

Interaction Rayonnement Turbulence

Modèle de flamme épaissie en LES

Damien Poitou

RAPSODEE,CERFACS

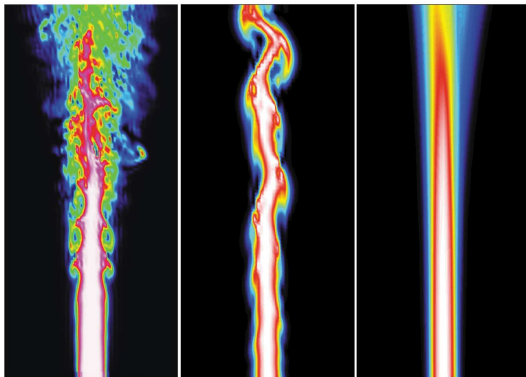
4 février 2009

Contexte : Rayonnement-Combustion

- Le rayonnement doit être pris en compte de façon précise :
 - Forte influence sur la cinétique chimique
ex : concentration de polluants (NO_x), estimation des suies ;
 - modification de la structure de flamme
ex : extinction
- Modèles prédictifs de combustion → Couplage avec le rayonnement.
→ Augmentation importante temps CPU : stratégie de couplage

Modélisation combustion turbulente

- Simulation Numérique Directe (**DNS**),
- Simulation à Grandes Echelles (**LES**),
- Navier-Stokes moyenné (**RANS**).



Direct Numerical Simulation (DNS) – all scales of fluid's motion are fully resolved

Large Eddy Simulation (LES) – large scales of fluids's motion are resolved, while small scales are modeled

Reynolds Average Simulation (RAS) – all flow scales of fluid's motion are averaged in time

Effets des fluctuations en RANS

- Émission radiative de **50 à 300%** plus importante avec les fluctuations turbulentes qu'en prenant \bar{T} et $\bar{\kappa}$ (Gore and Faeth, 1986, 1988 ; Sivathanu and Kounalakis, 1990),
- Pics de température réduits jusqu'à **150K** (Adams and Smith, 1995 ; Coelho, Teerling and Roekaerts, 2003) > Changements significatifs dans les prédictions de NOx et de suies,
- Flux aux parois augmenté de plus de **40%** (Li and Modest, 2003 ; Coelho, Teerling and Roekaerts, 2003).

- LES, Simulations **instationnaires** :
 - **extinctions, allumages**,
 - évènements rares mais **critiques**.
- Grandeur turbulente $X = \bar{X} + X'$
→ \bar{X} échelles résolues, X' échelles modélisées,
- Relation de fermeture = modèle **sous maille**,
- Deux grandes classes de modèles :
 - Modèles **pdf**,
 - Modèles à **flamme épaissie**.
- Influence des fluctuations sur le rayonnement ?

Modèle de flamme épaissie en LES

- Résolution du front de flamme : **loi d'Arrhénius**

$$\frac{\partial \rho Y_F}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_F) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_F) + \dot{\omega}_f$$

$$\dot{\omega}_f = A Y_F Y_O \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right)$$

- On résout un front de flamme F fois plus épais : $x' = Fx$ et $t' = Ft$

$$\frac{F \delta_l^0}{\Delta_{LES}} = \frac{\delta_l^0}{\Delta_{DNS}} \approx 10 \text{ à } 30$$

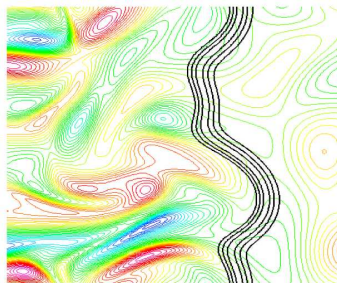
- Interaction Chimie/turbulence effet surfacique, une partie de la surface de flamme est non résolue (contribution sous-maille) → **Fonction d'efficacité E**

Modèle flamme épaissie

La turbulence plisse la flamme (étirement, courbure) :

→ Augmentation de la surface de flamme,

→ Augmentation de la vitesse de consommation.



La flamme épaissie perd de sa capacité à se plisser → Fonction d'efficacité pour conserver la vitesse de consommation.

Modèle final flamme épaissie dynamique

- Bilan de masse et de QDM non affectés
- Tenseur des contraintes : $\tilde{\tau}_{ij} + \tilde{\tau}_{ij}^t = (\mu + \mu_t)(\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\tilde{S}_{ll})$
- Conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{e}}{\partial t} + \frac{(\bar{\rho} \tilde{e} + \bar{p}) \tilde{u}_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \tilde{u}_i (\tau_{ij} + \tilde{\tau}_{ij}^t)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[g \frac{\mu C_p}{Pr} + \bar{f} \frac{\mu_t C_p}{Pr^t} \right] \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \right) + Q_0 \frac{E}{F} \tilde{\omega}_f$$

- Conservation des espèces :

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[g \frac{\mu}{Sc_k} + \bar{f} \frac{\mu_t}{Sc_k^t} \right] \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \right) - \frac{E}{F} \tilde{\omega}_f$$

$$0 < f(\mathbf{x}, t) < 1 \text{ (zones réactives)}, \quad \bar{f} = 1 - f,$$

$$1 < g = 1 + f(Fe - 1) < Fe$$

Modèle à flamme épaissie : méthode

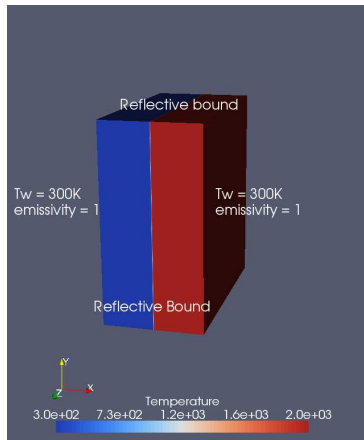
- $S_r = \nabla \cdot \mathbf{Q}_r \rightarrow S_r$ dans l'équation de l'énergie modifiée,
- Epaissement \rightarrow influence sur l'épaisseur optique du front de flamme ?
 - 1) Calculs de S_r sur des profils laminaires épaissis.
- Influence des fluctuations sous maille ?
 - 2) Calculs *a priori* DNS + Flamme épaissie = LES sur-résolue,
 - 3) Calculs *a posteriori* LES.

1) Flamme épaisse : cas laminaire

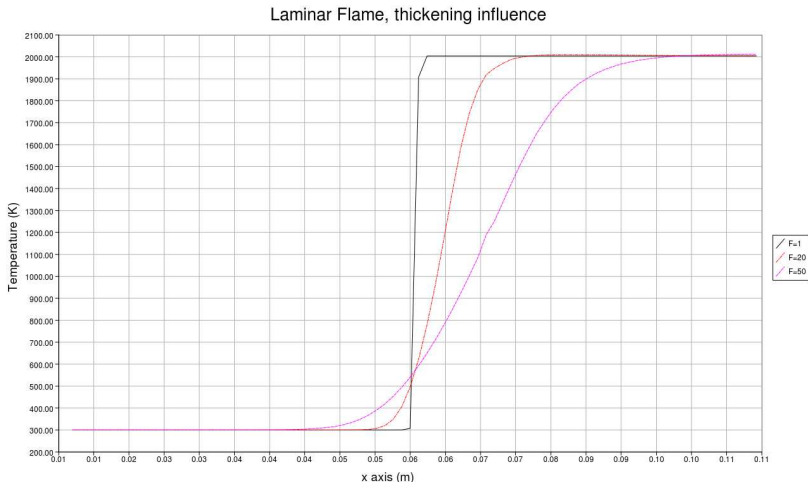
DNS d'une flamme prémélangée 1D Air/CH4 : $\phi = 0.8$

Dimensions : $L_x=0,1\text{m}$, $L_y=0,2\text{m}$, $L_z=0,2\text{m}$

Calcul DOM (post traitement) : S4, SNBcK

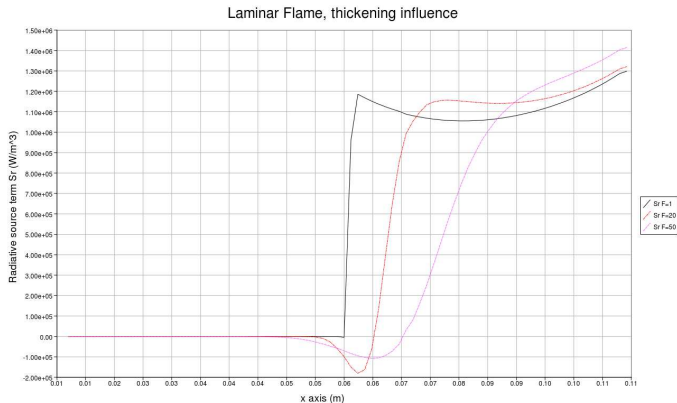


1) Flamme épaissie : cas laminaire



→ Similitude d'échelle sur les profils (ex. température).

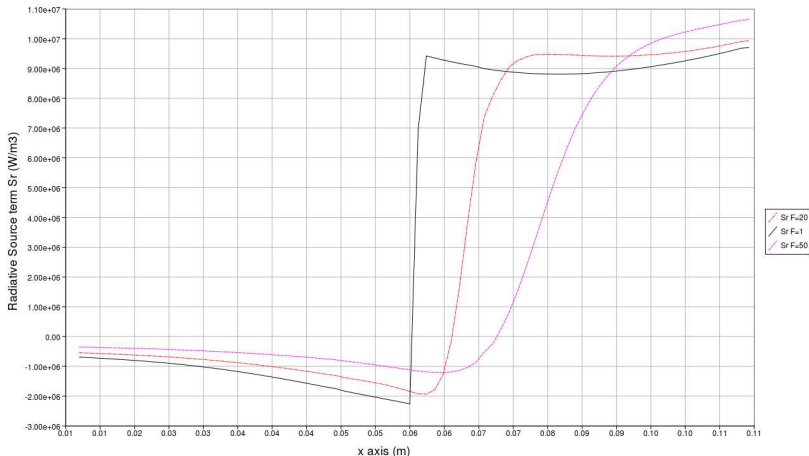
1) Flamme épaissie : cas laminaire



- La similitude d'échelle n'est pas strictement respectée,
- Plus de pertes localement,
- Faible effet : milieu **optiquement mince**, même ordre de grandeur.

1) Flamme épaissie : cas laminaire

Laminar Flame, thickening influence, $X_{\text{soot}} = 10^{-6} \cdot T/T_{\text{max}}$



Même calcul avec des suies : → Milieu optiquement très épaissi, peu d'influence sur les extremas

1) Flamme épaissie : cas laminaire

- Le régime épaissi ne change pas la structure du rayonnement de la flamme,
- Dans l'espace physique : effet sur le volume des gaz chauds.

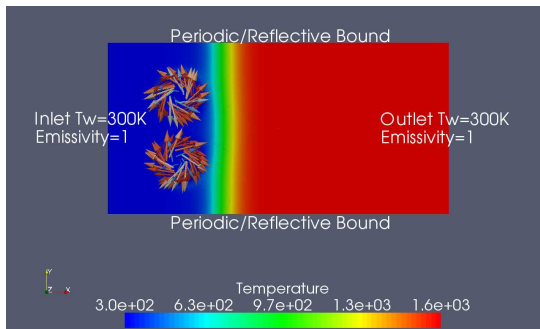
2) Flamme épaissie : vers le cas turbulent (DNS)

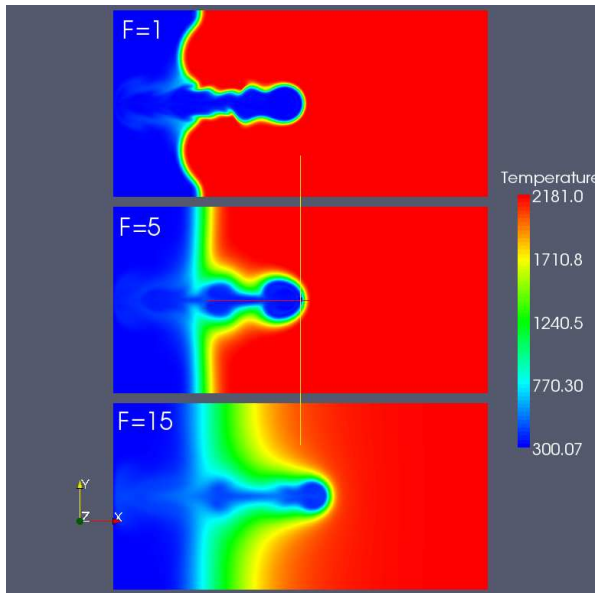
DNS d'une flamme prémélangée 2D : Air/CH₄ $\phi = 1$

+ Vortex : interaction avec la dynamique

Dimensions : L_x=0,02m, L_y=0,01m

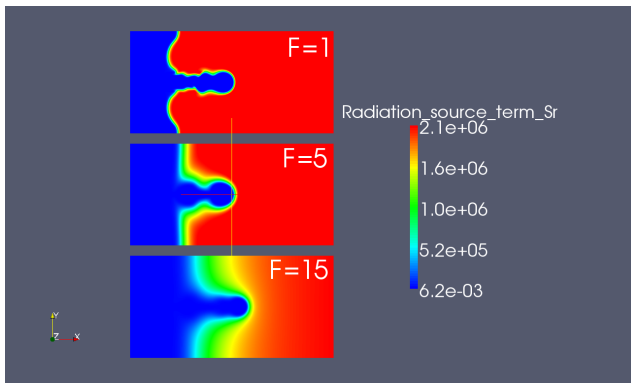
Calcul DOM-2D (post traitement) : S2, SNBcK





→ Avec l'épaississement les fluctuations du front de flamme diminuent.

2) Flamme épaissie : vers le cas turbulent (DNS)



→ L'épaississement ne change pas la structure du champs rayonné.

2) Flamme épaissie : vers le cas turbulent (DNS)

	F=1	F=5	F=15
$\langle Sr \rangle$ (kW/m^3)	1400,3	1224,4	1056,6
		$\epsilon = 12,6\%$	$\epsilon = 24,6\%$

→ L'épaississement ne change pas la structure du champs rayonné : étalement lié aux champs de température.

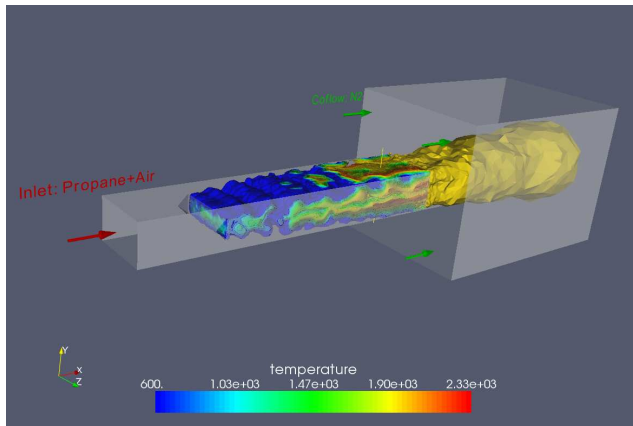
→ En DNS le rapport Surface/Volume est important : diminution du volume des gaz chauds.

3) Flamme épaissie : cas turbulent (LES)

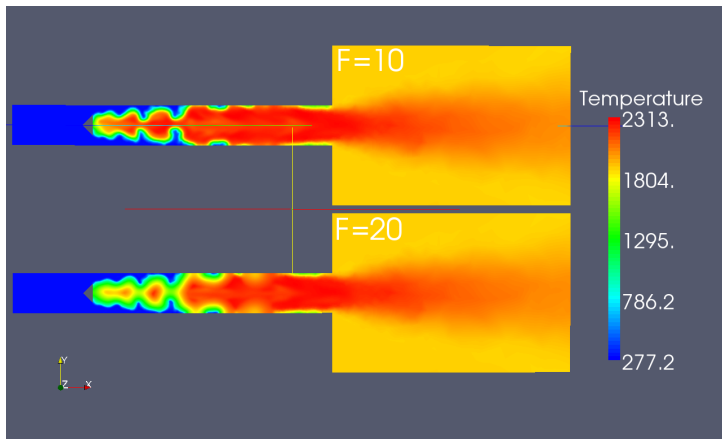
LES d'un flamme pré-lémanagée Propane/Air : $\phi = 1$ [ref Knikker, EM2C]

Nombre de cellules : 4,7M

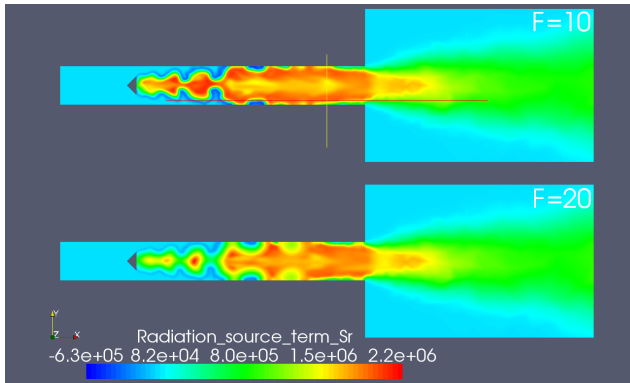
Calcul DOM : S4, FS-SNBcK($N_q = 15$)



3) Flamme épaissie : cas turbulent (LES)



Flamme épaissie : cas turbulent (LES)



	F=1	F=10	F=20
$\langle Sr \rangle$ (kW/m^3)	?	545,36	518,77 $\epsilon = 4,8\%$

Flamme épaissie : cas turbulent (LES)

Conclusions :

- Dans ce type de flamme le rapport Surface/volume est moins important,
- Pas d'effets sur la structure du rayonnement,
- Cohérent avec le laminaire

→ Résultats en non couplé, impact du rayonnement sur la structure de flamme.

Les premiers résultats de couplage semblent montrer un fort impact du rayonnement sur la dynamique de flamme → Etude dynamique-turbulence.

Interaction Rayonnement-Turbulence : Couplage

- Situation Flamme/Vortex : Schématisation la plus simple de la turbulence
- Influence du rayonnement sur la dynamique de flamme ?

Interaction Rayonnement-Turbulence : Couplage

- Les niveaux de température sont légèrement modifiés,
- Les flamme est légèrement plus mince avec le rayonnement,
- Les taux de réactions sont significativement augmentés,
- La flamme avec le couplage semble un peu plus robuste face à la turbulence.

- Reconstruction l'émission correspondant au cas $F=1$ (modèle sous maille),
- Couplage sur une LES,
- La réponse de la flamme à la turbulence peut être changés, couplage d'une flamme pulsée.