

Chapitre **I**

GENERALITES

Introduction

Dans ce chapitre nous allons parler sur la combustion, en passant par les types des flammes, et l'effet de la Turbulence sur la combustion.

Il convient donc de présenter un certain nombre de généralités pour comprendre les choix dans le dimensionnement et les différentes études réalisées.

I.1. Combustion

La combustion est une réaction chimique, globalement exothermique, au début lente mais pouvant devenir ensuite rapide et même violente, avec émission de rayonnement et élévation de température qui peut être traduite par un dégagement de chaleur. Elle se produit dans un système « ouverte » ou dans un système « fermé », autrement dit avec ou sans échange de matière et d'énergie entre le système et le milieu extérieur. Les réactions chimiques ne peuvent se produire que si des espèces chimiques, atomes, ions, radicaux, molécules, commencent par se rencontrer ou du moins se trouvent assez près pour se modifier mutuellement.

La réaction de combustion est globalement une réaction d'oxydoréduction où l'oxydant est appelé comburant (oxygène pur ou dilué ozone, chlore, nitrates, etc.) et le réducteur est appelé combustible (H_2 , CO, hydrocarbure, etc.) se déroulant suivant un mécanisme complexe, comprenant un grand nombre de réactions dites « élémentaire », les unes contre les autres libérant de la chaleur, le dégagement de chaleur prenant le pas sur la consommation. Si cette réaction oxydait de façon maximale le combustible, on pourrait écrire, globalement :



Plus précisément, cette réaction :

- Induit un fort dégagement de chaleur qui a lieu dans une zone très mince (les flammes les plus courantes ont des épaisseurs $L \delta$ typiques de l'ordre de 0.1 à 1mm) conduisant à des gradients thermiques très élevés (le rapport des températures entre gaz brûlés et gaz frais et celui des masses volumiques sont de l'ordre de 5 à 7).
- Correspond à un taux de réaction fortement non linéaire.

Différents mécanismes de couplage interviennent en combustion. Les schémas cinétiques de la réaction chimique doivent être décrits pour déterminer le taux de consommation du combustible, la formation de produits de combustion et d'espèces polluantes et prédire l'allumage, la stabilisation et l'extinction des flammes. Les transferts de masse, par diffusion moléculaire ou transport convectif, des différentes espèces chimiques sont aussi des éléments importants des processus de combustion. Le dégagement d'énergie due à la réaction chimique induit des transferts thermiques intenses par conduction, convection et/ou rayonnement, tant au sein de l'écoulement qu'avec son environnement par exemple les parois du brûleur.

La principale difficulté de la combustion turbulente réside dans l'interaction entre l'écoulement turbulent et le dégagement de chaleur. Une large gamme d'échelles caractéristiques apparaît alors comme les échelles turbulentes spatiales intégrales (L_t , de Taylor Λ et de Kolmogorov L_k) et temporelle (τ_t) et les échelles de la réaction chimique spatiale (e.g. épaisseur de flamme δ_1) et temporelle (τ_c). Le régime des flammes turbulentes dépend fortement des rapports de ces échelles [1].

I.1.1. Nature et composition de l'air comburant

Le comburant est l'air atmosphérique dont la composition est la suivante :

Oxygène :	O ₂	Dioxyde de carbone :	CO ₂
Azote :	N ₂	Gaz rares :	Néon, Krypton...

- Composition en volume ou en moles de l'air - Oxygènes : 20.95%

- Azote : 79.05%

I.1.2. Caractéristiques des combustibles

Hydrocarbures composent principalement de molécules de carbones (C) et de l'hydrogène (H) (des combinaisons multiples de carbone et l'hydrogène représenté par la formule générale C_nH_m) Le combustible peut-être :

- solide formant des braises (bois, carton, papier, PVC, tissus...) :
- liquide ou solide liquéfiable (essence, gazole, kérosène, polyéthylène, polystyrène, huile)
- gazeux comme le gaz naturel, gaz de ville, le gaz de raffinerie.
- Un métal (fer, aluminium, sodium, magnésium,...).

Dans notre cas le combustible est le propane.

Compléments sur les NOx (Oxydes d'azote)

L'azote de l'air reste globalement neutre dans la combustion. Une infime partie est oxydée. Ils ne sont pas pris en compte dans les équations de combustion classique, mais sont à l'origine des pluies acides par formation d'acide nitrique. C'est pourquoi des textes de loi limitant les rejets de NOx existent selon le combustible et la puissance.

I.1.3. Chambre de combustion

C'est le volume compris entre le dessus du piston lorsqu'il est au point mort haut et la culasse.

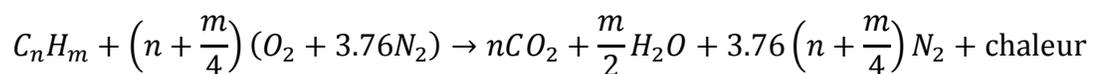
Une chambre de combustion est une enceinte capable de résister à de brusques changements de pression et de température, dans laquelle on déclenche volontairement une combustion entre des substances chimiques déterminées. Cette enceinte est conçue pour obtenir, à partir des gaz issus de la combustion, un travail ou une force, avant qu'ils ne soient évacués.

I.2. Caractéristiques et types de combustion [2].

I.2.1. La combustion stœchiométrique

C'est une combustion en présence d'air apportant exactement le volume d'oxygène nécessaire pour l'ensemble des réactions qui se produisent. Elle constitue en fait un cas idéal impossible à réaliser pratiquement.

La formule chimique d'une combustion stœchiométrique est :



I.2.2. La combustion réelle

Définition

La combustion stœchiométrique est la base des calculs théoriques en combustion. Les analyses réalisées ou les résultats fournis d'une combustion réelle, d'un combustible de composition connue, vont permettre de la définir précisément, par comparaison avec les résultats de la combustion neutre. Ainsi, par rapport à la théorie, on pourra définir :

- La combustion en excès d'air
- La combustion en défaut d'air

En pratique, c'est l'analyse des fumées sur site qui donnera les renseignements techniques nécessaires à la définition de la combustion réelle.

a) La combustion oxydante

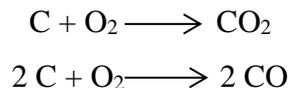
C'est une combustion complète en présence d'un volume d'air supérieur à celui de la combustion neutre (théorique).

Dans la plupart des applications industrielles, l'excès d'air est réalisé dans le but de s'assurer que tous les éléments combustibles rencontrent de l'oxygène avant d'être évacués du foyer de combustion.

b) La combustion par défaut d'air (incomplète)

La quantité d'air effectuée n'est pas suffisante pour brûler la totalité des constituants combustibles alors toutes les molécules de carbone ne sont pas oxydées, cela entraîne la formation d'autres produits comme le CO formé par manque d'oxygène, et C formé par manque total d'oxygène

Les réactions chimiques :



I.2.3. L'excès d'air

Rapport en pour cent du volume d'air en excès (c'est-à-dire du volume d'air introduit en supplément de celui qui est strictement nécessaire à la combustion neutre du combustible) au volume d'air neutre.

I.3. Différente forme de combustion

- ✓ Homogène : comburant et carburant sont prémélangés dans un rapport donné. Exemples : moteur à allumage commandé, chalumeau.
- ✓ Hétérogène : la combustion a lieu à la frontière entre comburant et carburant. Comburent et carburant peuvent être tous les deux ou l'un ou l'autre : solides, liquides ou gazeux.
- ✓ Stratifiée : comburant et carburant sont prémélangés dans un rapport variable compris entre une valeur permettant l'inflammation et le rapport caractérisant la présence de comburant pur. Exemple : moteur à charge stratifiée [2].

I.4. Classification des Flammes

Une flamme naît de la réunion de trois éléments : combustible-comburant-énergie d'activation. C'est le triangle du feu. Néanmoins, l'intensité de la flamme va être différente en fonction du mélange et du moment de ce mélange. On distingue ainsi plusieurs types de flamme.

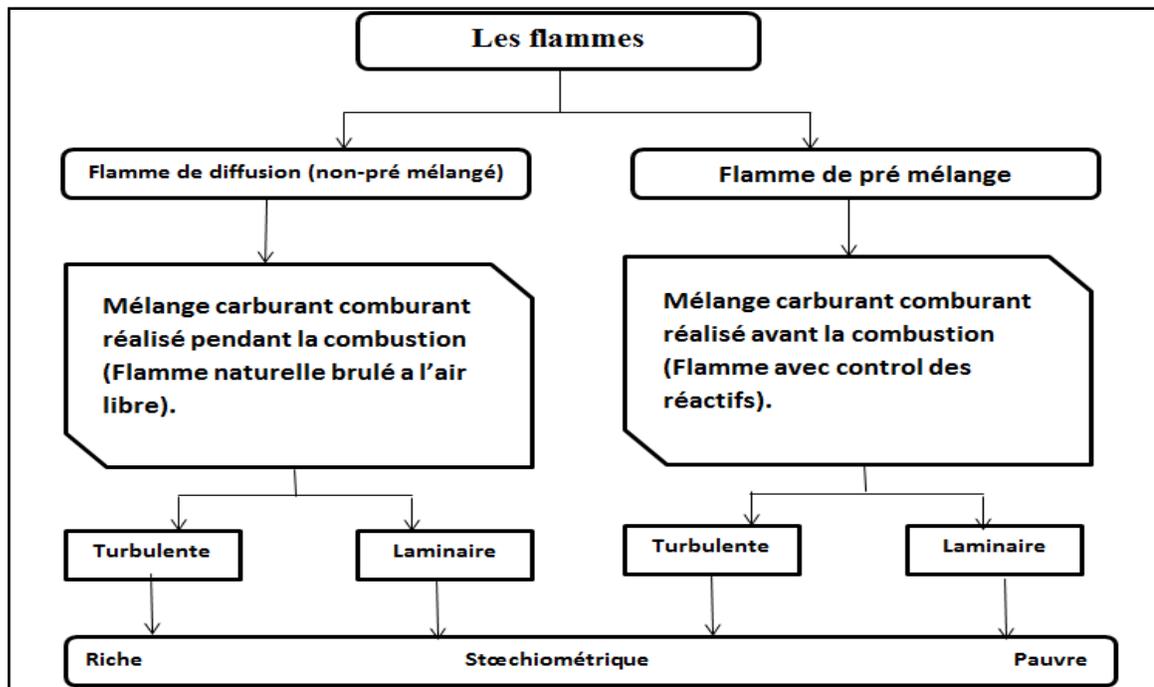


Figure (1.1) : Une classification des types de flammes en fonction de leur forme et de leur mélange réactionnel

I.4.1. Introduction à la structure de flammes laminaires [3].

On peut définir une flamme comme étant un milieu réactionnel gazeux où se produisent de concert des réactions de combustion exothermiques et des processus de diffusion de chaleur et des espèces radicalaires. On distingue généralement deux types de flammes selon la procédure utilisée pour introduire les réactifs : les flammes de prémélange et les flammes de diffusion. Dans cette étude nous nous concentrons uniquement sur les flammes dont l'écoulement est laminaire (nombre de Reynolds $\lesssim 2300$).

I.4.1.1. Structure d'une flamme de diffusion

Dans la flamme de diffusion, les réactifs, combustible et comburant, sont séparés. Ils sont situés de part et d'autre de la zone de réaction. Dans ce cas, la flamme est alimentée par la diffusion des réactifs. Il est alors possible de distinguer 3 zones : une zone stœchiométrique (2) où le mélange est le plus efficace, une zone riche en combustible (1) et une zone riche en comburant (3). Le schéma typique de la structure d'une flamme de diffusion est présenté sur la Figure I.2.

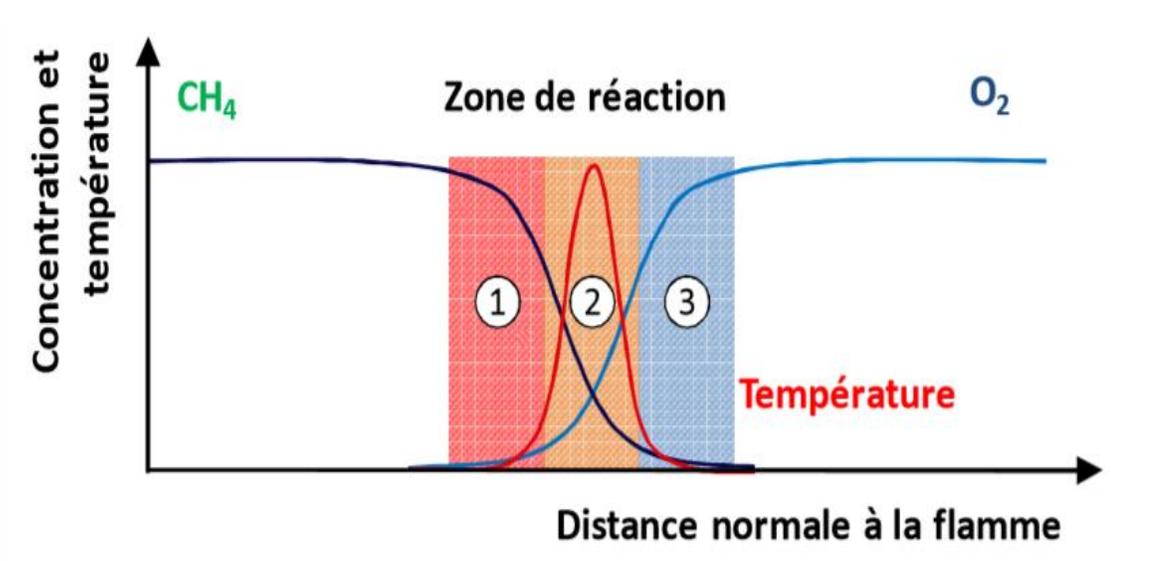


Figure (1.2) : Schéma de la structure d'une flamme laminaire de diffusion

I.4.1.2. Structure d'une flamme de prémélange

Dans une flamme de prémélange, le combustible et le comburant sont mélangés avant que la réaction n'ait lieu. La chaleur et les radicaux produits dans la zone de réaction diffusent vers la couche de gaz située en amont. L'augmentation de la température et la présence des radicaux entraînent l'inflammation de cette couche qui devient alors une source de chaleur et de radicaux capable d'initier une réaction dans la couche suivante, et ainsi de suite. Ainsi, la flamme se propage au travers du mélange gazeux. Dans le cas d'une flamme non étirée, la vitesse de propagation de la flamme est constante et caractéristique du mélange, elle est appelée « vitesse fondamentale de flamme ». Le schéma typique de la structure d'une flamme prémélangée est présenté sur la Figure I.3.

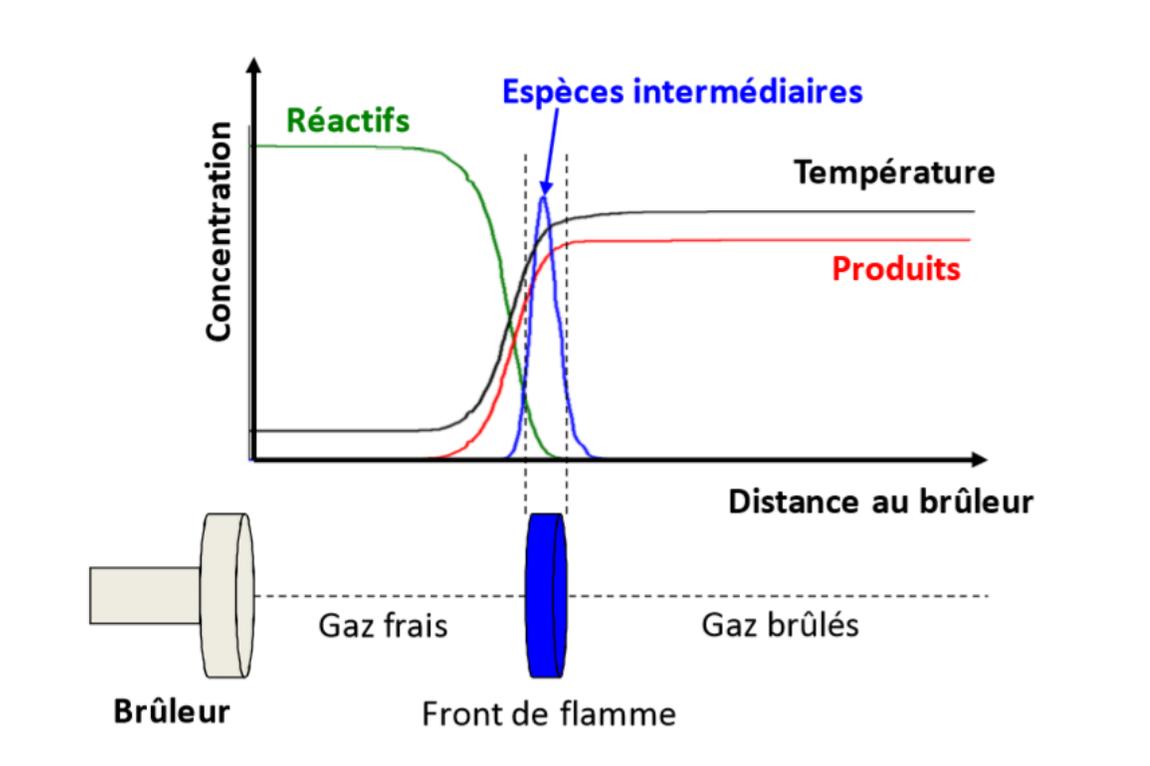


Figure (1.3) : Schéma de la structure d'une flamme laminaire prémélangée

Les flammes de prémélange laminaires. La structure d'une flamme de prémélange laminaire est présentée sur la figure I.4, l'épaisseur de la flamme δ_L , se décompose en deux couches de faibles épaisseurs. D'abord, l'épaisseur de préchauffage, δ_P , où dominent les phénomènes de

diffusion, de convection de masse et de chaleur. Les réactions chimiques dépendent essentiellement du combustible utilisé. Pour des molécules stables (CH_4 par exemple), on observe ni décomposition ni pyrolyse ce qui n'est pas le cas pour les autres hydrocarbures saturés plus lourds. Vient ensuite l'épaisseur de réaction δ_R dans laquelle ont lieu les réactions chimiques globalement exothermiques. Dans l'épaisseur de la flamme δ_L ($\delta_L = \delta_P + \delta_R$), la température passe de la température des gaz frais T_U à la température de gaz brûlés T_B . Le rapport de ces deux températures est généralement compris entre 5 et 7 [4].

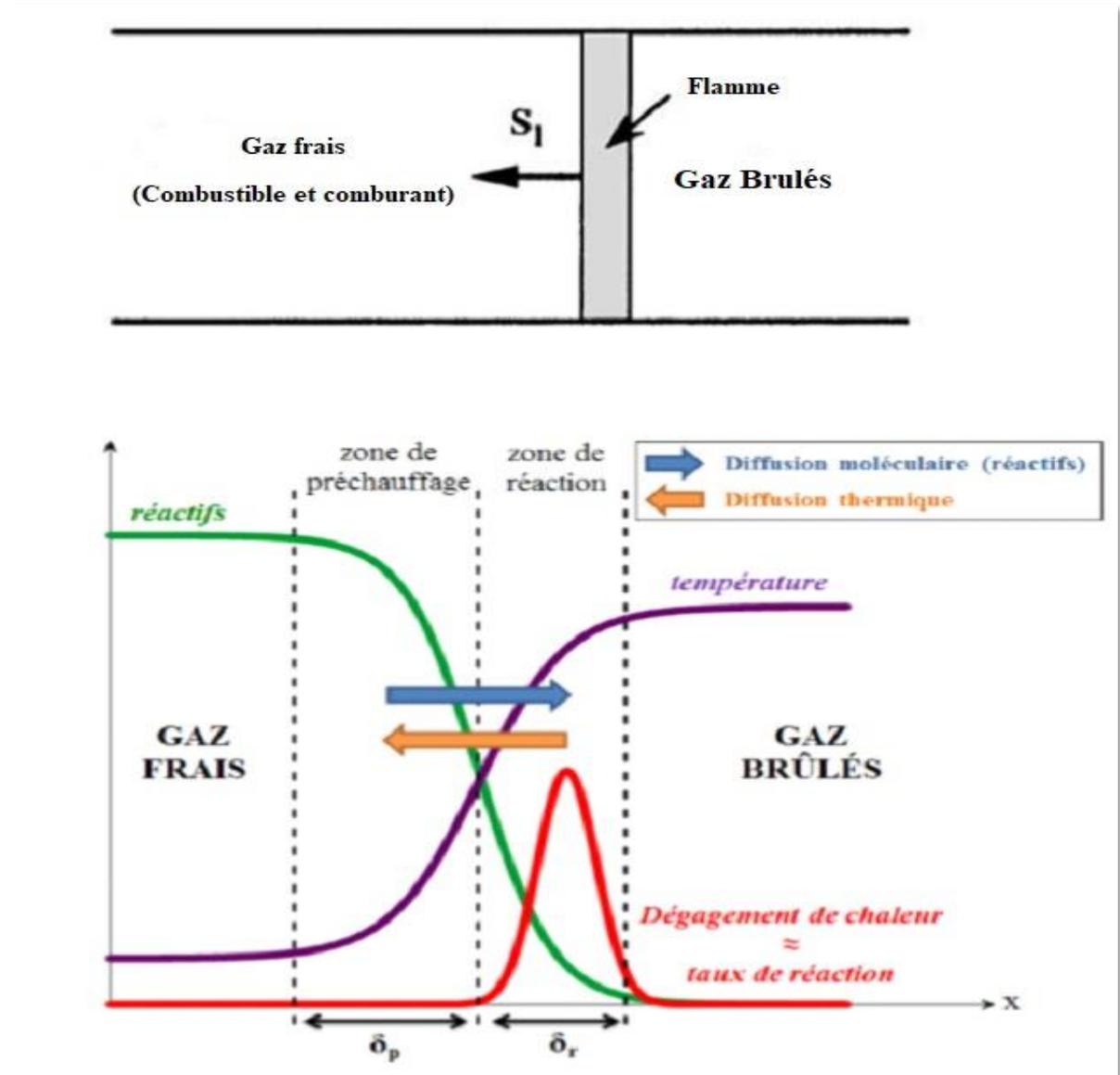


Figure (1.4) : Structure d'une flamme de prémélange laminaire [1].

1.5. Turbulence

Dans les années 1880, Mallard et Le Chatelier ont montré que la turbulence affecte la vitesse de combustion. En effet, nous avons vu que pour des flammes laminaires, les réactions chimiques se produisent uniquement dans une zone très mince et que les processus de diffusions des espèces radicalaires étaient primordiaux. L'importance de ces transferts diffusifs fait alors bien comprendre que la turbulence, qui est capable de les accélérer dans de grandes proportions, joue un rôle majeur. Les fortes fluctuations dans le champ de vitesse vont venir perturber le front de flamme pour créer des plissements et ainsi accroître la surface du front de flamme.

I.5.1. L'effet de la turbulence

Dans les chambres de combustion, un autre phénomène physique intervient : la turbulence. L'interaction entre la flamme et la turbulence est complexe et conduit à différents modes de combustion.

Il convient donc, dans un premier temps, d'étudier les paramètres décrivant la turbulence pour enfin étudier son impact sur la structure d'une flamme prémélangée.

La turbulence. Selon la théorie de Kolmogorov, la turbulence peut être décrite comme une succession de tourbillons de taille de plus en plus petite. Les tourbillons de grandes échelles transmettent leur énergie sans perte, aux tourbillons d'échelles inférieures. L'énergie, sous l'effet de la viscosité, se dissipe finalement aux plus petites échelles, dites échelles de Kolmogorov.

L'intensité de la turbulence peut être caractérisée par les fluctuations de vitesse à grandes échelles u' et l'énergie cinétique turbulente par unité de masse k :

$$u' = \left(\frac{2k}{3}\right)^{1/2} \quad 1.2.$$

$$k = \frac{\langle u'_i u'_i \rangle}{2} \quad 1.3.$$

avec $\langle . \rangle$ l'opérateur de moyenne, et u_i la $i^{\text{ème}}$ composante de la vitesse.

Le taux d'énergie dissipé par la turbulence ϵ est donné par

$$\epsilon = \nu \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \quad 1.4.$$

avec ν la viscosité cinématique du fluide et x_j la $j^{\text{ème}}$ composante de la position. La longueur l_t et le temps τ_t caractéristiques des grands tourbillons valent alors :

$$l_t = \frac{u'^3}{\epsilon} \quad 1.5.$$

et

$$\tau_t = \frac{u'^3}{\epsilon} = \frac{l_t}{u'} \quad 1.6.$$

Le nombre de Reynolds turbulent caractéristique des grandes échelles de la turbulence est définie par

$$R_{et} = \frac{u' l_t}{\nu} \quad 1.7.$$

La turbulence est composée d'un spectre continu de taille de tourbillon et d'échelles de vitesse. Les échelles macroscopiques sont les plus grandes et les échelles de Kolmogorov, caractérisées par une vitesse u_k , une échelle de longueur l_k , et un temps caractéristique τ_k , sont les plus petites. En faisant l'hypothèse d'une taille de tourbillon de même ordre de grandeur que celle d'une couche de cisaillement visqueuse développant pendant un temps τ_k , d'une distribution isentropiques des tourbillons de Kolmogorov, et d'une dissipation totale de l'énergie aux plus petites échelles, on obtient :

$$u_k = (\epsilon \nu)^{1/4} \quad 1.8.$$

$$l_k = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4} \quad 1.9.$$

$$\tau_k = \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/2} \quad 1.10.$$

Le nombre de Reynolds associé aux plus petits tourbillons vaut 1 [4].

I.5.2. Combustion Turbulente

Dans les flammes Dans un foyer, l'écoulement est turbulent, c'est-à-dire que la vitesse des gaz, mesurée en un point, fluctue continuellement de façon apparemment aléatoire, même en régime parfaitement établi: cela est vrai aussi pour la température et toute autre caractéristique du milieu. Cette turbulence est due à une forte vitesse de l'écoulement entrant ; elle s'est développée dans le canal amont à cause des gradients de vitesse aux parois et à partir d'obstacles tels que les injecteurs [2].

I.5.3. Combustion Turbulente de Prémélangée

La combustion turbulente prémélangée se distingue d'une combustion laminaire par le fait qu'elle dépend non seulement des propriétés physico-chimiques du mélange, mais aussi des propriétés de l'écoulement. Toutefois, même si la turbulence modifie de façon indéniable le comportement du front de flamme, il ne faut pas négliger les modifications de l'écoulement par l'expansion des gaz brûlés, par la propagation de la flamme, par les gradients de vitesse et par les variations des masses volumiques et des viscosités. Le rôle de la turbulence peut être mis en évidence par l'augmentation des vitesses de combustion, de la surface de la flamme et des échanges via l'augmentation de la diffusivité. Notons que de nombreuses études expérimentales ont été réalisées dans des situations stationnaires mais nous manquons actuellement de données dans le cas des régimes instationnaires. En effet, nous connaissons encore mal les évolutions des propriétés des flammes au cours de la propagation de flamme. Ce sont pourtant des données importantes pour la modélisation des écoulements réactifs [4].

I.5.4. Diagramme de la combustion turbulente prémélangée.

Le diagramme ci-dessous proposé par Barrère et Borghi permet de représenter les limites des différents régimes de combustion. Un diagramme équivalent est utilisé par Peters. Selon ces auteurs, les régimes de la combustion turbulente prémélangée peuvent être identifiés en fonction des rapports de la longueur $\frac{l_T}{\delta_L}$ et de la vitesse $\frac{u'}{S_L}$. Le rapport $\frac{l_T}{\delta_L}$ mesure la taille des tourbillons de la turbulence qui influent la flamme. En ordonnés le rapport $\frac{u'}{S_L}$ mesure l'intensité de turbulence de l'écoulement. La ligne $Re_T = 1$ sépare le régime des flammes laminaires

($Re_T < 1$) de celui des flammes turbulentes ($Re_T > 1$). Quatre régimes de la combustion prémélangée peuvent être identifiés. Selon la zone du diagramme dans laquelle on se trouve, les flammes turbulentes seront de différents types : les flammes “plissées”, les flammes “épaissies” et les flammes “plissées-épaissies”.

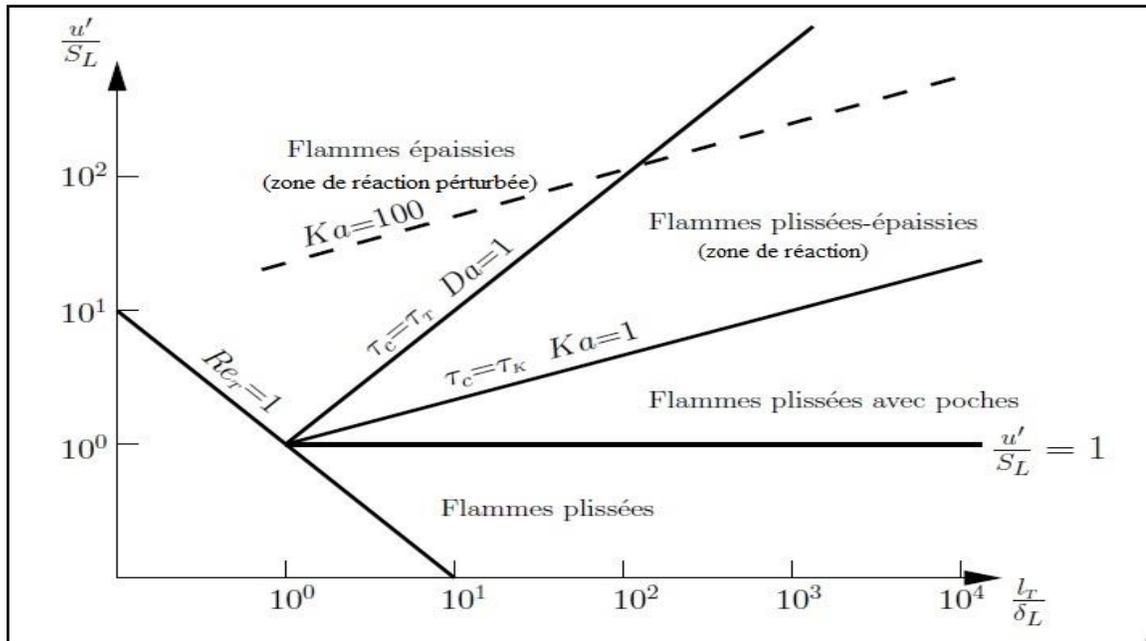


Figure (1.5) : Les différents types de flammes turbulentes de prémélangées (diagramme de Borghi)

- Le premier régime, dit régime des flammes lentes plissées, est limité par la condition $\frac{u'}{S_L} < 1$. Ici, la vitesse de la flamme laminaire S_L domine toujours la vitesse turbulente des fluctuations u' . Cela veut dire que les déformations du front de flamme dues aux tourbillons sont immédiatement anéanties par la propagation du front de flamme, seulement des petits plissements peuvent être observés. Ce régime est peu important dans les applications techniques où des niveaux de turbulence élevés sont nécessaires pour améliorer le procédé de combustion.

- Le second régime est dit régime des flammes ondulées, il est limité par $\frac{u'}{S_L} \geq 1$ et $Ka < 1$. La vitesse de rotation des tourbillons de grandes échelles est supérieure à la vitesse de la flamme laminaire, ondulant ainsi le front de flamme. La condition $Ka < 1$ implique que les petits tourbillons de taille η sont toujours plus grands que l'épaisseur de la flamme laminaire δ_L , ils ne peuvent pas pénétrer dans la structure de la flamme laminaire. L'interaction entre les tourbillons de toutes les tailles et la structure de la flamme laminaire est purement

cinétique. Les procédés chimiques et de transport dans la structure de la flamme sont inchangés.

- Le troisième régime, dit régime de la zone de réaction, il est limité par $Ka \geq 1$ et $Ka < 100$. La condition $Ka \geq 1$ signifie que les plus petits tourbillons de taille η sont petits par rapport à l'épaisseur de la flamme laminaire δ_L . Par conséquent, ils pénètrent dans la structure de la flamme laminaire. Cependant, la condition $Ka < 100$ implique que les plus petits tourbillons sont toujours plus grands que l'épaisseur de la couche interne δ_L , ils ne peuvent pas y pénétrer. Les tourbillons qui pénètrent dans la zone de préchauffage améliorant le transport des espèces chimiques et de chaleur. Ils ne peuvent pas accéder à la couche interne où les réactions chimiques qui maintiennent la flamme restent essentiellement in affectées par la turbulence. Les plus petits tourbillons peuvent accéder à la zone d'oxydation où l'influence de la turbulence est limitée car la température et la viscosité sont significativement supérieures à celles des gaz frais. La dissipation des plus petits tourbillons est fortement améliorée.

- Le quatrième régime est celui de la zone de *réaction perturbée*, il est limité par $Ka > 100$. Les plus petits tourbillons pénètrent dans la couche interne, provoquant des ruptures locales des réactions chimiques dues à la perte de chaleur en direction de la zone de préchauffage et induisant une diminution de la température et une perte de radicaux. Dans ce cas, la structure de la flamme prémélangée ne peut pas être préservée et des extinctions locales se produisent [5].

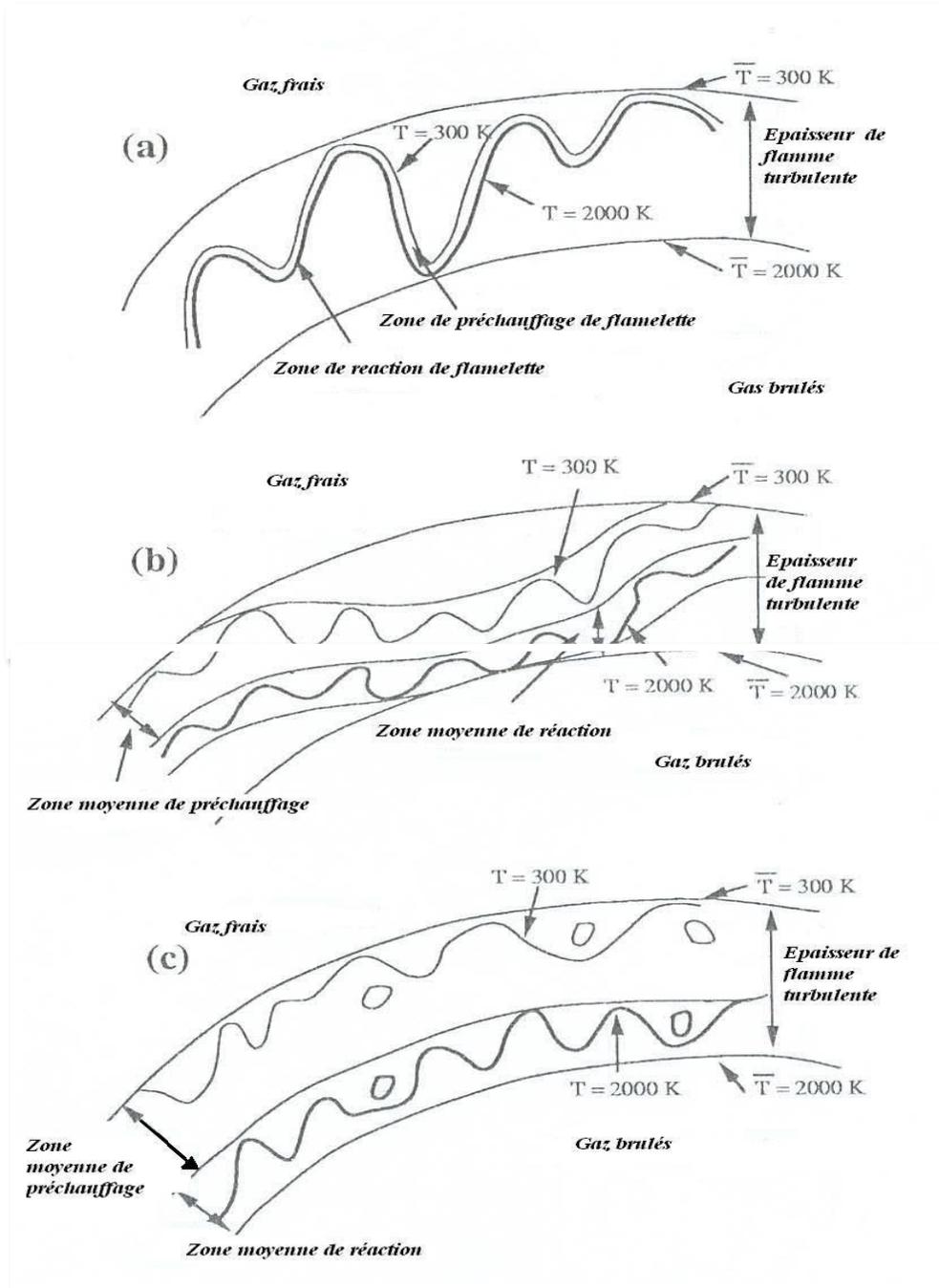


Figure (1.6) : Régimes de combustion turbulente prémélangée identifiés par Borghi et Destriau (1995)

(a) flamme mince plissée (flammelette), (b) flamme plissée-épaissie, (c) flamme épaissie.