

Physique du feu et bases de la combustion

Jean-Louis Consalvi*

jean-louis.consalvi@univ-amu.fr

* Aix-Marseille Université, IUSTI/UMR CNRS 7343, 5 rue E. Fermi, 13453 Marseille Cedex 13, France.

Jean-Louis CONSALVI – ESIA 29/05 au 03/06/2022

Plan

- 1. Description d'un processus de combustion représentatif
- 2. Caractéristiques des flammes d'incendie
- 3. Production de la suie et transfert radiatif associé
- 4. Comportement des matériaux au feu



Description d'un processus de combustion représentatif

- Combustible condensé → chaleur transférée par la flamme: liquéfie et vaporise la cire
- **Ecoulement** dominé par la convection naturelle.
- Réactions combustion: surface mince ou le combustible et l'oxydant sont à la stœchiométrie
- Processus de mélange entre le combustible et l'oxydant
- $\tau_{chem} \ll \tau_{mix}$: le mélange est le processus limitant
- Couleur jaune dans la flamme: le résultat des particules de suie solides, formées entre la mèche et la flamme, et qui brûlent lorsqu'elles traversent la flamme.





Description d'un processus de combustion représentatif

- L'énergie libérées par la combustion, \dot{Q} est transférée au milieu ext.
 - Conduction entre les gaz chauds et la mèche
 - Rayonnement: $\chi_R = \frac{\dot{Q}_R}{\dot{O}}$
 - Convection
- Feu de nappe
 - Combustible condensé → transfert radiatif pour le vaporiser
 - Ecoulement dominé par les forces de flottabilité
 - Flamme non-prémélangée → mélange est le processus limitant
 - Différences:
 - ✓ Ecoulement/mélange: turbulence

Pris de T. Poinsot et D. Veynante Numerical Combustion







- Flammes non-prémélangées turbulentes contrôlées par les forces de flottabilité
 - 1. Non-prémélangées: flammes bien ventilées Flamme de prémélange







• Structure des flammes non-prémélangées



- Loin de la flamme, le gaz est soit trop riche soit trop pauvre pour brûler.
- Les réactions chimiques ont lieu seulement dans une région limitée ou le combustible et l'oxydant sont mélangés de manière adéquate, c'est-à-dire dans des proportions stœchiométriques.
- Pas de propagation ≠ flammes de prémélanges
- Pas d'échelle de longueur ou de temps évidentes
- Contrôlé par le mélange combustible/oxydant: $au_{chem} \ll au_{mix}$

• Fraction de mélange



Pris de T. Poinsot et D. Veynante Numerical combustion

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Z}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_{th} \frac{\partial Z}{\partial x_j} \right)$$

Z = 1 Côté Fuel

Z = 0 Côté Oxydant

- *Z*: Fraction de mélange
- $D_{th} = \lambda / \rho c_p$ (Pitsch & Peters, 1998)
- Z: Scalaire conservé
 - Affecté par le mélange par convection et diffusion
 - Ne dépend pas des réactions chimiques

• Structure de flamme dans l'espace des fractions de mélange





• Hypothèses:

- 1. Equi-diffusivité des espèces et de la chaleur $Le_i = \frac{\lambda}{\rho c_p D_i} = 1, i = 1, 2, ..., k \Rightarrow D = D_{th} = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ 2. Equations de transport $\rho \frac{\partial Z}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial Z}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Z}{\partial x_i} \right)$ $\rho \ \frac{\partial Y_k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_k^{\prime\prime\prime}$ $\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{c_m} (1 - X_R) \dot{Q}^{\prime\prime\prime}$
- 3. Ecoulement bas Mach

• Structure de flamme dans l'espace des fractions de mélange



- Surface de Z à la stœchiométrie ($Z = Z_{st}$)
- Si le gradient local de fraction de mélange est suffisamment grand → la combustion a lieu dans une surface mince au voisinage de cette surface
- On introduit localement un système orthogonal de cordonnées (x₁, x₂, x₃) avec x₁ dans la direction du gradient de Z.
- On effectue le changement de variables suivant: $(x_1, x_2, x_3, t) \rightarrow (Z, Z_2, Z_3, \tau)$



$$\rho \frac{\partial Y_k}{\partial \tau} = \frac{\rho \chi}{2} \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} + \dot{\omega}_k^{\prime\prime\prime}$$
$$\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\rho \chi}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{c_p} (1 - X_R) \dot{Q}^{\prime\prime\prime}$$

 $\chi = 2D \frac{\partial Z}{\partial x_j} \frac{\partial Z}{\partial x_j} \equiv \text{taux de dissipation scalaire } [s^{-1}]$

• Structure de flamme dans l'espace des fractions de mélange



- $\chi = 2D \frac{\partial Z}{\partial x_j} \frac{\partial Z}{\partial x_j} \equiv$ taux de dissipation scalaire $[s^{-1}]$
- Inverse d'un temps de diffusion ou d'un temps de mélange
- La dérivée en temps est importante si des changements rapides ont lieu, par exemple lors des phénomènes d'extinction.
- Si elle peut être négligée: modèle de « flamelette » stationnaire.



$$0 = \frac{\rho \chi}{2} \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} + \dot{\omega}_k^{\prime\prime\prime}$$
$$0 = \frac{\rho \chi}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{c_p} (1 - X_R) \dot{Q}^{\prime\prime\prime}$$

- Structure de flamme dans l'espace des fractions de mélange
- Flamme à contre-courant: $\chi = \chi_{st} f(Z)$ et $\chi(Z)$ varie de comme

 $\chi_{st} = \left(2D \frac{\partial Z}{\partial x_j} \frac{\partial Z}{\partial x_j}\right)_{st} \Rightarrow \chi_{st} \text{ est utilisé comme un paramètre}$

additionnel à Z pour décrire la structure de flamme. Il incorpore les

effets de la convection et de la diffusion dans la direction du gradient de

la fraction de mélange.

$$0 = \frac{\rho \chi}{2} \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} + \dot{\omega}_k^{\prime\prime\prime}$$
$$0 = \frac{\rho \chi}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{c_p} (1 - X_R) \dot{Q}^{\prime\prime\prime}$$

- Perte de chaleur: X_R
- $T(Z, \chi_{st}, X_R), Y_k(Z, \chi_{st}, X_R)$





- $\chi_{st} \rightarrow 0$: Chimie infiniment rapide => le combustible et l'oxydant ne peuvent coexister. La zone de réaction est infiniment mince.
- χ_{st} 1: la puissance produite par les réactions chimiques est diffusée de plus en plus rapidement \rightarrow diminution de la température.
- $\chi_{st} = \chi_q$: **EXTINCTION CINETIQUE**



- Au plus on augmente les pertes radiatives, au plus la température diminue
- EXTINCTION RADIATIVE

Exemple d'extinction radiative: transition d'une flamme n'émettant pas de suie à une flamme émettant de la suie



Avec la permission d'Augustin Guibaud



- Propagation de flamme sur des fils électriques en microgravité
- Différentes pressions sont considérées
- Mécanisme: la pression augmente ce qui accroit la production de la suie et, de fait, les pertes radiatives. Cela contribue à diminuer la température au sommet de la flamme. Pour une pression limite, la température n'est plus suffisante pour oxyder la suie et les particules sont émises dans le milieu environnant.

2. Contrôlées par les forces de flottabilité: faible nombre de Froude

- Nombre de Froude: $Fr = \frac{U_{inj}^2}{gD} = \frac{\text{vitesse d'injection du combustible}}{\text{Vitesse induite par les forces de flottabilité}}$
- Nombre de Froude équivalent: $Q_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty}c_p T_{\infty}\sqrt{gD}D^2}$

Flammes jets

• C2H4/N2/H2 (Adelaide 1, Mahmmoud et al., 2015) D = 4 mm; $U_{inj} = 56,8m/s$; Fr \approx 70,000



Feux de nappe d'heptane (EDF R&D)

D= 70 cm, $\dot{Q} = 550$ kW, U_{inj} =O(cm/s), Fr ≈1,83×10⁻⁵



Phénomène de puffing:

$$f = 0.48 \sqrt{\frac{g}{D}}$$
 Pagni (1990)



Pris de Quintiere, Fundamental of fire phenomena, 2006

•
$$\rho \left[\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{\omega} + \vec{\omega} (\nabla \cdot \vec{v}) - (\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = \nabla \rho \times \vec{g} - \nabla \rho \times \frac{D \vec{v}}{D t} + \mu \nabla^2 \vec{\omega}$$

 $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v} \equiv \text{vorticité}$

- Génération de vorticité gravitationnelle: $abla
 ho imes ec{g}$
- Génération de vorticité baroclinique: $-\nabla \rho \times \frac{D\dot{v}}{Dt}$
- Génération de vorticité: $\nabla \rho \times \left[\vec{g} \frac{D\vec{v}}{Dt}\right] \propto \nabla \rho \times \nabla p$



- Le gradient de densité est orienté des gaz chauds vers les gaz frais
- La gravité et l'opposée de l'accélération sont orientées vers le bas $\Rightarrow \nabla p$ est orienté vers le bas

Simulation d'une flamme de méthanol D=30cm



- 1. Au niveau du bac, l'entrainement d'air induit un plissage de la flamme
- 2. La flamme plissée est sujette à une instabilité de Rayleight Taylor
- 3. Cela résulte dans la formation d'une « bulle » de gaz chaud tandis que l'air frais s'écoule vers la surface du brûleur.
- 4. La croissance de la résulte en une autre configuration instable qui produit une génération de vorticité.
- 5. Le vortex résultant commence à s'enrouler dans ce qui deviendra la prochaine structure turbulente cohérente
- 6. La croissance de cette structure cohérente et le comportement de « necking » caractéristique en dessous d'elle sont illustrés sur les deux Derniers diagrammes.

Panache de feu:



Jean-Louis CONSALVI – ESIA 29/05 au 03/06/2022



Panache réel de McCaffrey (1979) : méthane, D = 30cm
 Températures et vitesses axiales

$$\circ \Delta T_0 = \left(\frac{\kappa}{0.9\sqrt{2g}}\right)^2 \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}}\right)^{2\alpha-1} T_{\infty}$$

$$\circ u_0 = \kappa \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}}\right)^{\alpha} \dot{Q}^{1/5}$$

région	z/Q ^{2/5}	α	K
Continue	<0.08	1/2	6.8
Intermittente	0.08-0.2	0	1.9
Panache	>0.2	-1/3	1.1

Jean-Louis CONSALVI – ESIA 29/05 au 03/06/2022

3. Turbulentes



Au sommet de la flamme (Williamson et al., 2007)

CH4	<i>D</i> =1 m	$\dot{Q} = 2MW$	$u_0 = 9, 1 m/s$	$\Delta T_0 = 650K$
$l_t = \frac{D}{2}$ $= 0,5m$	$u'_0 = 0,3u_0$ =2,8m/s	$Re_t = \frac{u_0' l_t}{v}$ =1720	$\eta_k = l_t R e_t^{-3/4}$ =1,9 mm Jean-Louis CONSALVI – R	$\chi_{st} = 2,86 \ s^{-1}$

- $l_t \equiv$ échelle intégrale de turbulence
- $Re_t \equiv$ Nbre de Reynolds turbulent
- $\eta_k \equiv$ échelle de Kolmogorov \rightarrow Echelle à laquelle les réactions de combustion ont lieu

•
$$\chi_{st} < \chi_q = 11, 2s^{-1}$$



EXTINCTION CINETIQUE: pas dans les feux bien ventilés

Qu'est ce que la suie?

- Particules de carbone solide formées durant la combustion des hydrocarbures
 - o Définition chimique: pas unique
 - \checkmark Dépend du combustible et des conditions de combustion
 - ✓ Le rapport atomique C/H varie entre 8 à 1
 - $\circ \rho_S$ = 2 g/cm³
- Analyse au microscope électronique
 - Agrégats de particules sphériques
 - Particules sphériques (particules primaires)
 - ✓ 10^5 à 10^6 atomes de carbone
 - ✓ $d_p \in [20,50nm]$
 - ✓ Composées de HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques: Benzène)
- La couleur « jaune » observée dans une flamme de bougie est causée par le rayonnement thermique de la suie. Ce phénomène est observé dans des flammes plus grandes









- Polluant
 - Emis de l'échappement des véhicules de transport, de la combustion des hydrocarbures (oucharbon)
 - $\circ~$ Energies fossiles alternatives: gaz naturel
 - Cancérigène
 - Second contributeur au réchauffement climatique après le CO₂

Intérêt dans le cadre des incendies

- Feux industriels ou domestiques « grandes échelles »
 - o Mode de transfert de chaleur dominant: rayonnement thermique
 - $\circ~$ Particules de suie contribuent pour une grande partie à ce rayonnement

Propriétés radiatives des particules de suie

- Absorption et diffusion d'une particule de suie
 - o Théorie de Mie: résolution des équations de Maxwell (Electromagnétisme)
 - o d_s ≪ λ (d_s ≡ taille caractéristique d'une particule de suie; λ ≡ longueur d'onde dans le spectre thermique)
 - Théorie de Rayleigh (Absorption >> diffusion)
 - $\kappa_{s,\lambda} = \frac{c_0}{\lambda} f_s$ ($\kappa_{s,\lambda} \equiv$ coefficient d'absorption de la suie $[m^{-1}]$; $f_s \equiv$ fraction volumique de suie $\approx 10^{-6} = ppm$)



Prise de H. Wang, PROCI33

- Moyenne de Planck et de Rosseland
 - Optiquement mince: $\kappa_{P,S} = \frac{\int \kappa_{s,\lambda} I_{b,\lambda}(T) d\lambda}{\int I_{b,\lambda}(T) d\lambda} \approx 3.83 \frac{C_0}{C_2} f_S T$ $\checkmark C_2 \equiv$ seconde constante de Planck ($C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m.K}$)

$$\circ \text{ Optiquement épais:} \frac{1}{\kappa_{R,S}} = \frac{\int_{\frac{1}{\kappa_{S,\lambda}}}^{\frac{1}{\kappa_{L,\lambda}}} d\lambda}{\int_{\frac{dI_{b,\lambda}(T)}{dT}}^{\frac{dI_{b,\lambda}(T)}{dT}} d\lambda} \Rightarrow \kappa_{R,S} = 3.6 \frac{C_0}{C_2} f_S T$$

Pris de Modest, Radiative Heat transfer2013



Principe de mesure de la fraction volumique de la suie

- Extinction laser
- \circ $I_{0,\lambda}$ = rayonnement incident =connu
- $\circ \lambda$ telle que pas de bande d'absorption des gaz de combustion
- Loi de Bouguer

$$\checkmark I_{\lambda} = I_{0,\lambda} \exp(-\kappa_{s,\lambda}L) = \text{mesurer}$$

✓ On en déduit $\kappa_{s,\lambda}$ puis f_s

Processus de formation de la suie

- Temps caractéristique
 - o Suie (et polluants): chimie lente
 - $\circ \ \tau_{soot} \gg \tau_{mix}$
- Suie ne diffuse pas
- Conséquence: La fraction volumique de la suie n'est pas bien corrélée Avec la fraction de mélange



I٦

 $I_{0,\lambda}$









$\xi \equiv Z \equiv fraction \ de \ mélange$

- Background
- Rapport Carbone/oxygen (C/O) > 0.6: Côté riche en combustible dans les flammes non-prémélangées
- Temperatures entre \sim 1350 K et \sim 2000 K:

Formation de la suie nécessite des températures suffisamment hautes pour être activée Température plus haute suppriment les précurseurs de la suie

 Précurseurs de la suie: Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) Cycles Benzene (A_i HAP avec i cycles) Jouent un role majeur dans la formation de la suie

Benzene (A ₁)	Pyrene (A ₄)	
Phenyl (A_1^{\cdot})	Coronene (A ₇)	
Naphtalene (A_2)		

- Etapes:
- 1. Formation du benzène
- 2. Croissance des HAP
- 3. Nucléation (HAP)
- 4. Croissance de surface
- 5. Coagulation et agglomération
- 6. Oxydation

1. Fomation du benzène (Martin et al., PECS 2022)

C_2H_2	Basse température
C ₃ H ₃	Haute température
C ₅ H ₅ (cyclopentadienyl)	Radical stabilisé par résonance

Tous ces chemins: inclus dans les mécanismes cinétiques à l'tat de l'art



2. Croissance des HAPs: séquence HACA, H-abstraction C (C2H2) Addition

 Une séquence répétitive à deux étapes Activation d'un radical par abstraction de l'hydrogène sur une molécule stable Addition d'acétylène sur le radical



Pris de Frencklach, 1994

3. Nucléation

- Lorsque les PAH atteignent 4 anneaux (A4) ou plus, ils sont capables de se condenser et de former les premières particules solides (particule primaire de suie)
- $A_4 + A_4 \rightarrow$ particule de suie (au sens de Boltzmann)

4. Croissance de surface

• Mécanisme 1: HACA

	React	tions		А	n	Е	ref.
1:	Soot-H + H	\leftrightarrow	$Soot^* + H_2$	1.00×10^{8}	1.80	68.42	[115]
				8.68×10^4	2.36	25.46	
2:	Soot-H + OH	\leftrightarrow	$Soot^* + H_2O$	6.72×10^1	3.33	6.09	[182]
				6.44×10^{-1}	3.79	27.96	
3:	$\operatorname{Soot}-\operatorname{H}$	\leftrightarrow	$\mathrm{Soot}^* + \mathrm{H}$	1.13×10^{16}	-0.06	476.05	[67]
				4.17×10^{13}	0.15	0.00	
4:	$\mathrm{Soot}^* + \mathrm{C}_2\mathrm{H}_2$	\rightarrow	$\operatorname{Soot}-\operatorname{H}$	2.52×10^9	1.77	13.54	$2 \times [183]$



- Mécanisme 2: condensation des HAP
- Collision (au sens de Boltzmann) d'une particule de suie et d'un atome de pyrène

5. coagulation et agglomération

- Coagulation: collision de deux particules pour former une particule sphérique
 - ✓ Particules de suie naissantes
 - ✓ Plus « mole »
- Agrégation: Formation d'une particule qui garde essentiellement la structure des deux particules qui lui ont donné naissance
 - ✓ Particules plus matures





6. Oxydation

- Réaction par O₂: séquence du processus HACA
- Réaction par OH: collision entre particule de suie et OH (au sens de Boltzmann)
 - $\circ C(s) + OH \to CO + H$
 - Efficacité de collision 0.13

Reactions			А	n	Ε	ref.	
1:	$Soot^* + O_2$	\rightarrow	Soot-H + 2 CO	2.20×10^{12}	0.0	31.38	[89]
2:	Soot-H + OH	\rightarrow	$\mathrm{Soot}-\mathrm{H}+\mathrm{CO}$	Reaction pro	obabil	ity 0.13	[132]

Point de fumées « smoke-point »

- Définition et mécanismes
- Flammes bien ventilées laminaires axisymétriques brûlant dans de l'air
- Le « smoke point » correspond à la longueur minimale de flamme à partir de laquelle des particules de suie commencent à être émises ou sommet de la flamme.
- Mécanismes conduisant au « smoke point »
 - o On augmente progressivement le débit de combustible
 - $\circ~$ On augmente la longueur de flamme
 - $\circ~$ Les particules de suie ont plus de temps pour se former
 - $\circ~$ La fraction volumique de suie devient plus importante
 - $\circ~$ Les pertes radiatives augmentent
 - $\,\circ\,\,$ La température au sommet de la flamme diminue $\sim 1400-1500\,{\it K}$
 - Réduction de l'oxydation => Emission de particules de suie

$$\circ \chi_{R,sp} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{\dot{Q}} \sim 30\%$$



Pris de De Ris et al., 2002

- Longueur de flamme au « smoke point » l_{sp}
 - Mesure de la propension à former de la suie par un combustible donné
 - \circ Au plus l_{sp} est petit, au plus le combustible a une propension à former de la suie
 - Aromatiques > alcynes > alcènes > alcanes

Modèle de production de la suie (Lautenberger et al., 2005)

$$\circ \tau_{F,s} \propto l_{sp}$$

Table K-8. Smoke point heights as measured by Tewarson.

Fuel	Smokepoint
	m
Ethanol	0.225
Acetone	0.205
Pentane	0.155
Isopropanol	0.148
Hexane	0.125
Nvlon	0.12
Ethvlene	0.106
Heptane	0.11
PMMA	0.105
Cyclohexane	0.085
Isooctane	0.08
PP	0.05
PE	0.045
Propylene	0.029
PS	0.015
Toluene	0.005

Table K-9. Smoke point heights as measured by Schug et. al.

Fuel	Smokepoint
	m
C_2H_2	0.019
C_2H_4	0.106
C_2H_6	0.243
C_3H_6	0.029
C_3H_8	0.162
1,3 - C₄H₀	0.015
<i>i</i> -C ₄ H ₈	0.019
$n-C_4H_{10}$	0.16

Estimation des propriétés des incendies liés à partir du « smoke point », ASTM E2058 FPA (Tewarson, SFPE 2016)



Figure 3-4.39. Relationships between the combustion efficiency and its convective and radiative components, and the smoke point. Data were measured in the ASTM E2058 fire propagation apparatus, and reported in References 48 and 49.

•
$$\chi = \frac{\Delta hc, eff}{\Delta hc} = 1.15 l_{sp}^{0.10}$$

•
$$\chi_R = \frac{Q_R}{\dot{Q}} = 0.41 - 0.85 l_{sp}$$

•
$$\chi_{conv} = \frac{\dot{Q} - \dot{Q}_R}{\dot{Q}}$$

1. Inflammation pilotée des solides

L'inflammation est le mécanisme conduisant à l'apparition de la flamme. Il est caractérisé par une augmentation rapide de la température.

Deux types d'inflammation:

- 1. Inflammation spontanée (auto-inflammation): a lieu du fait de l'auto-chauffage des réactifs
- 2. Inflammation pilotée: a lieu avec l'assistance d'une source d'inflammation



Mécanismes

- ✓ Vaporisation du combustible
- ✓ Formation d'un mélange inflammable
- ✓ Initiation de la combustion en phase gazeuse

- Vaporisation du combustible solide
- La vaporisation du combustible solide résulte d'une série de réactions chimiques de décomposition, appelée pyrolyse.
- Le débit volumique de pyrolyse (kg/m³/s par unité de volume du combustible solide) est donné par: $\dot{m}_P'' \propto exp(-E_a/RT)$
- Le débit volumique surfacique de combustible est donné par: $\dot{m}_P'' = \int_0^{\delta_p} \dot{m}_P''' dz$
- Haute énergie d'activation: fortement dépendent de la température. A basse température, il est très lent; à une température suffisamment grande il augmente rapidement. Par conséquent, on peut supposer que m^{''}_P devient significatif lorsque la surface du solide atteint une température de pyrolyse, T_p.

- Formation d'un mélange inflammable
- Gradients de concentration en combustible et en air se forment au dessus de la surface condensée:
 - Le combustible gazeux diffuse et est convecté par l'écoulement ascendant dans l'air.
 - L'air diffuse vers la surface du combustible condensé.
- Région au dessus de la surface ou le combustible gazeux et l'air coexiste dans des limites d'inflammabilité.
 - Au dessous de cette région, le mélange est trop riche pour s'enflammer.
 - Au dessus de cette région, le mélange est trop pauvre pour s'enflammer.



- Initiation de la combustion en phase gazeuse
- Une réaction de combustion peut être initiée si un pilote est présent dans la région inflammable au dessus de la surface.

- 3 phénomènes
 - 1. Gazéification (pyrolyse)
 - 2. Transport du combustible gazeux
 - 3. Inflammation du combustible gazeux

 $t_{ig} \equiv \text{temps d'inflammation}$ $t_p \equiv \text{temps de pyrolyse}$ $t_{mix} \equiv \text{temps de transport}$ $t_{chem} \equiv \text{temps d'induction}$

$$t_{ig} = t_p + t_{mix} + t_{chem}$$
 $t_p \gg t_{mix} \gg t_{chem} \Rightarrow t_{ig} \approx t_p$

- Le problème d'inflammation piloté: quel temps faut-il pour que la surface du combustible, soumis à un flux de chaleur connu, atteigne la température de pyrolyse.
- Solide semi-infini 1D, un flux incident sur la surface et des propriétés thermiques constantes

•
$$\dot{q}_{S}^{"} \equiv Flux \ net = \varepsilon_{S}\dot{q}_{e}^{"} - \varepsilon_{S}\sigma(T_{S}^{4} - T_{\infty}^{4}) - \tilde{h}(T_{S} - T_{\infty}); \ \varepsilon_{S} \equiv \text{emissivit} = 1$$

• $\dot{q}_{S}^{"} \equiv Flux \ net = \varepsilon_{S}\dot{q}_{e}^{"} - \varepsilon_{S}\sigma(T_{S}^{4} - T_{\infty}^{4}) - \tilde{h}(T_{S} - T_{\infty}); \ \varepsilon_{S} \equiv \text{emissivit} = 1$
• Solution au temps courts (fort flux incidents)
• $k_{s}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \dot{q}_{S}^{"}$
• $K_{s}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \dot{q}_{S}^{"}$
• $T(\infty, t) = T_{0}$
• $T(x, t \leq 0) = T_{0}$

Jean-Louis CONSALVI – ESIA 29/05 au 03/06/2022