

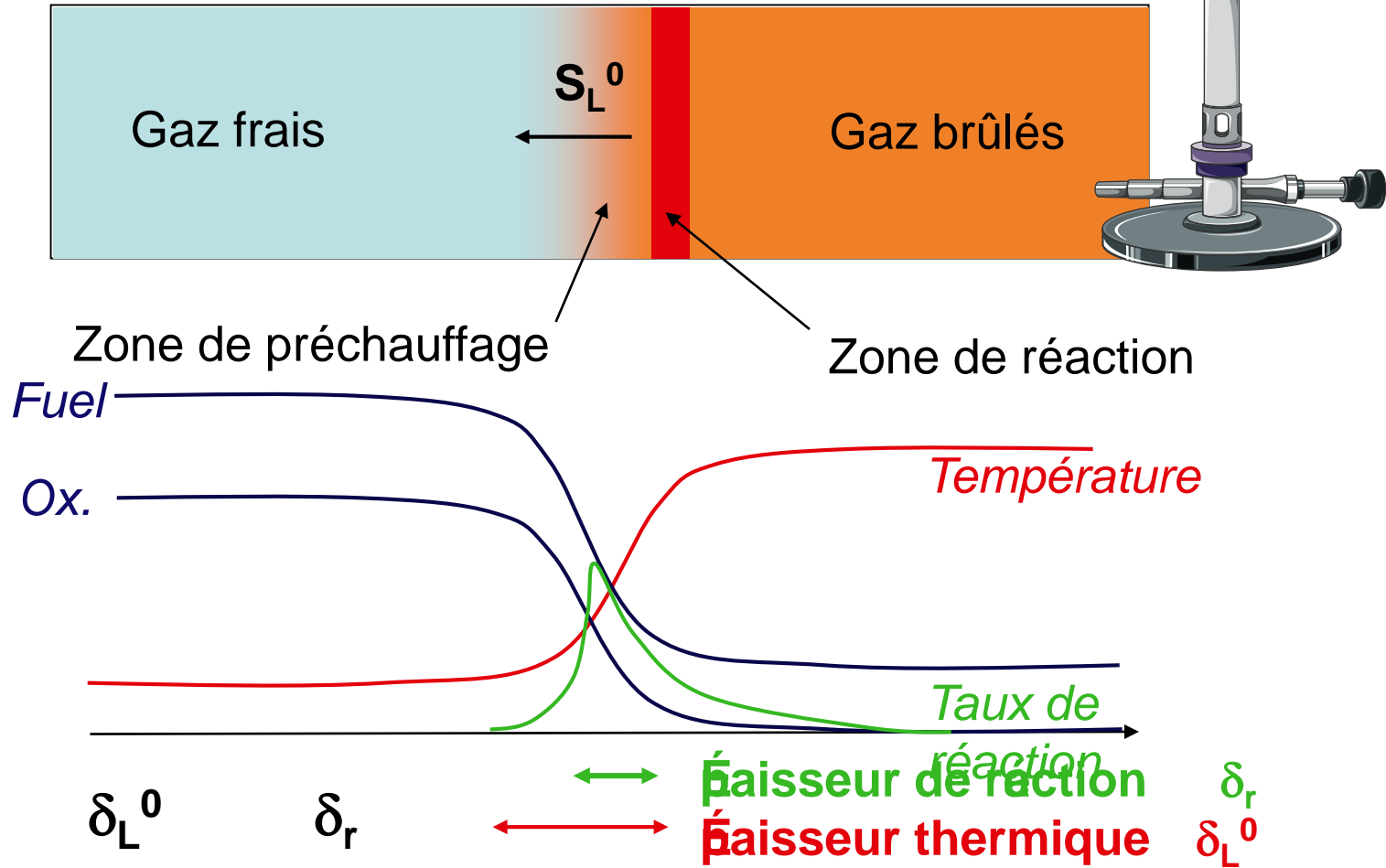
Quelques notions sur la combustion turbulente

A. Coppalle

Laboratoire CORIA

*Source: cours de B. Cuenot au CERFACS
Introduction à la modélisation de la combustion
turbulente*

Structure des flammes : Flamme préallongée



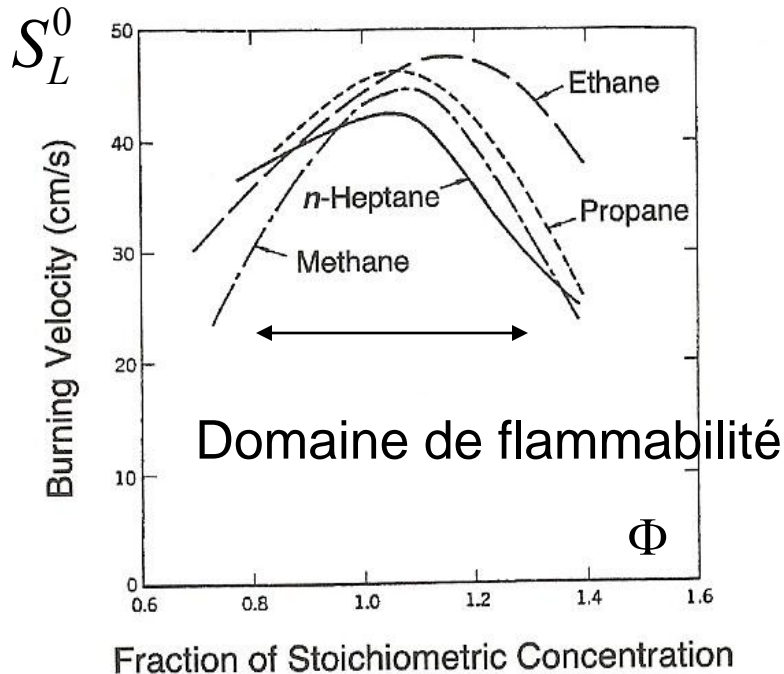
Structure des flammes : Flamme prémélangée

Structure stationnaire

$$\delta_L^0 \propto D / S_L^0$$

Richesse

$$\Phi = s \frac{Y_F}{Y_O} = \left(\frac{Y_F}{Y_O} \right) / \left(\frac{Y_F}{Y_O} \right)_{st}$$

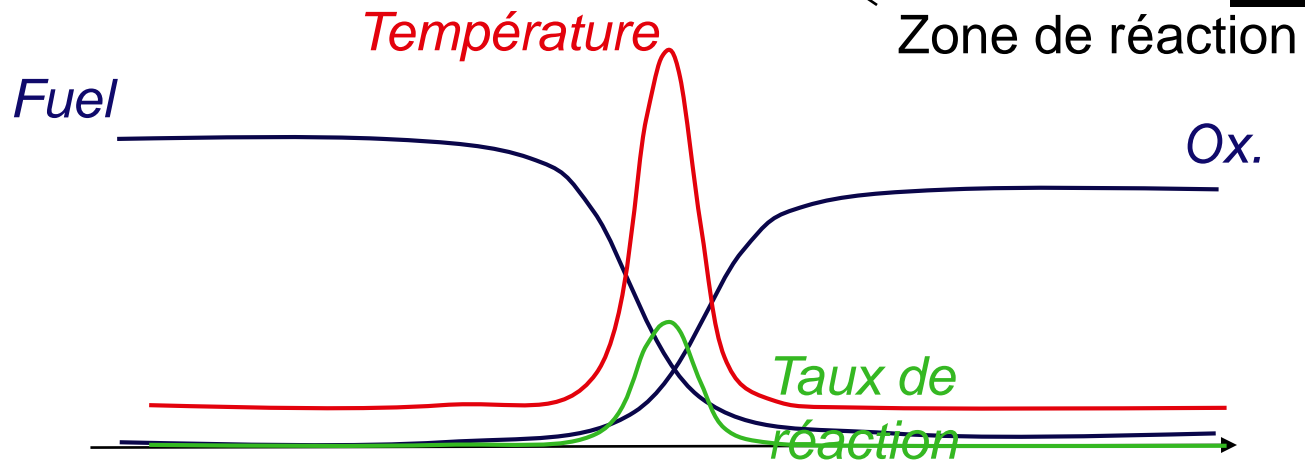
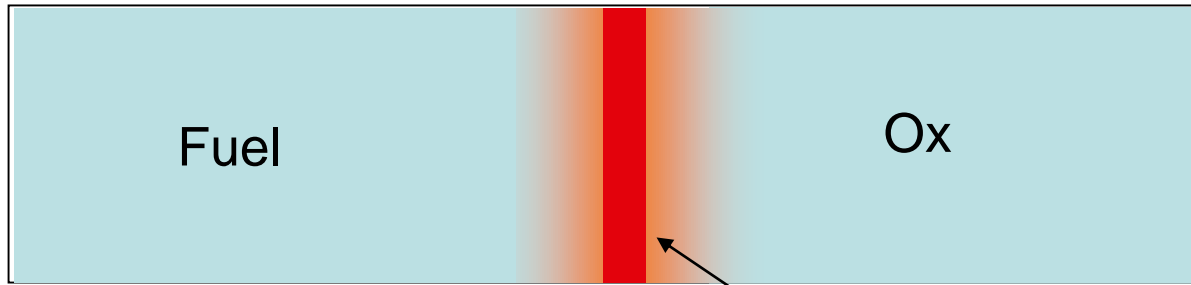


Variable de progrès

$$c = \frac{T - T_u}{T_b - T_u} \text{ ou } c = \frac{Y_F - Y_{Fu}}{Y_{Fb} - Y_{Fu}}$$

Figure 4.8 Typical burning velocities (taken from Zabetakis [5])

Structure des flammes : Flamme de diffusion

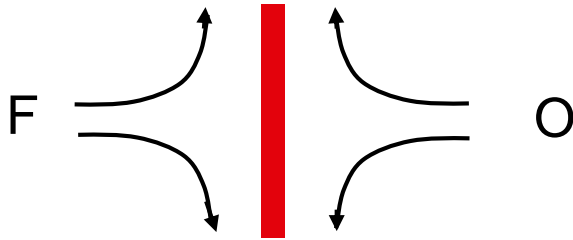


- Pas de propagation de la flamme
- Pas d'épaisseur caractéristique

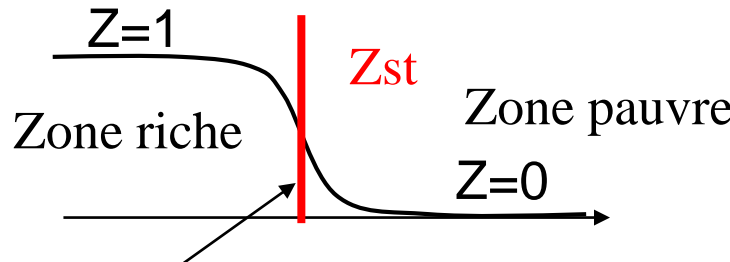
➔ Très forte dépendance à l'écoulement

Structure des flammes **Flamme de diffusion**

Flamme à contre-courant



Z : fraction de mélange
Un scalaire passif



La fraction de mélange Z ne subit pas de réactions chimiques.

Sa variation est due uniquement au mélange

point stoechiométrique

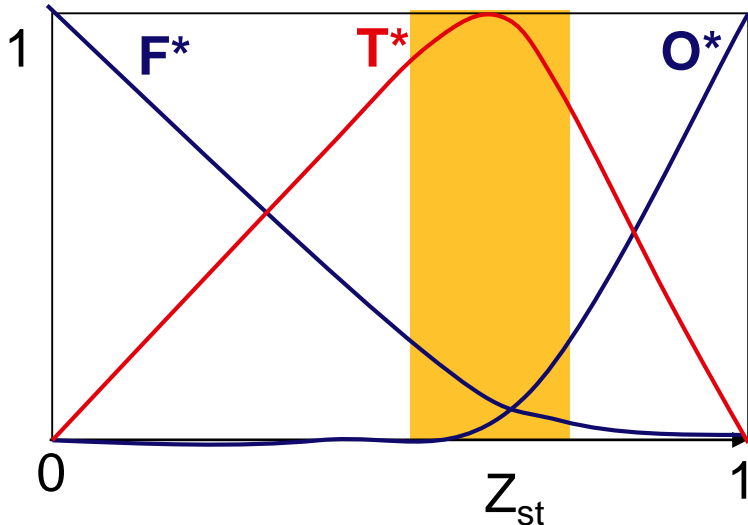
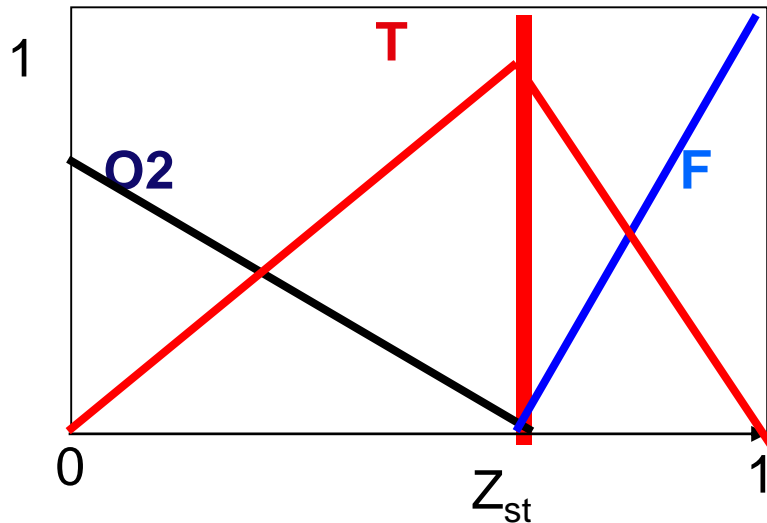
$Y_{F,sto} = Y_{O,sto} = 0$ Pas de réactif, pas de comburant

$$Z = \frac{s Y_F - Y_O + Y_O^0}{s Y_F^0 + Y_O^0}$$

$$Z = Z_{st} = \frac{1}{\frac{s Y_F^0}{Y_O^0} + 1} \quad \Phi = \frac{s Y_F^0}{Y_O^0} \text{ richesse}$$

Z , la fraction de mélange, le scalaire passif (ou conservé) est utile pour calculer la concentration des gaz dans la flamme et les fumées

Structure des flammes : Flamme de diffusion



➤ Z : fraction de mélange
Un scalaire passif (ou conservée)
est utile pour calculer la concentration
des gaz dans la flamme et les fumées

➤ Hyp: Chimie infiniment rapide
 O_2 et Fuel n'existent pas ensemble
 Y_{O_2} et Y_{fuel} fonctions de Z
Pas de perte par rayonnement
 T fonction de Z

➤ Hyp: Chimie non infiniment
rapide mais à l'équilibre:
épaisseur de réaction non
nulle, T^* , F^* et O^* fonctions
non linéaires de Z dans la
zone de réaction

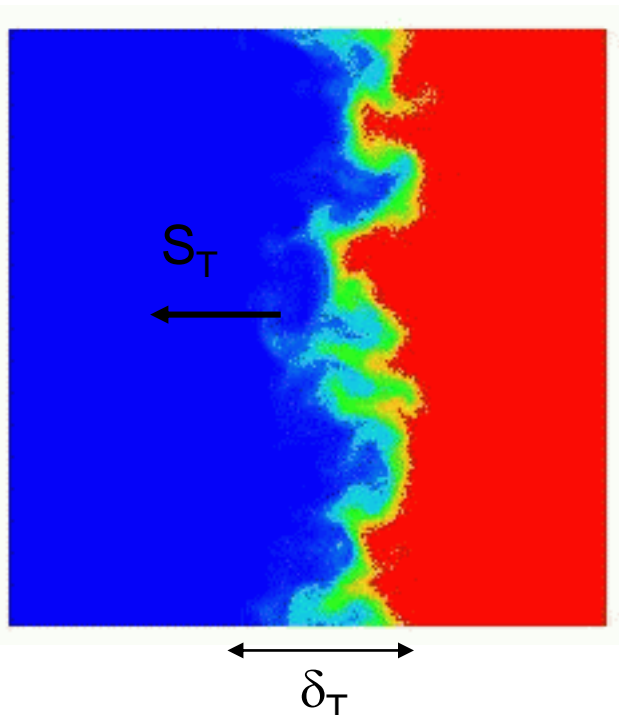
Flamme et turbulence : Flamme de pré-mélange turbulente

La turbulence plisse la flamme (étirement, courbure)

Video-Laminar and Turbulent Flame Propagation into Fuel Reservoir Pas la fin avec 300f/s

→ Augmentation de la surface de flamme

→ Augmentation de la vitesse de consommation



$$S_T / S_L^0 \approx 1 + \alpha (u' / S_L^0)^n$$

$$S_T / S_L^0 \approx A_T / A_L$$

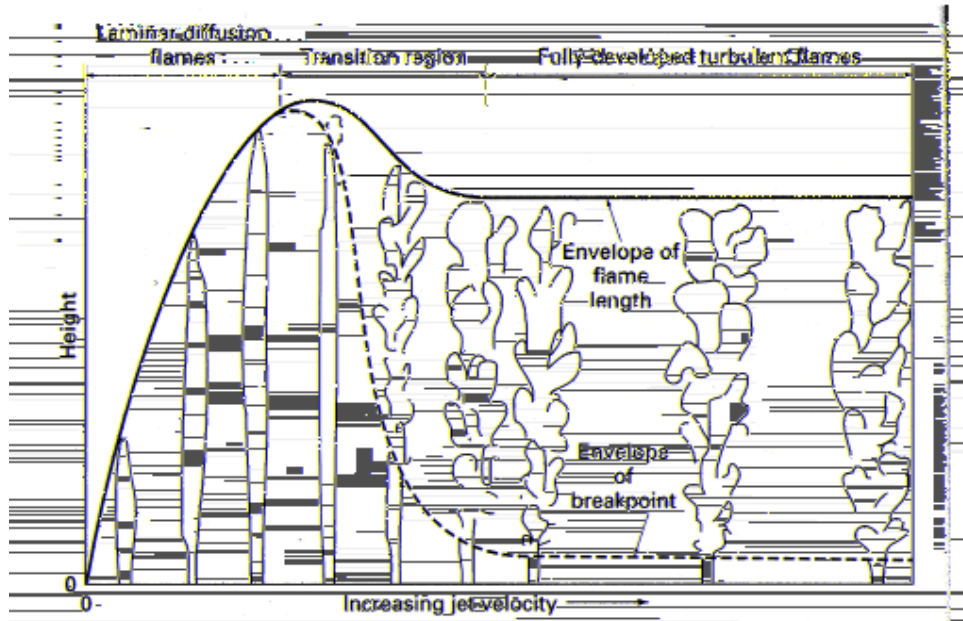
$$\delta_T \approx l_t$$

La structure interne du front de flamme est peu modifiée

Flamme et turbulence **Flamme de diffusion turbulente**

La turbulence plisse la flamme (étirement, courbure)

Video-Flame propagation into cloud of solid vs gas



Diffusion Flame Regimes.

Hotel et Hawthorne, 1949

La structure interne du front de flamme est sensiblement modifiée



Moyenne (Favre)

On obtient ainsi:

$$\frac{\partial \bar{\rho} Y}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j'' Y''}{\partial x_j} + \overline{\dot{\omega}_Y}$$



Les termes non fermés

Flux turbulents

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j'' Y''}{\partial x_j}$$

Taux de réaction

$$\overline{\dot{\omega}_Y}$$

Modèles de combustion turbulente

Régimes de combustion turbulente

On définit 2 nombres sans dimension

Damköhler

τ_t / τ_c temps turbulent (grande échelle) / temps chimique

$Da \gg 1$: chimie très rapide, régime de flamme mince
peu d'impact de la turbulence sur la structure interne
de la flamme

$Da \ll 1$: chimie lente, régime de flamme épaisse/distribuée
la turbulence « défait » la structure de la flamme

Karlovitz

τ_c / τ_k temps chimique / temps turbulent (petite échelle)

$Ka < 1$: même les plus petites structures ne peuvent pas
altérer la structure de la flamme: régime de
« flammelette »

chimie infiniment rapide

Pdf présumée

En chimie infiniment rapide, toutes les variables ne dépendent que de Z

$$\tilde{\varphi} = \int_0^1 \varphi(Z) \tilde{P}(Z) dZ \quad \varphi = Y_F, Y_O, T, \dots$$

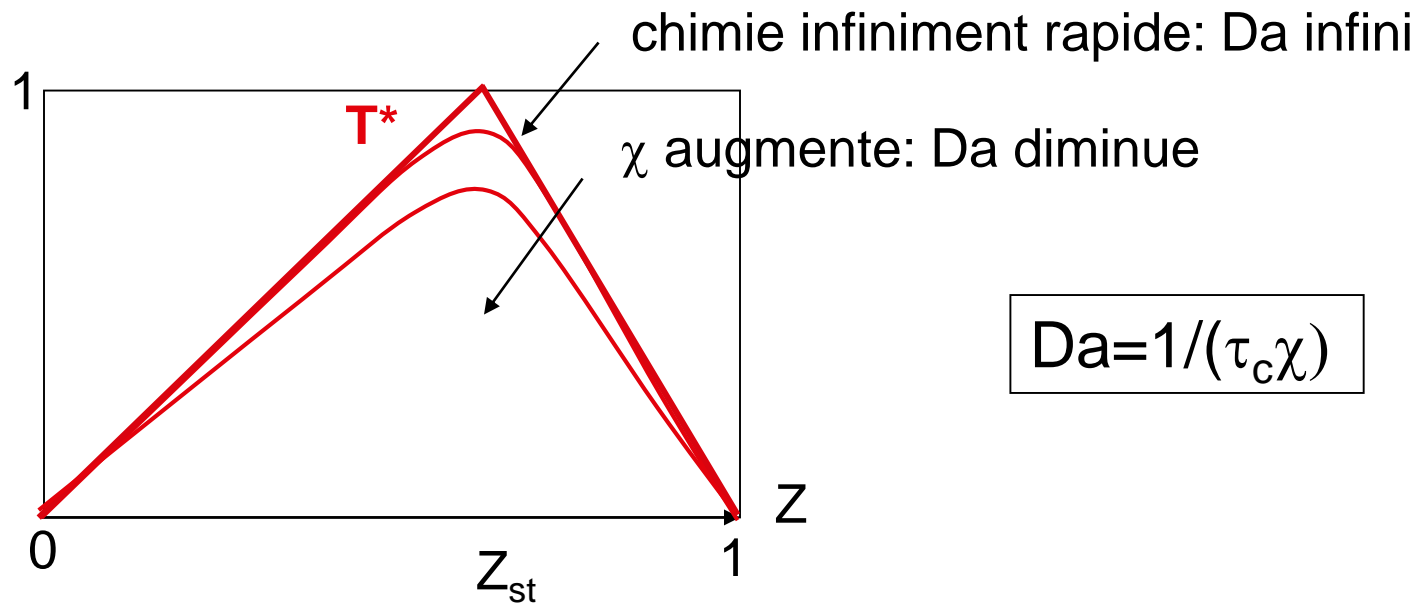
La forme de la Pdf peut être présumée à partir de

$$\tilde{Z} \quad \text{et} \quad \tilde{Z}''^2$$

chimie non infiniment rapide

Modèle de flammelette : structure locale de flamme laminaire

$$\tilde{\varphi} = \iint \varphi(Z, \chi) \tilde{P}(Z, \chi) dZ d\chi \quad \varphi = Y_F, Y_O, T, \dots$$



→ Il faut connaître $\tilde{P}(Z, \chi)$

Hypothèse courante : Z et χ sont décorrés

$$\tilde{P}(Z, \chi) = \tilde{P}(Z)\tilde{P}(\chi)$$

$\tilde{P}(Z)$ Fonction Beta

$\tilde{P}(\chi)$ Loi log-normale

→ Il faut estimer $\tilde{\chi}$ et $\tilde{\chi}''^2$

Modele de flammelettes

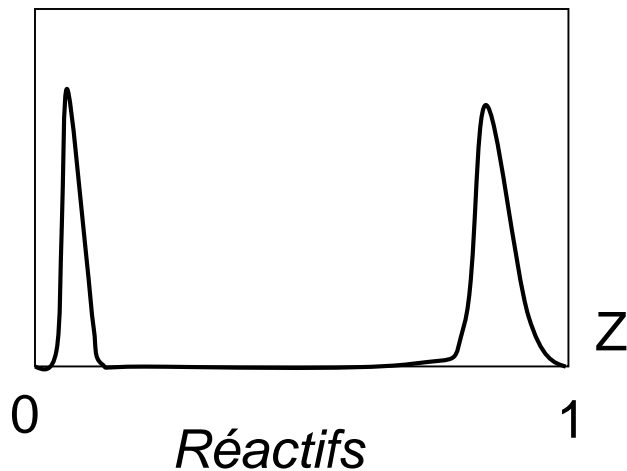
Pdf présumée, on utilise souvent la fonction *Beta*:

$$\tilde{P}(Z^*; x, t) = \frac{Z^{*a-1} (1-Z^*)^{b-1}}{\int_0^1 Z^{a-1} (1-Z)^{b-1} dZ}$$

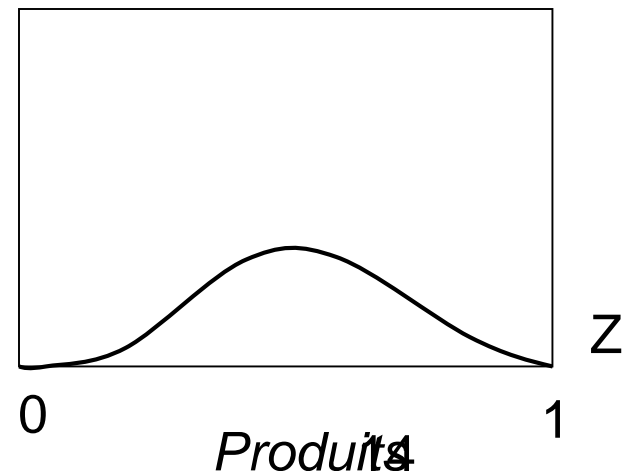
$$a = \tilde{Z} \left(\frac{\tilde{Z}(1-\tilde{Z})}{\tilde{Z}''^2} - 1 \right)$$

$$b = a \left(\frac{1}{\tilde{Z}} - 1 \right)$$

Bimodale : variance élevée



Monomodale : variance faible



Modele de flammelettes

Le mélange est décrit par \tilde{Z} et \tilde{Z}''^2

$$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{U} \cdot \nabla \tilde{Z} = \bar{\rho} \nu_t \nabla^2 \tilde{Z}$$

$$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{Z}''^2}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{U} \cdot \nabla \tilde{Z}''^2 = \bar{\rho} \nu_t \nabla^2 \tilde{Z}''^2 + \underbrace{2\bar{\rho} \nu_t |\nabla \tilde{Z}|^2}_{\text{Production}} - \underbrace{2\bar{\rho} \tilde{\chi}}_{\text{Dissipation}}$$

→ Equation bilan pour $\tilde{\chi}$

→ Condition d'équilibre (Production=Dissipation): modèle de Relaxation linéaire

$$\tilde{\chi} = \frac{\tilde{Z}''^2}{(k/\varepsilon)}$$

Autre modèle Eddy Dissipation Model

(FDS, fireFoam, ...)

Modèle à chimie infiniment rapide

Le taux de réaction est contrôlé par l'espèce chimique en défaut

$$\overline{\rho \dot{\chi}_F} = \alpha \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\tilde{Y}_F, \frac{\tilde{Y}_O}{s}, \beta \frac{\tilde{Y}_P}{1+s} \right)$$

α , β constantes à ajuster. Pour β non nul les produits représentent l'action des gaz brûlés chauds (allumage, stabilisation)