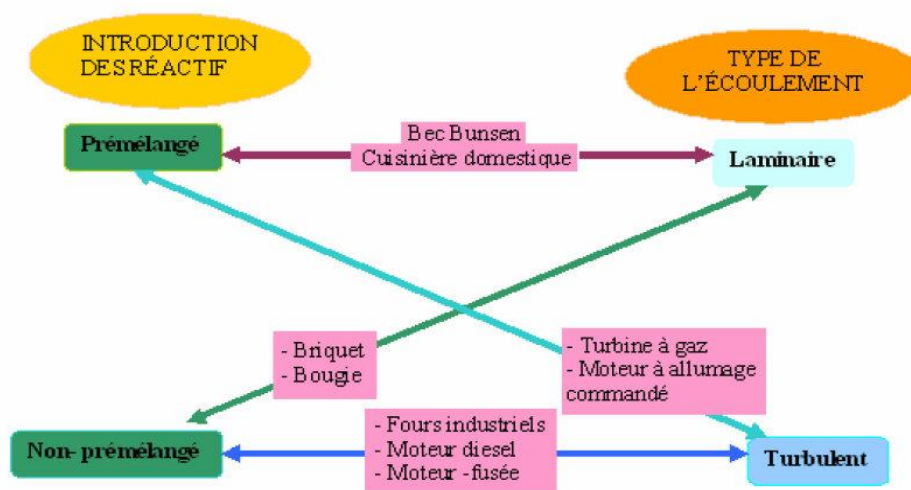


Figure II.2 : Différents régimes de flammes et applications. [19]

L'écoulement est dit laminaire lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 2300. Dans ce type de flamme, la zone réactionnelle dépend du couplage entre les phénomènes de convection, de cinétique chimique et les processus de transfert moléculaire.

L'écoulement est dit turbulent si le nombre de Reynolds est supérieur à 2300.

L'augmentation de la vitesse d'écoulement, et donc du nombre de Reynolds, génère des forces de friction sur les parois qui provoquent la formation de « turbulences ». Par conséquent dans une flamme de ce type le milieu réactionnel ne peut plus être considéré comme homogène. [20]

### II.4.3. Classification selon BORGUI & M. CHAMPION

Lorsque les deux types précédents existent aux mêmes temps alors on peut citer :

#### II.4.3.1. Flamme laminaire prémélangée

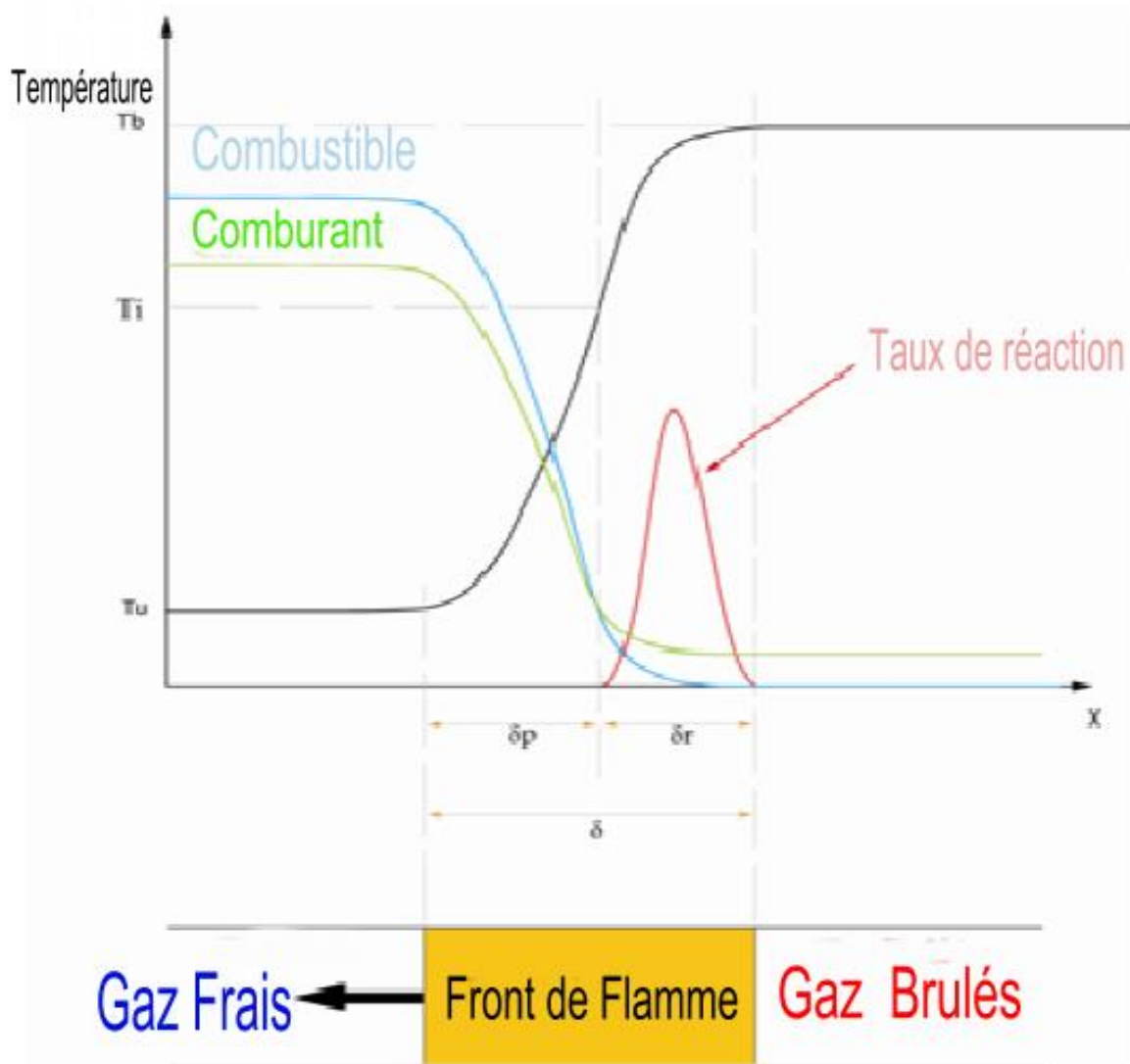
Lorsqu'on allume un mélange gazeux où le combustible et l'oxydant sont initialement mélangés à l'avance, un front de flamme, séparant les gaz frais (produit) des gaz brûlés (réactif) [21] par une épaisseur  $\delta_L$  qui est peut être divisée en deux zones distinctes (Figure(II.3)) :

- **une zone de préchauffage d'épaisseur  $\delta_p$**  dans laquelle la diffusion de masse et de chaleur sont les deux processus dominants et où les réactions chimiques sont considérées comme négligeables ;
- **une zone de réaction d'épaisseur  $\delta_r$** , zone d'épaisseur très mince dans laquelle se fait le dégagement de chaleur dû aux réactions chimiques. Dans cette zone, les phénomènes de conduction sont alors négligeables par rapport à ceux de diffusion. [22]

Ainsi L'épaisseur de cette flamme laminaire est peut être assimilée à la distance parcourue par la chaleur libérée par réaction pendant le temps  $\tau_c$  que dure cette réaction. Ainsi, en faisant intervenir le coefficient de diffusion thermique  $\alpha$ .

L'épaisseur de la flamme s'exprime sous la forme :

$$\delta_L \sim (\alpha \tau_c)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II. 2})$$



Figure(II.3) : Structure du front flamme laminaire prémélangée. [21]

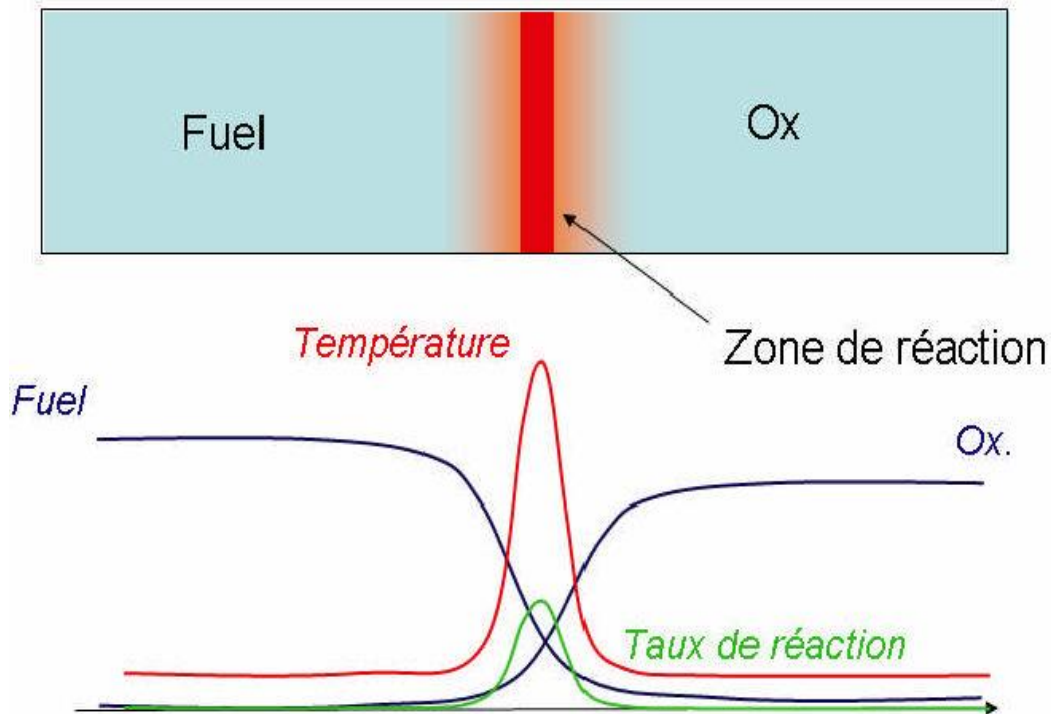
#### II.4.3.2. Flamme laminaire non prémélangée

La combustion peut s'effectuer sous la forme d'une flamme de diffusion laminaire lorsqu'elle se produit entre un milieu oxydant et un milieu combustible qui ne sont pas prémélangés. [23]

Sa caractéristique principale dite de diffusion consiste à présenter une zone de réaction séparant les réactifs, combustible et oxydant. [24]

Dans ce type de flammes, les réactions chimiques sont très rapides comparées aux phénomènes de convection et la combustion est contrôlée par la diffusion des espèces et de la chaleur. [21]

Les profils des fractions massiques et de température sont présentés sur la figure (II.5) :



**Figure II .4 :** Structure d'une flamme laminaire non prémélangée. [3]

Comme les flammes de prémélangée, les flammes de diffusion se développent grâce au concours des phénomènes de réaction ainsi que des phénomènes de diffusion de chaleur et de masse qui se produisent de part et d'autre de la zone réactive.

#### II.4.3.3. Flammes turbulentes de prémélange :

Pour que notre discussion de la structure des flammes turbulentes de prémélange soit claire, nous commencerons par définir les différents paramètres utilisés à cet effet :

- ✚ L'énergie cinétique de la turbulence  $k$  et l'échelle intégrale spatiale de la Turbulence  $l_t$ , qui caractérisent la turbulence dans les gaz frais, nous donnent un nombre de Reynolds turbulent:

$$\text{Re} = \left( K^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{l_t}{\nu} \right) \quad (\text{II. 3})$$



✚ L'échelle intégrale temporelle  $\tau_t$ , correspond au temps caractéristique des gros tourbillons est estimé par :

$$\tau_t = \frac{l_t}{K^{\frac{1}{2}}} \tag{II. 4}$$

✚ L'échelle spatiale de Kolmogorov, représentative de la dimension caractéristique des plus petites structures turbulentes, est estimée par :

$$\eta_k = \left( \frac{V^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{3}{4}} \tag{II. 5}$$

✚ L'échelle Temporelle correspondante par :

$$\tau_K = \left( \frac{V}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{II.6}$$

Ou

$$\varepsilon = \left( \frac{K^{\frac{2}{3}}}{l_t} \right) \tag{II.7}$$

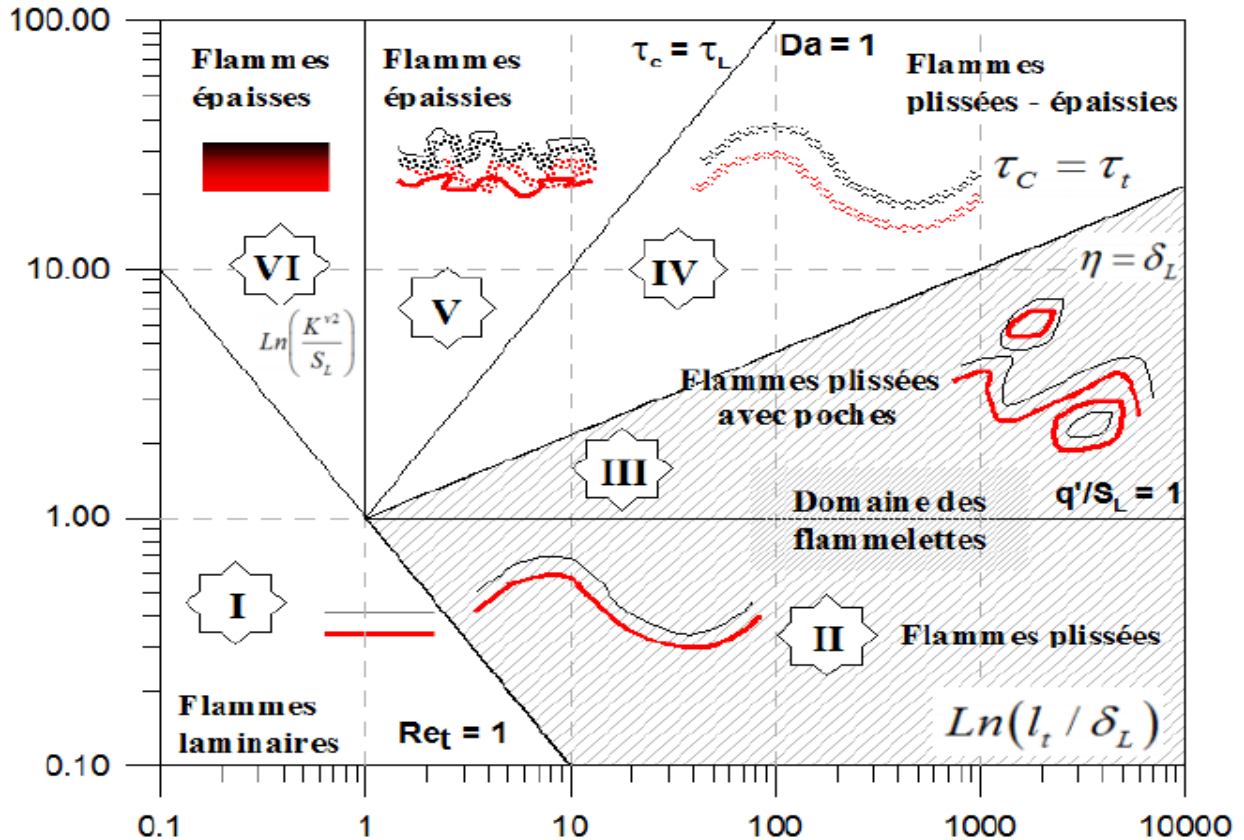


Figure II.5: Les différents types des flammes turbulentes de prémélangées. [23]

**a- Les flammes plissées**

Une flamme turbulente de types plissés est constituée d'une ou plusieurs « flammelettes » du type laminaire qui sont plissées par la turbulence, dont les échelles plus grandes que  $\delta_L$ . Ce types de flammes est donc, en principe, restreint au domaine où  $\eta > \delta_L$ .

**b - Les flammes de types « plissé-épaissi »**

Lorsque l'on augmente l'énergie de la turbulence  $k$  à  $l_t$  constante de sorte que  $\eta > \delta_L$  des interactions entre des portions de flammelettes très proches se produisent de plus en plus fréquemment, car le rayon de courbure de flammelettes peut être alors, à certains endroits, de l'ordre de  $\delta_L$ . On obtient des zones d'interaction entre les flammelettes, accroissant localement d'épaisseur de ces dernières au-dessus de  $\delta_L$ . A d'autres endroits cette épaisseur est au contraire réduite par l'étirement que la turbulence impose à la flammelettes.

**c - Les flammes « épaissies »**

Lorsqu'on augmente encore  $k$  (à  $l_t$  fixé), il arrive un moment où les perturbations turbulentes ont provoqué de nombreuses interactions de flammelettes à toutes les échelles y compris les plus grandes, de telle façon que les flammelettes moyennes précédemment définies incluent toutes les fluctuations et ne sont plus plissées, cela arrive lorsque  $\tau_t = \tau_c$ . Au-dessus de cette limite, la flamme est alors seulement épaissie par la turbulence. [23]

**II.4.3.4. flammes turbulente non- prémélangée**

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que deux nombres sans dimensions (un rapport de vitesse et un rapport de longueur) sont suffisants pour caractériser un régime de combustion turbulente pour les flammes prémélangées. Le problème est plus délicat pour les flammes non-prémélangées, essentiellement parce qu'il est difficile de définir une échelle de longueur pour ces flammes.

On peut résumer les classifications pour la combustion turbulente non-prémélangée disponibles dans la littérature en deux groupes : celles qui utilisent les paramètres (Reynolds,

Darrkôhler), (Libby et Williams 1994) et celles travaillant avec le couple (Fluctuations, fraction de mélange, Damköhler), (Bray et Peters, 1994). Nous proposons ici une classification (Reynolds, Damköhler).

Lorsque la turbulence devient assez forte, deux phénomènes peuvent se produire :

- ✚ D'une part la turbulence peut étirer la flammelette de telle façon que celle-ci s'éteigne localement, à l'endroit où elle est suffisamment étirée. D'où on rencontre plusieurs flammelette séparée par la zone de d'extinction et celle-ci apparaît lorsque  $\tau_c / \tau_k > 1$ .
- ✚ D'autre part, une turbulence forte va provoquer aussi des interactions entre deux portions de flammelette. Les grandes échelles spatiales de la turbulence feront interagir deux portions assez éloignées et cela formera des boucles de flammelette, , visualisation de la même flamme. [25]

## II.5. Modèles de combustion turbulente

Il s'agit maintenant de trouver des modèles pour exprimer les taux de réaction moyens en fonction des variables connues, c'est-à-dire des valeurs moyennes elles-mêmes, et probablement aussi en fonction des caractéristiques de la turbulence, puisque celle-ci doit jouer un rôle. Pour la modélisation des écoulements réactifs, "Fluent" [26] propose quatre modèles :

- ✚ Le modèle du taux de réaction généralisé (generalized finite-rate model) ;
- ✚ Le modèle PDF (conserved scalar PDF model) ;
- ✚ Le modèle des flammelettes (Laminar flamelet model) ;
- ✚ Le modèle de combustion prémélangée. (Zimont model) ;

Le modèle du taux de réaction généralisé est basé sur la solution de l'équation de transport des fractions massiques des espèces. Les termes sources qui apparaissent dans les équations de transport des espèces sont calculés d'après l'expression du taux d'Arrhenius pour les combustions non prémélangés, prémélangée et partiellement prémélangée. Les mécanismes des réactions chimiques seront prédéfinis par l'utilisateur. Ce modèle étant appliqué uniquement lorsque  $Da > 1$ .

Le modèle de combustion prémélangée a été développé spécifiquement pour les systèmes de combustion qui sont du type purement prémélangée. On citera le modèle dit « Eddy Break » Launder et Spalding [27]. Ce modèle est dû aux travaux de Spalding [28]. Ils

supposent que les réactions chimiques sont infiniment rapides dès que très peu de gaz brûlé vient au contact des gaz frais et que le milieu est adiabatique. Dans ces conditions, on peut définir un "degré d'avancement de la réaction", qui ne peut prendre que les valeurs 0 (dans les gaz frais) et 1 (dans les gaz parfaitement brûlés, donc à l'équilibre chimique).

Pour la combustion non prémélangée, on cite le modèle de Magnussen et Hjertager (1976) [29], pour lequel le taux de réaction est contrôlé par le temps turbulent  $\tau_t$  et par les concentrations des espèces limitantes (réactifs : carburant, oxydant et gaz brûlés, nécessaires pour enflammer le mélange des gaz frais), pour plus de détails voir chapitre suivant.

## II.6.Présentation du modèle de la combustion PDF

La complexité des phénomènes physiques intervenant et interagissant dans un écoulement réactif turbulent, nous empêche de résoudre directement les équations locales représentant l'évolution des grandeurs mécaniques et thermodynamiques caractéristiques de ces écoulements. Dans un premier temps, ces équations sont simplifiées en faisant jouer un certain nombre d'hypothèses portant sur la représentation des mécanismes chimiques et sur les propriétés de l'écoulement [30] [31]:

- ✚ La cinétique chimique peut être représentée par une réaction globale. Cette hypothèse est très éloignée de la réalité mais nous permet de ne prendre en compte qu'un nombre limité d'espèces chimiques.
- ✚ Les espèces et la chaleur diffusent de la même manière au niveau moléculaire.
- ✚ Les parois des systèmes sont considérées imperméables aux espèces.

L'ensemble de ces hypothèses permet de n'utiliser que deux variables pour connaître la température et les concentrations de toutes les espèces du mélange. La résolution des équations de la mécanique des fluides (quantité de mouvement et conservation de la masse), de la fraction de mélange et de la fraction massique de combustible suffit à caractériser les écoulements considérés, qu'il s'agisse de la combustion non-prémélangée ou de la combustion prémélangée [30-32].

Dans un deuxième temps, le phénomène turbulent nous conduit à utiliser une approche statistique pour prédire l'évolution moyenne de l'écoulement réactif. Les équations pour les quantités moyennes qui résultent de cette approche font apparaître des termes additifs qu'il faut modéliser [33].

