

# Identification des propriétés de flammes à partir de mesures spectroscopiques

*Y. Billaud, Y. Pizzo, A. Kaiss, B. Porterie*

IUSTI/UMR CNRS 7343, Aix-Marseille Université

-

*R. Berfroi, A. Collin, Z. Acem, G. Parent, P. Boulet*

LEMMA/UMR CNRS 7563, Université de Lorraine, Nancy

# Motivations

Domaines d'Application et de Recherche :

- Feux en milieu **ouvert** (urbain ou naturel)
- Feux **confinés** (et mécaniquement ventilés)
- **Dégradation** thermique de matériaux



Hypothèse :

Flamme considérée comme un milieu **gris** (ou surface grise!)

La réalité est plutôt un milieu **semi-transparent**, fortement **hétérogène** et **anisotherme**, constitué de **gaz** chaud, de **suies**, ...

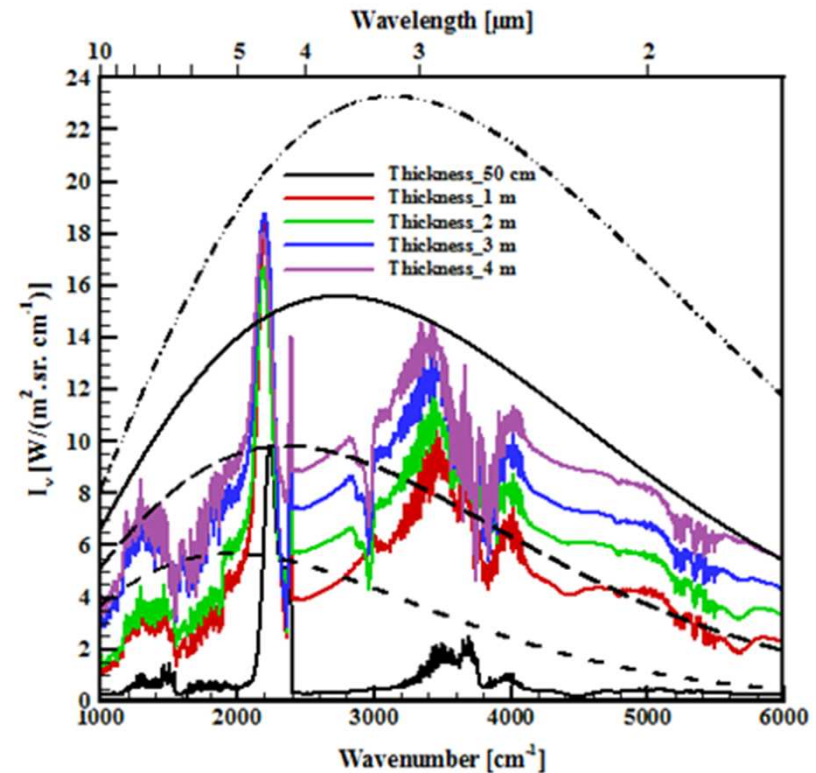
Raisons : Limiter le **temps de calcul** et le volume de données

- Le rayonnement n'est qu'un mode de transfert d'énergie qu'il faut **coupler** avec la combustion, l'écoulement, la dégradation, la turbulence,...
- Domaines et durées de simulation importants

Objectif, étudier des flammes types → identifier des propriétés

- Servir de **références** pour valider/développer des modèles simplifiées
- Améliorer notre **connaissance** des flammes

# Méthode: Expérience



## Combustible

- Litière végétale ( $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )
  - $0.5 < E < 4 \text{ m}$

## Spectromètre FTIR

- Gamme:  $1000 \text{ à } 6000 \text{ cm}^{-1}$ 
  - Résolution:  $4 \text{ cm}^{-1}$
- Zone visée:  $20 \text{ cm}$  au dessus du lit

## Mesures

- Spectres instantanés
- Comportement  $\neq$  CN ou CG
  - Rayonnement mixte :
    - émission gaz (ex:  $E = 0.5 \text{ m}$ )
    - $\nearrow E$  entraîne  $\nearrow$  émission des suies (ray. continu)

# Méthode: Modélisation

$$\frac{dI_\nu}{ds} + \kappa_\nu I_\nu = \kappa_\nu I_{b\nu}(T)$$

$$I_\nu(E) = (1 - e^{-\kappa_\nu E}) I_{b\nu}(T)$$

$$e^{-\kappa_\nu E} = \bar{\tau}_{soot}^{\Delta\nu} \prod_{i=1}^{n_{sp}} \bar{\tau}_i^{\Delta\nu}$$

$$\bar{\tau}_{soot}^{\Delta\nu} = 1 - e^{-\kappa_\nu^{soot} E}$$

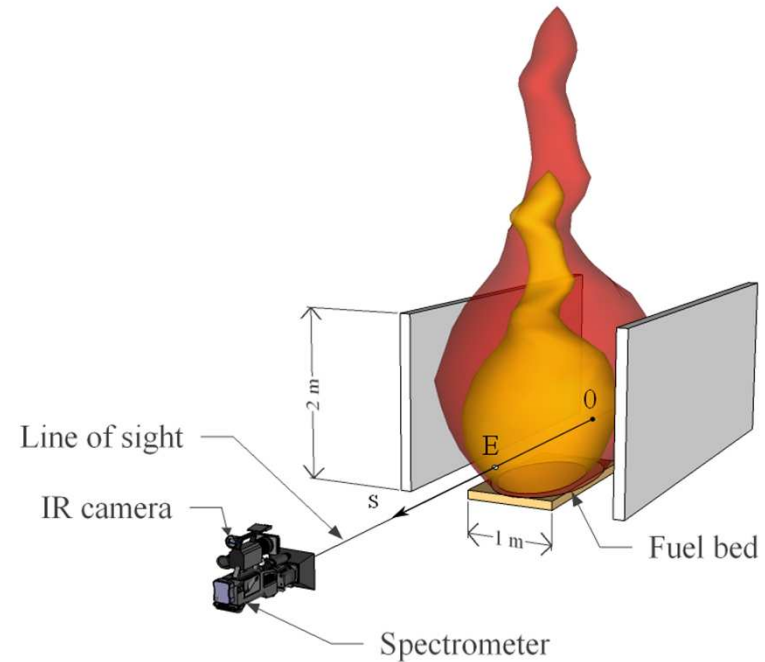
$$\kappa_\nu^{soot} = 5.5 \times 10^4 Y_{soot} \nu$$

[Siegel et Howell, 1992]

$$i = H_2O, CO_2, CO$$

SNB [Malkmus, 1967] + Base de données [Soufiani et Taine, 1997]

$$I_\nu = I_\nu(E) \times \bar{\tau}_{air}^{\Delta\nu}$$

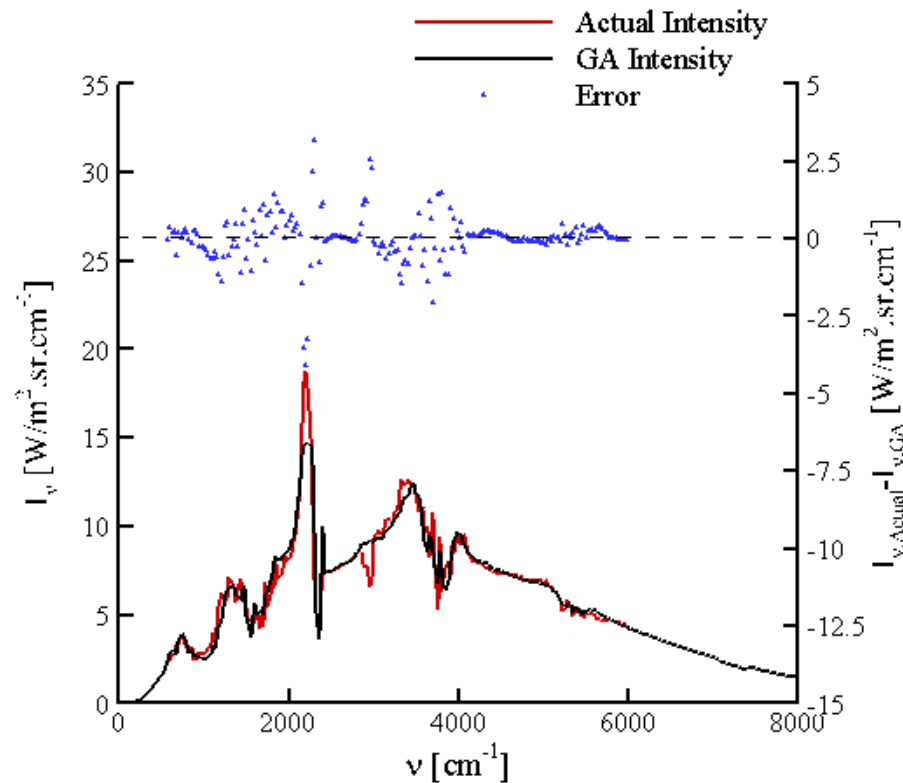


Erreurs de sur-corrélation des spectres!

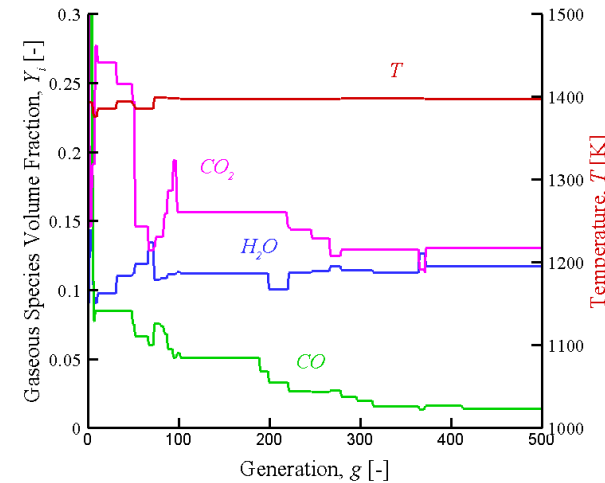
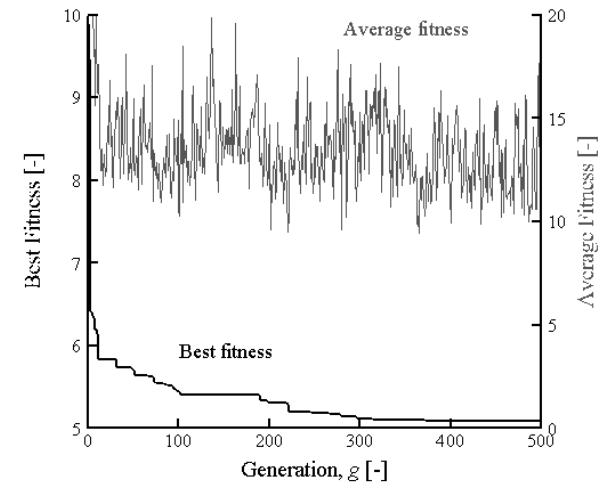
# Méthode: Identification. *Ex: E = 4 m*

## Algorithme Génétique

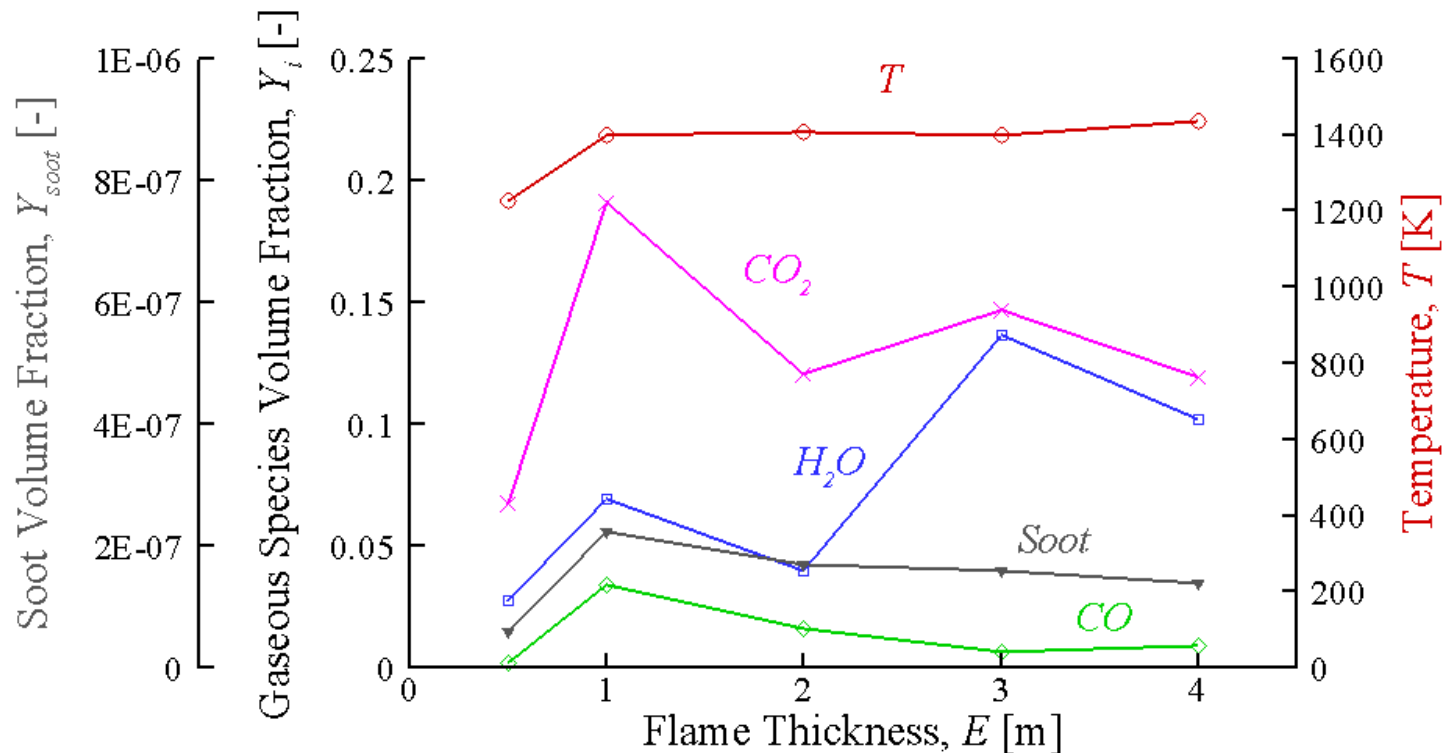
- $I = \{T_{fl}; Y_{H_2O}; Y_{CO_2}; Y_{CO}; Y_{soot}\}$
- Fonction d'évaluation: 'norme 1'
- Sélection: 'roulette biaisée'



## Convergence



# Résultats, milieu effectif



- Température et concentration en suies → relativement constant
    - Dioxyde de carbone = Espèce majoritaire
    - Monoxyde de carbone = Espèce minoritaire
- Ordres de grandeur en accord avec la littérature (peu de données)

# Milieu hétérogène

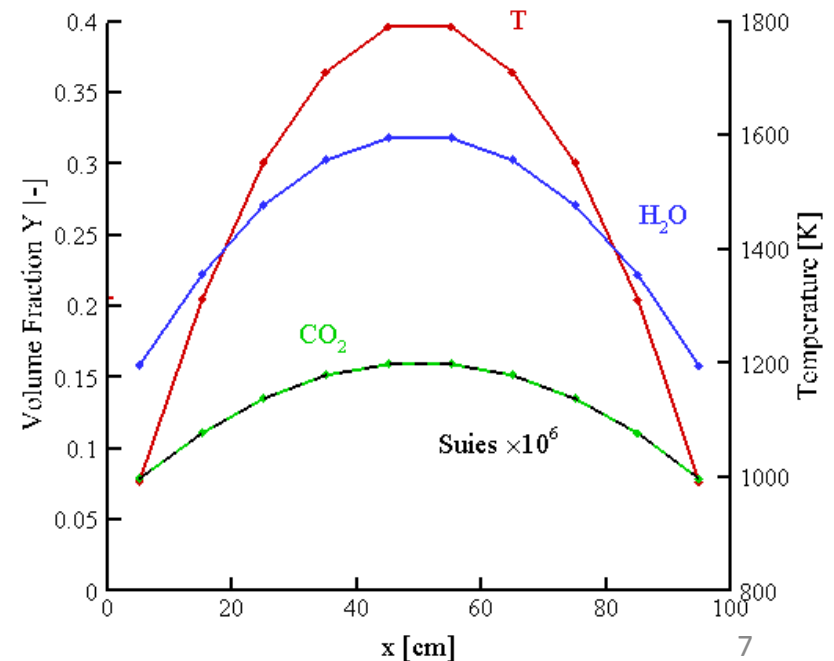
$$\bar{I}_v(s) = \bar{I}_v(0)\bar{\tau}_v(0, s) + \sum_{i=1}^N I_v^b(T_i) [\bar{\tau}_v(i+1, s) - \bar{\tau}_v(i, s)]$$

- $N$  : Nombre de colonnes élémentaires homogènes et isothermes.
- $\bar{\tau}_v$  : Approx. de CG + modèle SNB

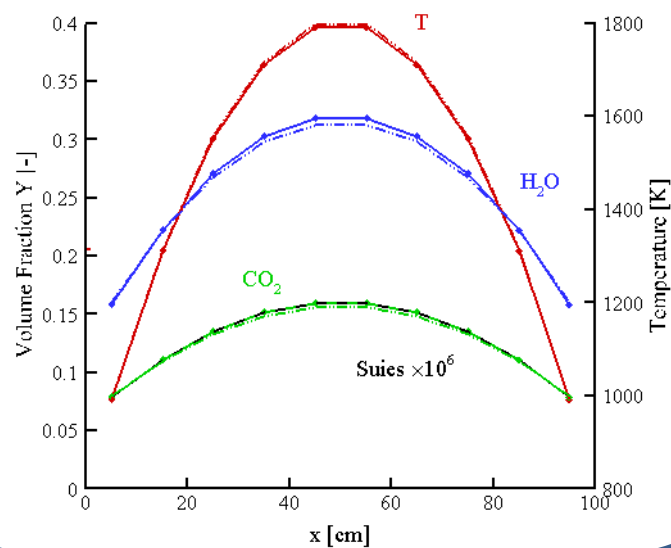
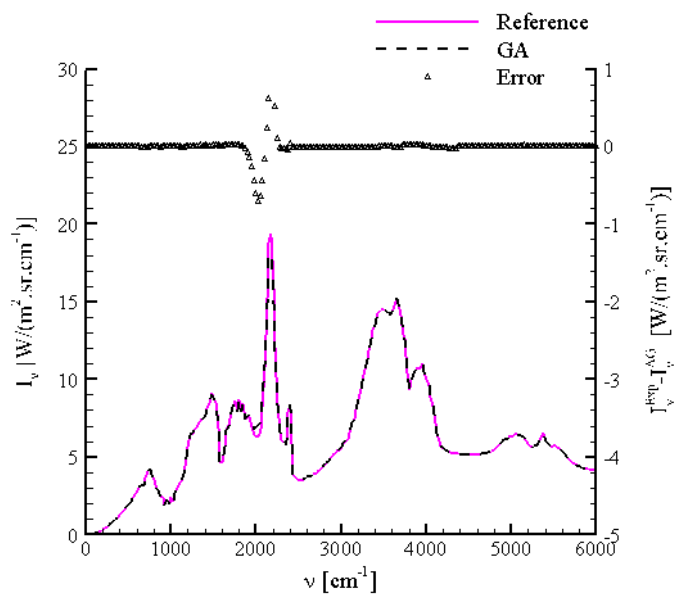
Cas test [Bressloff, 1999],  $L = 1m$

$$\phi(x) = \phi_{\min} + 4 \frac{(\phi_{\max} - \phi_{\min})}{L^2} x(L - x)$$

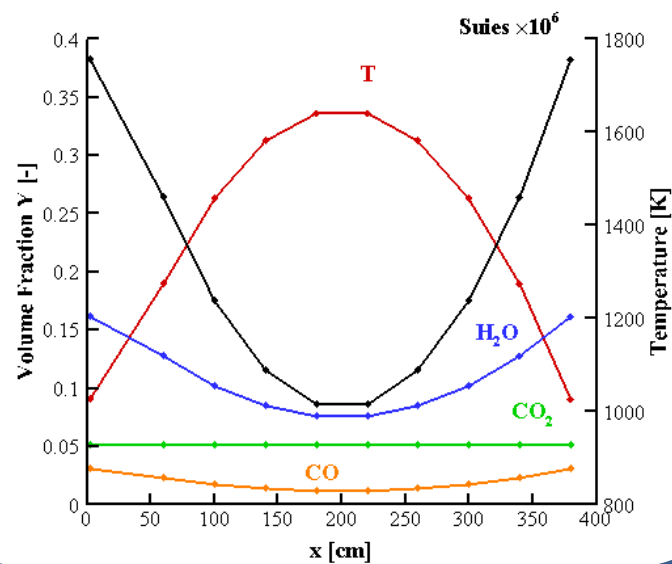
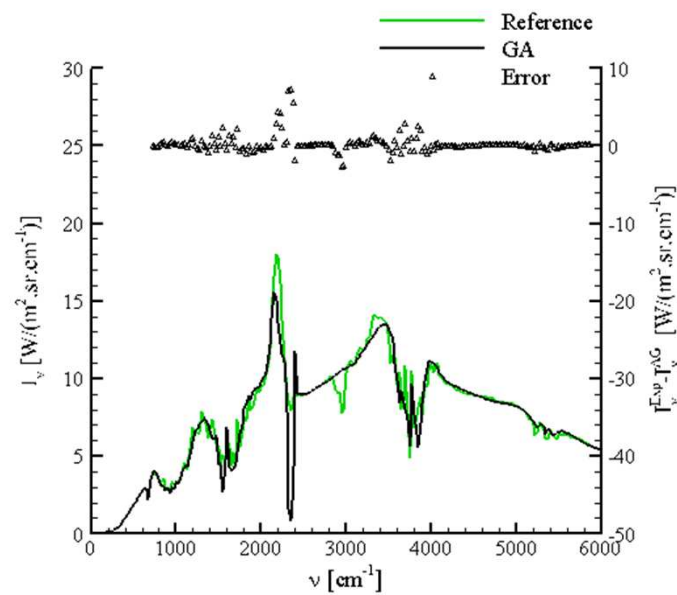
Param.	Min	Max
$T$	800	1800
$Y_{H_2O}$	0.12	0.32
$Y_{CO_2}$	0.06	0.16
$Y_{soot}$	$6 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$



# Cas test

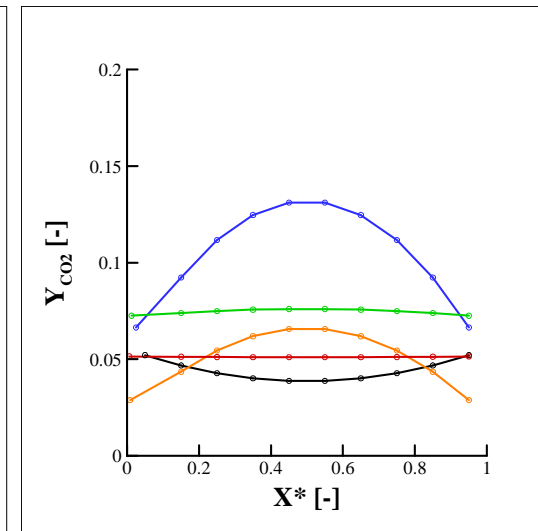
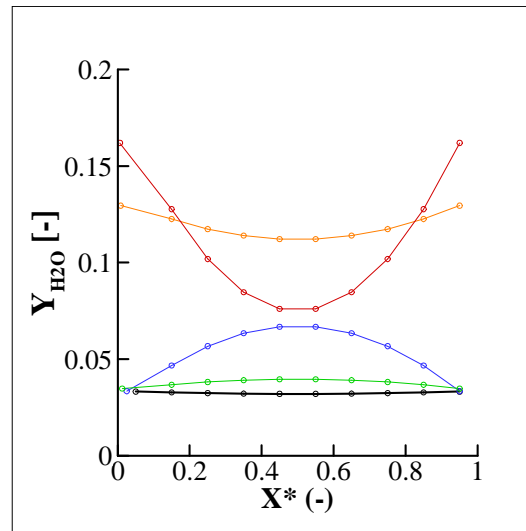
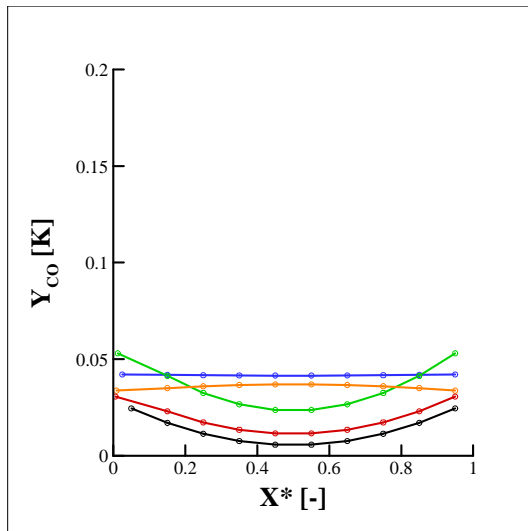
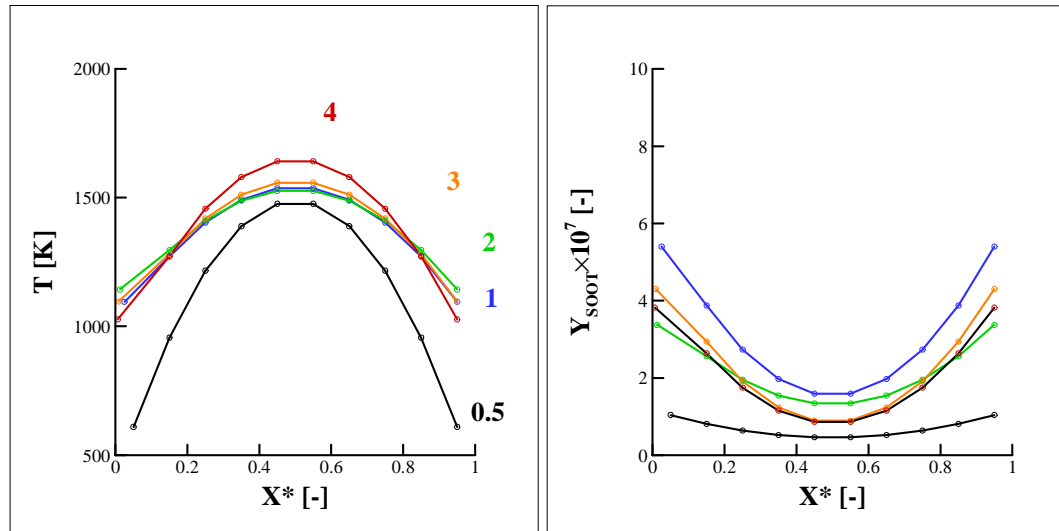


# Flamme de 4 m

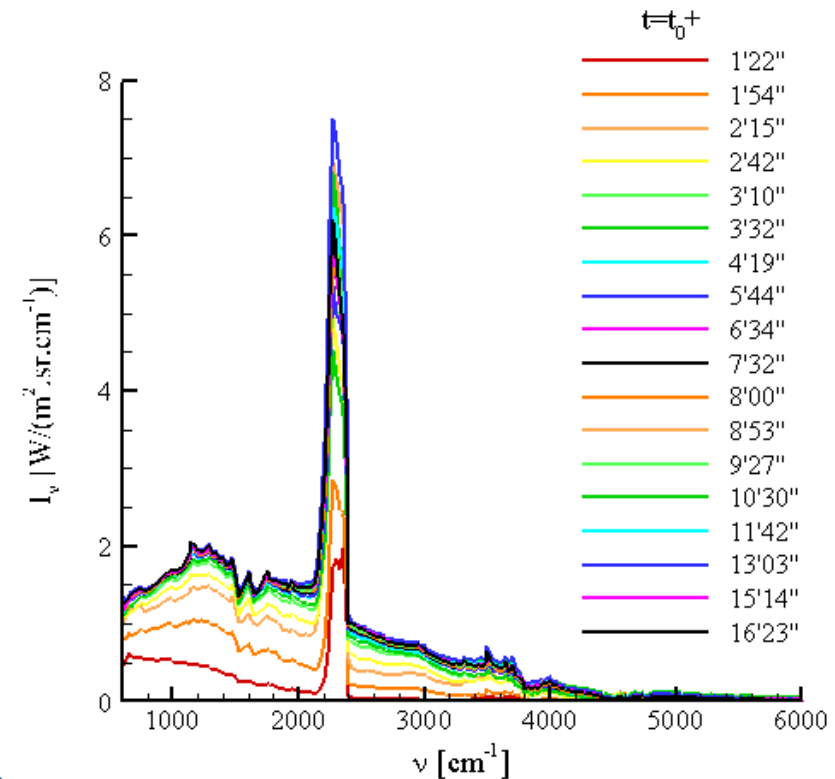
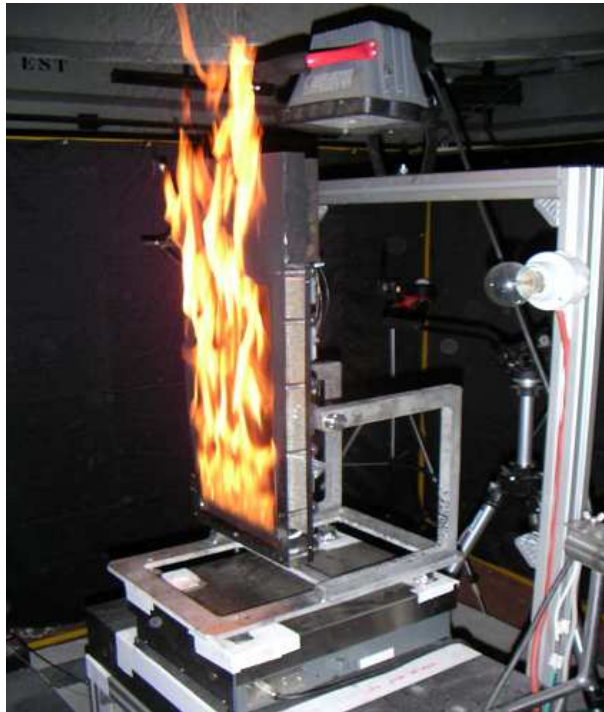




# Résultats, milieu hétérogène



# Plaques de PMMA (poly-méthacrylate de méthyle)



## Combustible

- Plaque de PMMA ( $50 \times 20 \times 3 \text{ cm}$ )
  - $E = 2 \text{ cm}$

## Spectromètre FTIR

- Gamme:  $1000 \text{ à } 6000 \text{ cm}^{-1}$ 
  - Résolution:  $4 \text{ cm}^{-1}$
- Zone visée: centre de la plaque

## Mesures

- Spectres instantanés
- Comportement  $\neq$  CN ou CG
- Etat stationnaire  $\rightarrow$  spectres se superposent ( $t > 4 \text{ min}$ )
- Rayonnement mixte?

# Méthode: Modélisation

$$\frac{dI_\nu}{ds} + \kappa_\nu I_\nu = \kappa_\nu I_{b\nu}(T)$$

$$I_\nu(E) = \epsilon_\nu^w I_\nu^{b,w} e^{-\kappa_\nu E} + I_\nu^{b,f} (1 - e^{-\kappa_\nu E})$$

$$\epsilon_\nu^w \sim 0.93$$

$$500 < \nu < 5000 \text{ cm}^{-1}$$

[Forsth, 2010]

$$e^{-\kappa_\nu E} = \bar{\tau}_{soot}^{\Delta\nu} \prod_{i=1}^{n_{sp}} \bar{\tau}_i^{\Delta\nu}$$

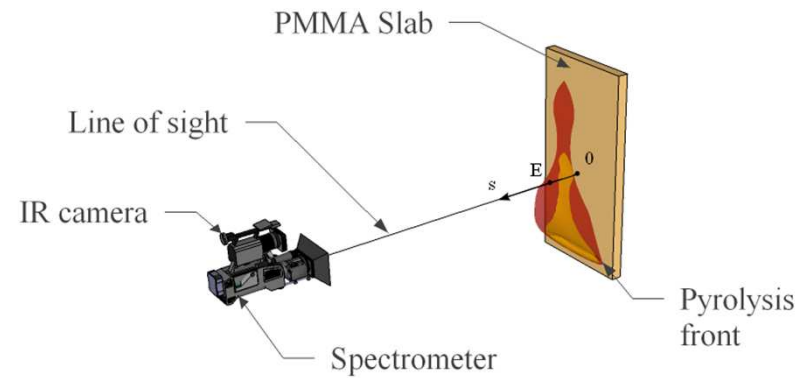
$$\bar{\tau}_{soot}^{\Delta\nu} = 1 - e^{-\kappa_\nu^{soot} E}$$

$$\kappa_\nu^{soot} = 5.5 \times 10^4 Y_{soot} \nu$$

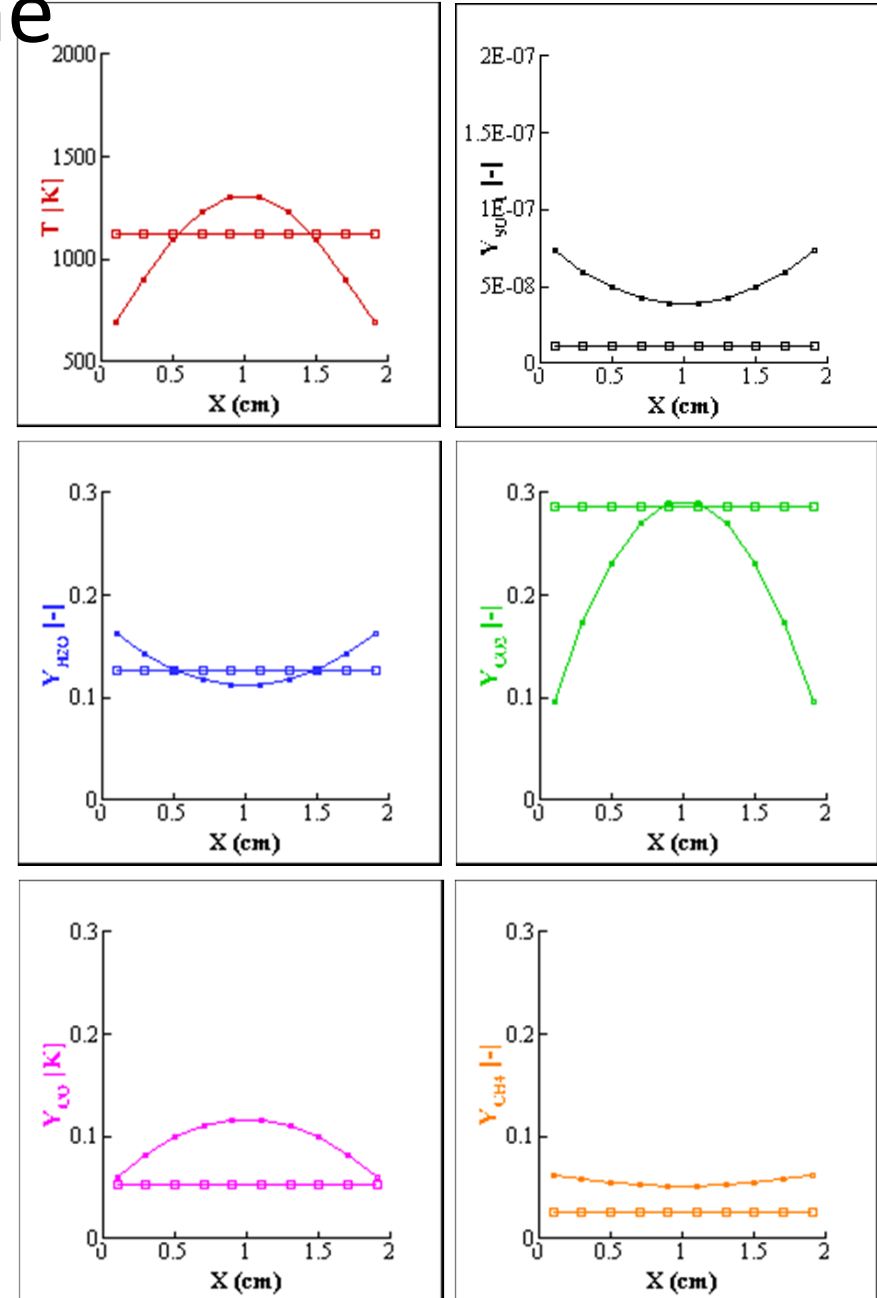
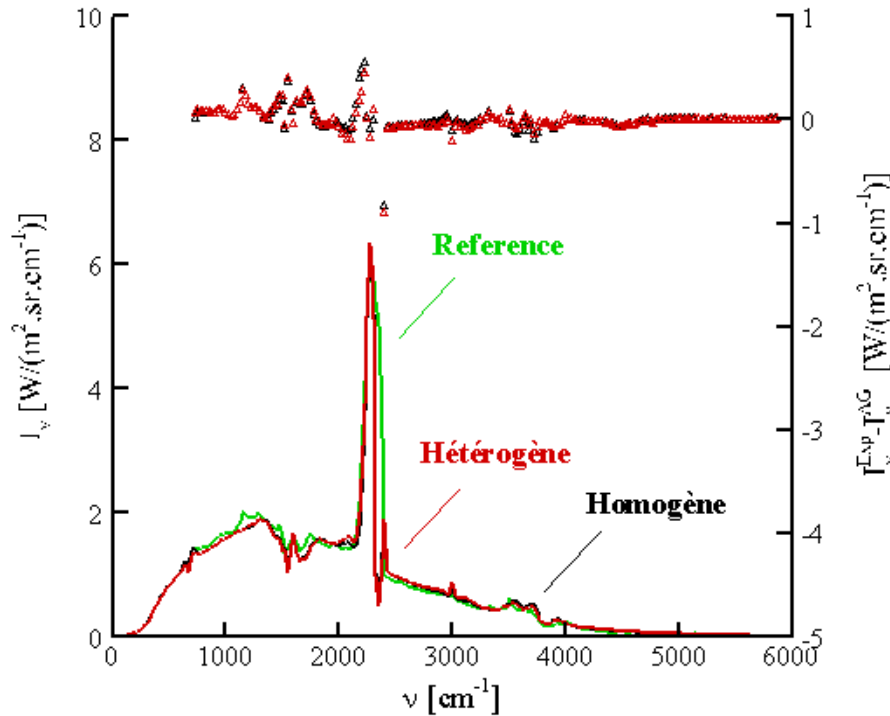
[Siegel et Howell, 1992]

$i = H_2O, CO_2, CO, CH_4$   
 SNB [Malkmus, 1967] + Base de données [Rivière et Soufiani, 2012]

$$I_\nu = I_\nu(E) \times \bar{\tau}_{air}^{\Delta\nu}$$



# Homogène vs Hétérogène



- Faible  $\neq$  entre les 2 estimations
- $T_w = 693\text{K}$  (!)  $\rightarrow$  contribution radiative des suies très faible
- $\min < T, H_2O, CO_2, CO < \max \rightarrow$  hypothèse 'milieu homogène' pertinente?

# Conclusions (✓) et Perspectives (○)

- ✓ Hypothèse de milieu **homogène** permet d'identifier des **données effectives**.

Ces données peuvent être utilisées pour des calculs de propagation, à condition d'utiliser le même modèle que celui qui a permis de les identifier.

- ✓ L'approximation de Curtis-Godson va peut être permettre de caractériser plus finement la flamme à condition de **fixer a priori la forme du profil**.

- ✓ Pour la plaque de PMMA, la faible teneur en suie trouvée met en défaut certains modèles de pyrolyse où le flux radiatif venant de la flamme est **surestimé**. Il semble que dans ce cas la convection est prédominante.

- Essayer **d'autres profils** (Gaussienne, bi-Gaussienne, etc...)
- Améliorer la **précision** du modèle: SNB 4  $cm^{-1}$  ou LBL?
- Cartographier la flamme (différentes hauteurs).

# Merci de votre attention

Pour plus d'informations :

- André, F., Vaillon, R., Ayranci, I., Escudié, D., and Selçuk, N. (2004) Radiative Transfer Diagnostic Technique of Sooting Flames from Emission Spectroscopy. *Radiat. Transfer-IV, Proc. Int. Symp. Radiat. Transfer*, 4th, Istanbul, Turkey, 1, 435.
- Billaud, Y., Boulet, P., Pizzo, Y., Parent, G., Acem, Z., Kaiss, A., Collin, A., and Porterie, B. (2012) Determination of woody fuel flame properties by means of emission spectroscopy using a genetic algorithm, *Combustion Science and Technology*.
- Boulet, P., Parent, G., Acem, Z., Kaiss, A., Billaud, Y., Porterie, B., Pizzo, Y., and Picard, C. (2011) Experimental Investigation of Radiation Emitted by Optically Thin to Optically Thick Wildland Flames. *J. Combust.*, ID 137437, 1.
- Lautenberger, C., Rein, G., and Fernandez-Pello, C. (2006) The Application of a Genetic Algorithm to Estimate Material Properties for Fire Modeling from Bench-Scale Fire Test Data. *Fire Saf. J.*, 41, 204.
- Rivière, P., and Soufiani, A. (2012) Updated band model parameters for H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and CO radiation at high temperature. *Int. J. of Heat and Mass Trans.*, 55.