

Chapitre 03: *Flammes prémélangées*

Ce mode de combustion implique le mélange préalable du fuel et de l'oxydant, les flammes de prémélange sont présentes dans plusieurs applications par exemple le chauffage domestique et les chambres de turbines à gaz. Le combustible et l'oxydant sont mélangés avant d'être introduit dans la chambre, la combustion est initiée par une étincelle ou une flamme pilote, créant une flamme qui se propage dans les gaz frais. Il est important de comprendre les caractéristiques pour construire un tel bruleur. Quelques questions se posent :

- A quelle vitesse la flamme consomme le mélange frais ?
- Comment varie la propagation de la flamme avec les conditions d'opérations comme la richesse, température et la pression ?
- D'un point de vue protection, comment peut-on stopper la propagation d'une flamme prémélangée?

1) Procédés physiques dans une flamme prémélangée

Prenons par exemple une flamme qui se propage dans une conduite (figure 1), la zone de réaction ou front de flamme est très mince, toujours quelques millimètre pour les hydrocarbures dans les conditions ambiantes.

Dans la zone de préchauffage, la température des réactifs (gaz frais) augmente graduellement à une température élevée près de la zone de réaction. Lorsque la température des réactifs atteint celle d'ignition du fuel, les réactions chimiques deviennent rapides marquant le front de la zone de réaction (flamme).

- Dans la flamme, le taux de réaction augmente rapidement puis diminue lorsque le fuel et l'oxydant sont consommés et les produits sont générés.
- A cause de la concentration des espèces, les réactifs diffusent vers la zone de réactions et leurs concentrations dans la zone de préchauffage diminue lorsqu'ils s'approchant de la zone de réactions.

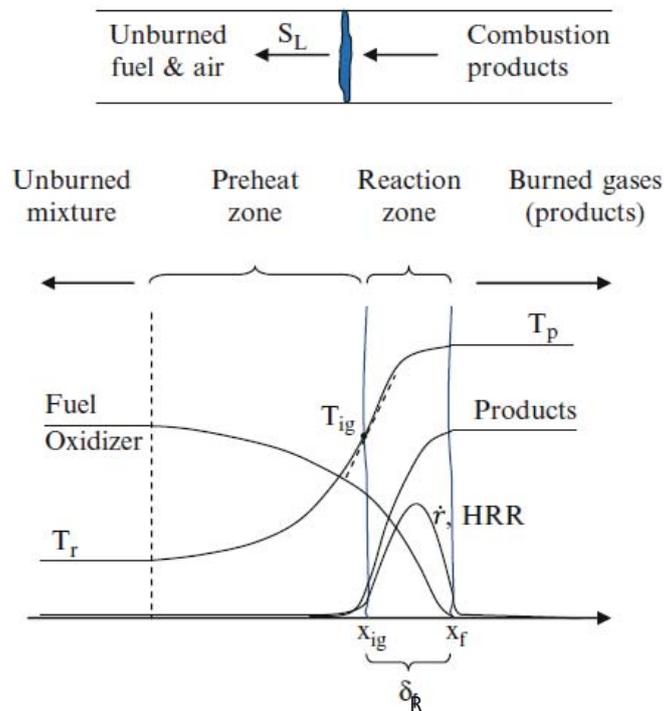


Figure 1 : Schéma d'une flamme de prémélange qui se propage dans une conduite de gauche à droite

Différentes espèces dans la zone de réaction deviennent moléculairement existées à hautes températures et émettent des radiations à différentes longueurs d'ondes qui donnent différentes couleurs.

- Pour les mélanges pauvres d'hydrocarbures et d'air, la couleur bleue est due au rayonnement du radical CH excité,
- Le rayonnement du CO_2 , vapeur d'eau, et les particules de suies produit une couleur orange.
- Pour les mélanges riches, une couleur verte des molécules de C_2 existées est observée.

La propagation de la flamme à travers le mélange frais dépend de deux procédés consécutifs.

1. La chaleur produite dans la zone de réaction et transférée pour chauffer le mélange frais à la température d'ignition.

2. Les réactifs chauffés réagissent chimiquement dans la zone de réaction.

Ces deux procédés sont importants dans le maintien de la flamme. La vitesse de propagation de la flamme va dépendre de ces deux procédés et des propriétés chimiques des réactifs.

2) Calcul de la vitesse et de l'épaisseur de la flamme :

Une simple analyse « thermique » (Mallard et Le Chatelier), peut être utilisée pour estimer la vitesse et l'épaisseur de la flamme et leurs dépendances des conditions opératoires. Considérons premièrement la zone de préchauffage, puisque la température est inférieure à celle de l'auto ignition, les réactions chimiques sont négligeables. Prenons un volume de contrôle autour de la zone de préchauffage jusqu'à la position où la température atteint celle de l'ignition (à droite de la zone de préchauffage dans la figure 1). L'équation d'énergie stationnaire s'écrit :

$$\rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

En intégrant du début de la zone de préchauffage à la zone où la température atteint celle de l'ignition T_{ig} :

$$\int_0^{X_{ig}} \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} dx = \int_0^{X_{ig}} \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \quad (3.2)$$

$$\rho_r C_p S_L (T_{ig} - T_r) = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{X_{ig}} \approx \lambda \frac{T_p - T_{ig}}{\delta_R} \quad (3.3)$$

Avec :

S_L la vitesse de propagation de la flamme dans le mélange frais ($u = S_L$),

T_{ig} est la température d'ignition,

T_r et ρ_r sont respectivement la température et la **densité** du mélange des réactifs,

C_p est la chaleur spécifique (supposée constante),

λ est la conductivité thermique (supposée constante),

T_p est la température des produits de combustion dans la zone brûlée.

Le gradient de température est approximé par $(T_p - T_{ig})/\delta_R$ où δ_R est l'épaisseur de la zone de réaction, où bien « épaisseur de la flamme ».

Considérons le bilan d'énergie sur tout le volume de contrôle incluant la zone de préchauffage et de réaction, l'intégration de l'équation d'énergie donne :

$$\int_0^{x_f} \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} dx = \int_0^{x_f} k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx + \int_0^{x_f} \bar{\Gamma}_{fuel} \bar{Q}_c dx \quad (3.4)$$

$$\rho_r C_p S_L (T_P - T_r) = \lambda \frac{T_P - T_P}{\delta} + \delta_R \bar{\Gamma}_{fuel,av} \bar{Q}_c \quad (3.5)$$

$$\underbrace{\rho_r C_p S_L (T_P - T_r)}_{\text{Energie convective}} = \underbrace{\delta_R \bar{\Gamma}_{fuel,av} \bar{Q}_c}_{\text{Energie de combustion}} \quad (3.6)$$

Avec :

$\bar{\Gamma}_{fuel,av}$ est la moyenne du taux de consommation du fuel sur toute la flamme,
 \bar{Q}_c est la chaleur dégagée par mole du fuel brûlé.

Ces deux équations (3.3) et (3.6) peuvent donner S_L et δ_R , leurs produit est :

$$\begin{aligned} \rho_r C_p S_L (T_{ig} - T_r) \rho_r C_p S_L (T_P - T_r) &= \bar{\Gamma}_{fuel,av} \bar{Q}_c \lambda (T_P - T_{ig}) \\ \rho_r C_p S_L &= \left\{ \frac{\lambda (T_P - T_{ig}) \bar{\Gamma}_{fuel,av} \bar{Q}_c}{(T_{ig} - T_r) (T_P - T_r)} \right\}^{1/2} \\ S_L &= \left\{ \frac{\lambda (T_P - T_{ig}) \bar{\Gamma}_{fuel,av} \bar{Q}_c}{\rho_r C_p (T_{ig} - T_r) \rho_r C_p (T_P - T_r)} \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (3.7)$$

La chaleur de combustion est approximativement reliée à la température de la flamme par :

$$\bar{Q}_c [Fuel]_r = \rho_r C_p (T_P - T_r) \quad (3.8)$$

Où $[Fuel]_r$ est la concentration du fuel (mole/cm³), dans les gaz frais $\bar{Q}_c \equiv [KJ/mole]$, la vitesse de la flamme devient :

$$S_L = \left\{ \frac{\lambda (T_P - T_{ig}) \bar{\Gamma}_{fuel,av} / [Fuel]_r}{\rho_r C_p (T_{ig} - T_r)} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{\alpha (T_P - T_{ig})}{\tau_{chem} (T_{ig} - T_r)} \right\}^{1/2} \quad (3.9)$$

Où $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ est la diffusivité thermique (cm²/s) et $\tau_{chem} = [Fuel]_r / \bar{\Gamma}_{fuel,av}$ est l'échelle de temps de la cinétique chimique.

En utilisant $\bar{Q}_c [Fuel]_r = \rho_r C_p (T_P - T_r)$, l'équation (3.6) devient :

$$S_L = \frac{\delta_R}{\tau_{chem}} \quad \text{or} \quad \delta_R = S_L \tau_{chem} \quad (3.10)$$

Cette équation montre que pour une vitesse de la flamme donnée, l'épaisseur est proportionnelle à l'échelle de temps de la cinétique chimique. Si la chimie est rapide, la flamme est mince (épaisseur très petite).

En substituant l'équation (3.9) dans (3.10) on trouve

$$\delta_R = S_L \tau_{chem} = \left\{ \frac{\alpha}{\tau_{chem}} \frac{(T_P - T_{ig})}{(T_{ig} - T_r)} \right\}^{1/2} \tau_{chem}$$

$$\delta_R = \left\{ \alpha \tau_{chem} \frac{(T_P - T_{ig})}{(T_{ig} - T_r)} \right\}^{1/2} \quad (3.11)$$

L'épaisseur de la flamme est généralement corrélée à la vitesse de la flamme à travers la diffusivité thermique. Cette corrélation est obtenue par la multiplication des équations (3.9) et (3.11), ce qui donne :

$$\delta_R \cdot S_L = \alpha \frac{(T_P - T_{ig})}{(T_{ig} - T_r)} \quad (3.12)$$

Le terme à droite de l'équation dépend de la thermodynamique du système de combustion. On peut estimer ce terme pour un fuel donné, par exemple la combustion du méthane air aux conditions ambiantes avec $T_r = 300k$, $T_P = 2250k$ et $T_{ig} \approx 810k$ on a $\delta_R \cdot S_L = 3.5\alpha$.

Le taux de consommation moyen du fuel $\bar{r}_{fuel,av}$ est fortement dépendant de la température, le choix de cette dernière pour l'évaluation du taux de consommation moyen a un grand impact sur les résultats. Cela veut dire que ces équations donnent seulement une estimation de S_L et δ_R .

Cependant, l'équation (3.9) est valable pour donner un aperçu sur la dépendance de la vitesse de la flamme de différents paramètres, incluant les propriétés de transport, la température, la pression et l'ordre du taux de réaction.

On utilisera l'épaisseur de la zone de réaction δ_R pour estimer l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la flamme.

Dans la majorité des combustibles (hydrocarbures), la vitesse de la flamme pour un mélange stœchiométrique à l'état de référence est de 40 cm/s . Cependant, la vitesse de la flamme de l'hydrogène est 220 cm/s , cinq fois plus rapide.

Ces équations sont obtenues d'une analyse simple, des résultats plus précis peuvent être obtenus en résolvant par ordinateur les équations de transport pour les flammes 1D avec une chimie détaillée

3) Mesure de la vitesse de la flamme :

Les brûleurs du type Bunsen sont généralement utilisés pour déterminer la vitesse de la flamme laminaire. Le brûleur Bunsen est un tube métallique vertical à travers lequel un mélange air-fuel est introduit. La flamme forme une géométrie conique (voir figure 2) stationnaire relativement à l'observateur. L'angle du cône est déterminé par l'équilibre de vitesse locale du fluide avec la vitesse de propagation de la flamme. En utilisant les **réactions** géométriques, on peut déterminer la vitesse de la flamme $S_L = U_{jet} \sin(\alpha)$.

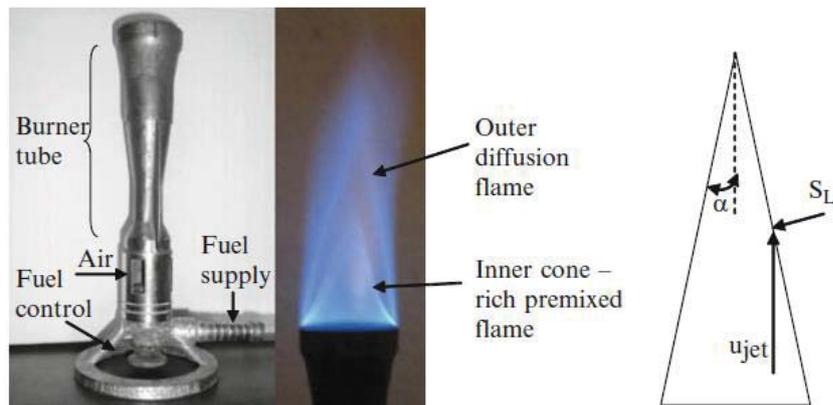


Figure 2 : Détermination de la vitesse de la flamme par le brûleur Bunsen

Plusieurs facteurs peuvent influencer cette technique

1. L'allure de la flamme à la limite peut ne pas être rectiligne à cause de la perte de chaleur à travers le brûleur.
2. Les effets de l'étirement sur la flamme qui ne sont pas uniformes.
3. La couche limite à l'intérieur du tube qui perturbe la forme du cône.
4. L'effet de la flottabilité.

Malgré les difficultés confrontées, la figure 3 montre une allure convergente des mesures au fil des années.

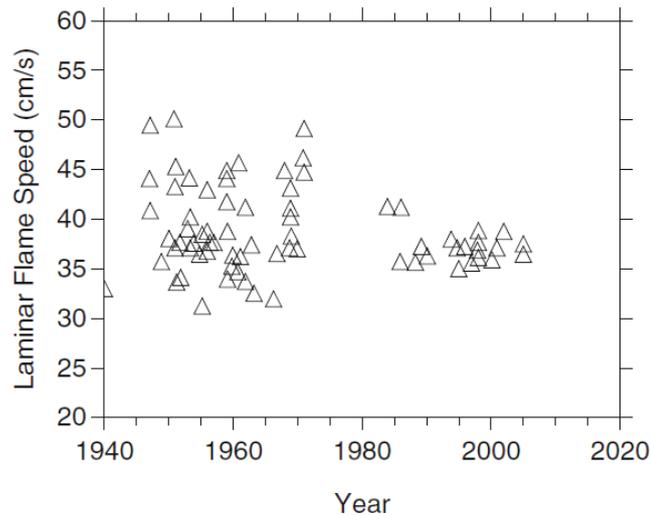


Figure 3 : Mesures de la vitesse de la flamme laminaire du méthane

4) Structure des flammes de prémélange :

A cause de l'épaisseur minimale (quelques millimètres à 1 atm) des flammes de prémélange, il est impossible de mesurer la concentration des espèces avec précision. La simulation des flammes de prémélange a été utilisée avec une chimie détaillée pour illustrer la structure typique de ces flammes. On remarque sur la figure 4 que :

- La densité décroît de 1.13 kg/m^3 dans les gaz frais à 0.17 kg/m^3 dans les gaz brûlés.
- La vitesse du fluide frais relativement à la flamme est 39 cm/s et celle des gaz brûlés est 270 cm/s .
- La température d'ignition est 810 K .
- L'épaisseur de la flamme peut être déterminée en fonction de l'augmentation de la température. On définit deux températures $T_{10\%}$ qui représente 10% de l'augmentation et $T_{90\%}$ qui représente 90% de l'élévation. Pour ce cas

$$T_{10\%} = T_r + 0.1(T_p - T_r) = 495 \text{ K} \quad \text{et} \quad T_{90\%} = T_r + 0.9(T_p - T_r) = 2055 \text{ K}$$

- En se basant sur ces deux points, l'épaisseur de la zone de réaction est 1.4 mm , l'échelle du temps chimique $\delta_R/S_L = \tau_{chem} = 3.6 \text{ msec}$.
- La température d'équilibre est 2250 K qui est atteinte à 5 cm de la base ce qui donne un temps nécessaire à l'équilibre de $5 \text{ cm}/270 \text{ cm/sec} = 0.019 \text{ sec} = 19 \text{ msec}$.
- On représente aussi les espèces majoritaires CH_4 , CO_2 et H_2O et l'espèce principale intermédiaire CO .
- La courbe de CO montre que l'épaisseur de la zone de réaction est 0.025 cm ,

- Le méthane a un taux net de réaction négatif car il est consommé,
- H_2O et CO_2 ont des taux net de réaction positifs car ils sont produits,
- Le CO a un taux positif entre 0.075 et 0.1 puis négatif dans la zone des gaz chauds après 0.1.
- Le radical méthyl CH_3 est premièrement produit de la décomposition de CH_4 dans la région 0.07 à 0.09 cm. La consommation de CH_3 commence lorsque la production des radicaux OH, H et O augmente à 0.09 cm.
- Puisque la majorité du CO est oxydé par la réaction $\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$ la position où ces radicaux commencent à augmenter est corrélée à celle où le CO commence à diminuer.
- Le radical H diffuse rapidement dans la zone de réaction du à sa grande diffusivité.
- Le NO a une petite valeur mais il reste nocif à l'environnement, sa production est fortement corrélée à celle de O et OH.

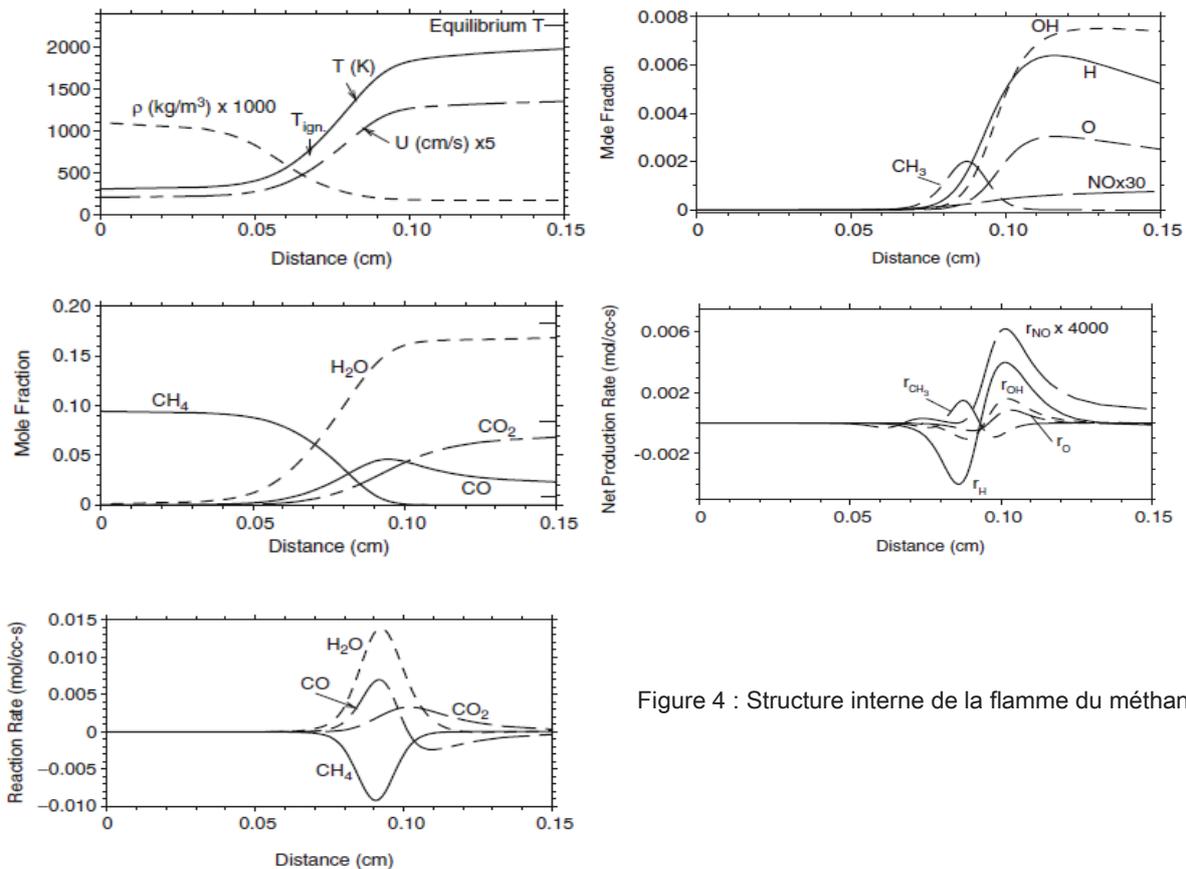


Figure 4 : Structure interne de la flamme du méthane

5) Effet de la richesse, température et pression sur la vitesse de la flamme :

5.1) Effet de la richesse

La vitesse de la flamme dépend du taux de la réaction chimique, on s'attend à une forte dépendance de S_L de la température et par conséquent de la richesse.

La figure 5 montre la température de la flamme pour plusieurs fuels en fonction de la richesse, on remarque que le pic de température est atteint pour une valeur légèrement riche. Cela est dû à la relation entre la chaleur de combustion et la capacité calorifique des produits. Ces deux propriétés décroissent lorsque la richesse dépasse l'unité mais la capacité calorifique décroît, entre $\phi = 1$ et le pic du mélange riche, de manière légèrement rapide par rapport à la chaleur de combustion. La vitesse de la flamme aura la même allure que la température figure 5.

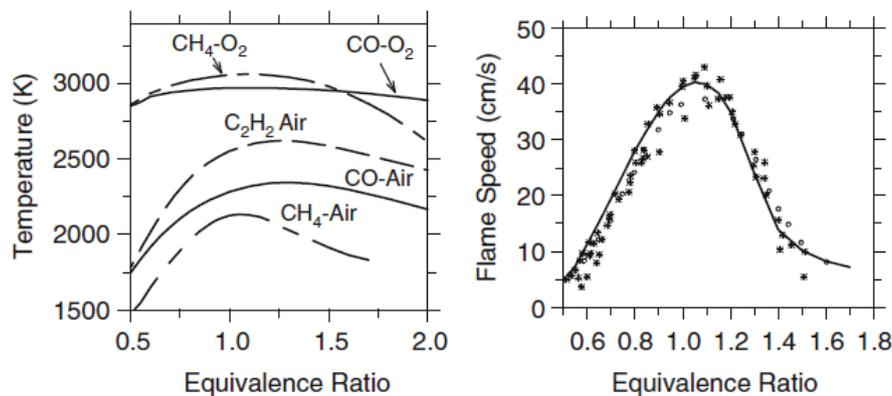


Figure 5 : Effet de la richesse sur la vitesse de la flamme

5.2) Effet de la température d'injection des réactifs

L'augmentation de la température des gaz frais T_r mène à des réactions chimiques plus rapides, alors le temps chimique est plus court et la vitesse de la flamme plus importante. Pour les gaz parfaits, la diffusivité thermique s'écrit en fonction de la température :

$$\alpha = \frac{\lambda(T)}{\rho c_p} = \frac{RT\lambda(T)}{PC_p} \propto T^{1.5} P^{-1} \quad (3.13)$$

Lorsque la température augmente la diffusivité thermique augmente aussi, ce qui donne une vitesse de flamme plus importante. La figure 6 montre cet aspect, les températures initiales importantes du propane, donnent des vitesses de flamme plus importantes.

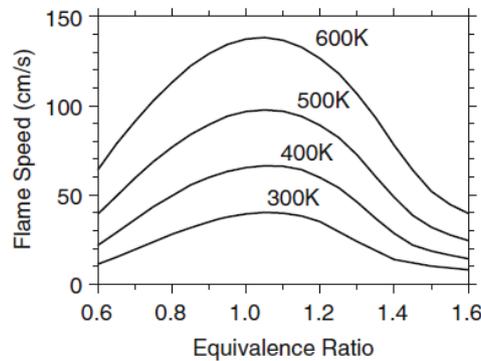


Figure 6 : Effet de la température de l'injection des gaz sur la vitesse de la flamme

5.3) Effet de la pression

Considérons l'effet de la pression sur la vitesse de la flamme. Pour la plupart des fuels (hydrocarbures), l'augmentation de la pression engendre la diminution de la vitesse de la flamme. Si on fait référence à l'équation (3.9) on remarque la dépendance de chaque paramètre de la pression.

La diffusivité thermique est inversement proportionnelle à la pression comme $\propto P^{-1}$. La température de la flamme augmente légèrement avec la pression car il y'a moins de dissociation aux hautes pressions, mais cet effet n'est pas significatif et ne va pas être inclut.

L'effet de la pression sur le temps chimique peut être analysé en considérons l'échelle de temps chimique :

$$\tau_{chem} = [Fuel]_r / \bar{r}_{fuel,av} \propto \frac{P}{P^{(a+b)}} \propto P^{1-a-b}$$

Ou a et b sont les exposants du fuel et de l'oxydante utilisée dans la réaction globale à une étape. La vitesse de la flamme a la dépendance suivante.

$$S_L = \left\{ \frac{\alpha (T_P - T_{ig})}{\tau_{chem} (T_{ig} - T_r)} \right\}^{1/2}$$

$$S_L \propto \sqrt{P^{-1}/P^{1-a-b}} \propto P^{(a+b)/2 - 1} \propto P^{n/2 - 1} \quad (3.14)$$

Avec $n = a + b$, est l'ordre de la réaction chimique si $n = 2$, la flamme n'est pas sensible à la pression. Pour les hydrocarbures, l'ordre total est inférieur à 2, provoquant une

dépendance négative de la pression (figure 7). Cela engendre des difficultés pour les applications de la combustion à hautes pressions.

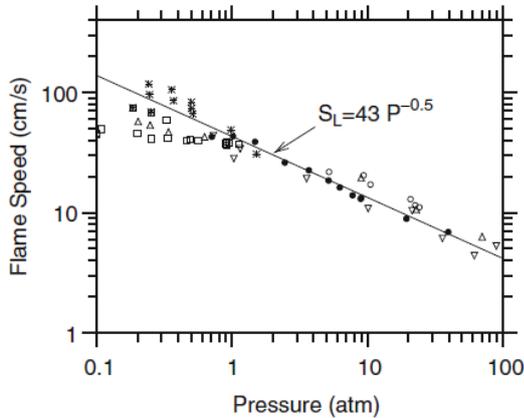


Figure 7 : Vitesse de la flamme en fonction de la pression pour Le méthane en combustion stœchiométrique

Pour la majorité des fuels (hydrocarbures), la vitesse de la flamme est plus sensible aux températures qu'aux pressions, l'augmentation de la température des gaz peut annuler la réduction de la vitesse de la flamme due à la pression. Dans les turbines à gaz et les moteurs à combustion interne, le mélange air/fuel est comprimé à des températures élevées avant l'ignition.

Dans plusieurs applications, une formule empirique est utilisée pour corréliser la vitesse de la flamme laminaire à la même vitesse à l'état de référence (conditions ambiantes).

$$S_L(\phi, T, P) = S_{L,ref}(\phi) \left(\frac{T_r}{T_{ref}} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\beta (1 - 2.5\psi)$$

Où $T_{ref} = 300K$, $P_{ref} = 1atm$

$$S_{L,ref}(\phi) = Z \cdot W \cdot \phi^\eta \exp[-\xi(\phi - 1.075)^2]$$

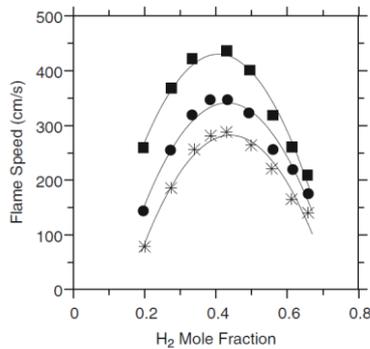
Avec ψ la fraction massique des gaz résiduels brûlés, les autres coefficients sont donnés par la table. Cette formule est généralement utilisée pour les moteurs à combustion internes.

Fuel	Z	W (cm/s)	η	ξ	α	β
C_8H_{18}	1	46.58	-0.326	4.48	1.56	-0.22
C_2H_5OH	1	46.50	0.250	6.34	1.75	$-0.17/\sqrt{\phi}$
$C_8H_{18}+$ C_2H_5OH	$1 + 0.07X_E^{0.35}$	46.58	-0.326	4.48	$1.56 + 0.23X_E^{0.35}$	$X_G\beta_G + X_E\beta_E^a$

^a X_E = volume percentage of ethanol in fuel mixture, %; X_G = volume percentage of isooctane in fuel mixture, %; β_E = β value for ethanol; β_G = β value for isooctane

5.4) Effet de la dilution

L'effet de la dilution sur la vitesse de la flamme peut être démontré par garder les mêmes réactifs mais d'utiliser des espèces de diluant différentes comme montré par la figure 8.



Mixture	Adiabatic flame temperature (K)	Thermal diffusivity, α , at 1,300 K (cm^2/s)
H ₂ /O ₂ /N ₂	2,384	2,65
H ₂ /O ₂ /Ar	2,641	2,59
H ₂ /O ₂ /He	2,641	12,59

Table 2 : Températures adiabatiques de la flamme pour différents diluants

Figure 8 : Vitesse de la flamme pour différents diluants (* N₂, ● Ar, ■ He)

Pour l'air, le rapport de N₂ à O₂ est 3.76 en volume. En remplaçant le N₂ par l'argon Ar ou l'hélium He, les vitesses de la flamme augmentent. Les flammes diluées par l'hélium ont les vitesses les plus grandes. Avec différents diluants, le pic des températures et les diffusivités thermiques sont différentes. La table 2 donne les valeurs des températures adiabatiques de la flamme et des diffusivités thermiques pour les mélanges stœchiométriques.

Lorsqu'on remplace le N₂ par l'argon Ar, les vitesses de la flamme augmentent car l'argon a une capacité calorifique Cp inférieure. Cependant, la variation de la diffusivité thermique est négligeable, par conséquent la vitesse de la flamme augmente.

Lorsque l'hélium He est utilisé comme diluant, la température de la flamme est la même que lorsque le mélange est dilué par l'argon Ar, puisque ces deux gaz nobles ont la même capacité calorifique. Cependant, due à la masse moléculaire très petite de l'hélium, la diffusivité thermique est grande par rapport à celle de l'argon et la vitesse de la flamme augmente.

6) Effet de la richesse, température et pression sur l'épaisseur de la flamme :

Typiquement, l'épaisseur de la flamme est de quelques mm aux conditions

ambiantes, elle s'écrit : $\delta_R \approx \frac{\alpha}{S_L}$

Sa dépendance de ϕ , T et P peut être déduite de la dépendance de S_L . Puisque la vitesse de la flamme a un pic près des conditions stœchiométriques et diminue dans les mélanges riches et pauvres, l'épaisseur de la flamme va avoir une dépendance en U de ϕ . Lorsque la température des gaz imbrûlés augmente on a une petite épaisseur de la flamme.

La dépendance de la pression est montrée en utilisant les équations (3.13) et (3.14) :

$$\delta_R \propto P^{-1} P^{-\frac{a+b}{2}+1} \propto P^{-(a+b)/2} \propto P^{-n/2}$$

Pour la plupart des combustibles, l'ordre total de la réaction est positif ($n \approx 1 - 1.15$) ce qui implique que l'épaisseur de la flamme diminue avec la pression.

7) Limites d'inflammabilité :

Lorsque le mélange est assez riche ou pauvre, la température de la flamme diminue et par conséquent, la vitesse de la flamme chute significativement (figure 9).

Eventuellement, la flamme ne peut pas se propager lorsque la richesse est plus grande qu'une limite supérieure ou plus petite qu'une limite inférieure, ces deux limites sont dites les limites riche et pauvre d'inflammabilité (RFL : Rich Flammability Limit et LFL : Low Flammability Limit). Elles sont généralement exprimées en pourcentage du fuel en volume dans le mélange. Ces limites sont dites aussi limites d'explosion dans quelques applications.

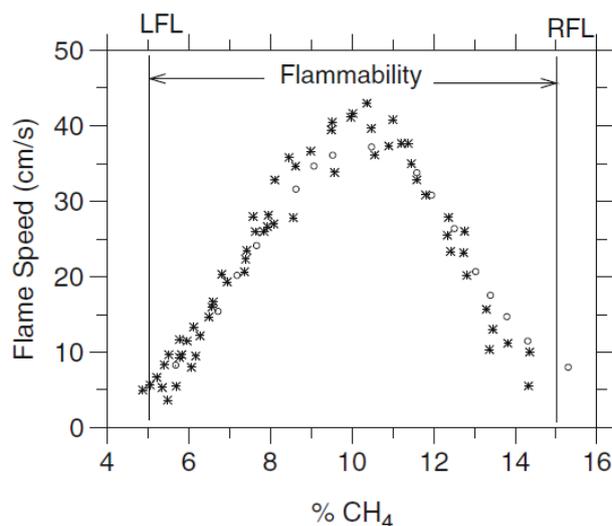


Figure 9 : Limites d'inflammabilité riche (RFL) et pauvre (LFL)

Pour les hydrocarbures, le mélange à l'RFL contient à peu près le double de la quantité de fuel comparé à la stœchiométrie. A l'LFL, le mélange contient à peu près la moitié de la stœchiométrie. Les limites d'inflammabilité sont mesurées à la pression ambiante. Table 3. Lorsque la température et la pression changent, les limites d'inflammabilité changent aussi. La dilution affecte aussi ces limites.

Table 6.3 Flammability at standard conditions (% of fuel by volume in mixture)

Fuel vapor	Lean limit	Rich limit	Fuel vapor	Lean limit	Rich limit
Hydrogen (H ₂)	4	75	Isopropyl	2	12
Methane (CH ₄)	5	15	Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	3.3	19
Gasoline	1.4	7.6	n-Heptane (C ₇ H ₁₆)	1.2	6.7
Diesel	0.3	10	Iso-octane (C ₈ H ₁₈)	1	6.0
Ethane (C ₂ H ₆)	3.0	12.4	Propane (C ₃ H ₈)	2.1	9.5
n-Butane (C ₄ H ₁₀)	1.8	8.4	n-Pentane (C ₅ H ₁₂)	1.4	7.8
n-Hexane (C ₆ H ₁₄)	1.2	7.4	Dimethylether (C ₂ H ₆ O)	3.4	27