# Evaluation des flux de chaleur mis en jeu lors de la combustion de plaques thermiquement épaisses de PMMA







**ETIC** 

Y. Pizzo, N. Giraud, P. Mindykowski, A. Kaiss, Y. Billaud, B. Kadoch et B. Porterie

C. Lallemand



P. Boulet, Z. Acem

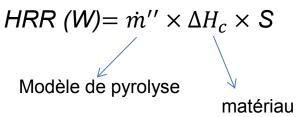


A. Kacem, S. Suard



Soutien: ANR-12-ASRT-0002-01.

Puissance du feu, débit massique surfacique de pyrolyse de la source





Nécessité d'estimer avec précision de débit→ capacité prédictive des codes incendie

#### Etude d'un modèle de dégradation basé sur un bilan énergétique complet

Quantification de l'ensemble des flux de chaleur mis en jeu lors de la combustion stationnaire d'une plaque verticale de PMMA

- → améliorer notre connaissance des mécanismes impliqués dans le processus de dégradation thermique des matériaux solides
- → acquérir des données utiles à la validation des modèles de pyrolyse

Matériau et configuration de référence :

- Clear PMMA
- → sublimation, no-charring, propriétés thermophysiques connues
- Plaque plane thermiquement épaisse positionnée verticalement
- → existence d'une solution analytique, largement étudiée dans la littérature (grande dispersion des résultats )

### Bilan énergétique au niveau de l'interface combustible/gaz

$$q_{fl}^{conv} + (1-r) q_{fl}^{rad} + \dot{m}'' \left( \int_{T_0}^{T_0} dT + L_{mel} \right)$$

$$convection \\ de la flamme$$
 rayonnement 
$$de la flamme$$
 rayonnement 
$$de la flamme$$
 
$$a la surface par le PMMA solide$$

$$= q_{rr} + q_{ia}^{cond} + q_{id}^{rad} + \dot{m}'' \left( \int_{T_0}^{T_0} dT + L_{mel} + L_{pyr} \right)$$

$$= q_{rr} + q_{ia}^{cond} + q_{id}^{rad} + \dot{m}'' \left( \int_{T_0}^{T_0} dT + L_{mel} + L_{pyr} \right)$$

$$= q_{re} + q_{ia}^{cond} + q_{id}^{rad} + \dot{m}'' \left( \int_{T_0}^{T_0} dT + L_{mel} + L_{pyr} \right)$$

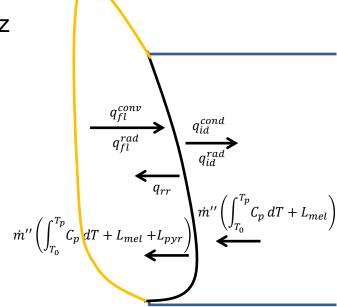
$$= q_{re} + q_{ia}^{cond} + q_{id}^{rad} + \dot{m}'' \left( \int_{T_0}^{T_0} dT + L_{mel} + L_{pyr} \right)$$

$$= q_{re} + q_{ia}^{cond} + q_{id}^{rad} + q_{id}^{rad} + \dot{m}'' \left( \int_{T_0}^{T_0} dT + L_{mel} + L_{pyr} \right)$$

$$= q_{re} + q_{re}^{cond} + q_{id}^{rad} + q_{id}^{rad$$

Bilan simplifié 
$$q_{fl}^{conv}+(1-r)q_{fl}^{rad}=q_{rr}+\dot{m}^{\prime\prime}L_{pyr}$$

$$L_{pyr} = 1-2 \; MJ/kg$$



#### Combustion stationnaire, solide infiniment épais (Orloff et al., 1976):

conduction et rayonnement net dans le matériau solide

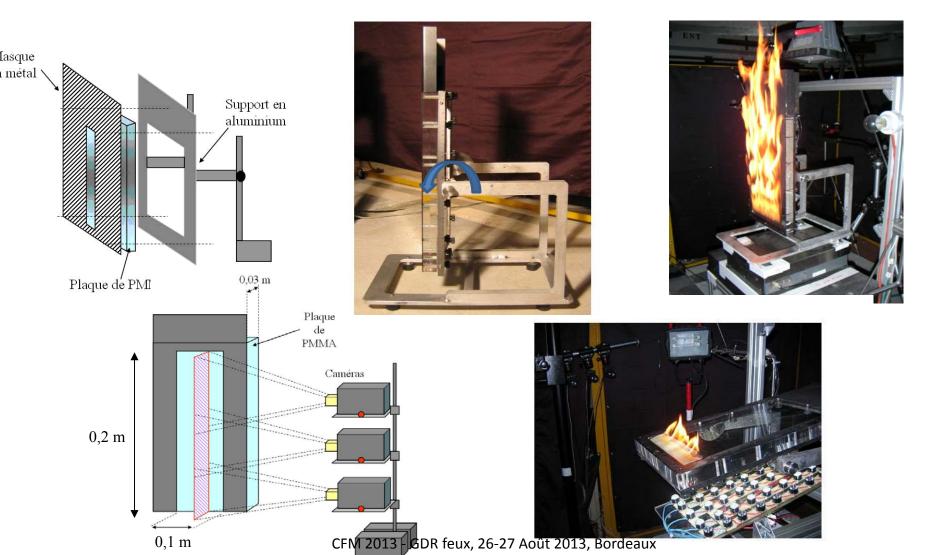
$$\frac{q_{fl}^{conv}}{convection} + \underbrace{(1-r)q_{fl}^{rad}}_{rayonnement} + \underbrace{\dot{m}''\left(\int_{T_0}^{T_p}C_p\,dT + L_{mel}\right)}_{flax\;apport\acute{e}} \\ \dot{a}\;la\;surface\;par\;le\;PMMA\;solide} \\ = q_{rr} + \underbrace{q_{id}^{cond}}_{re\acute{e}mission\;par} + \underbrace{q_{id}^{rad}}_{la\;surface} + \underbrace{\dot{m}''\left(\int_{T_0}^{T_p}C_p\,dT + L_{mel} + L_{pyr}\right)}_{flux\;\acute{e}vacu\acute{e}\;par} \\ \dot{f}\;lux\;\acute{e}vacu\acute{e}\;par}_{les\;vapeurs\;de\;PMMA} \\ loin\;de\;la\;surface}$$

Bilan simplifié 
$$q_{fl}^{conv} + (1-r)q_{fl}^{rad} = q_{rr} + \dot{m}^{\prime\prime} L_g$$

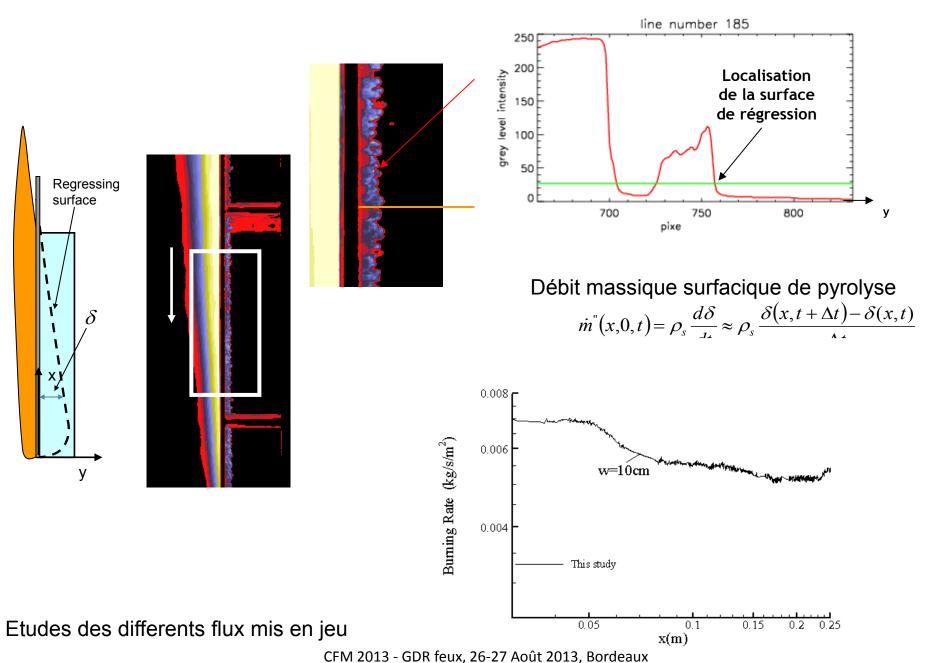
$$L_g = \int_{T_0}^{T_p} c_p(T) dT + L_{mel} + L_{pyr}$$

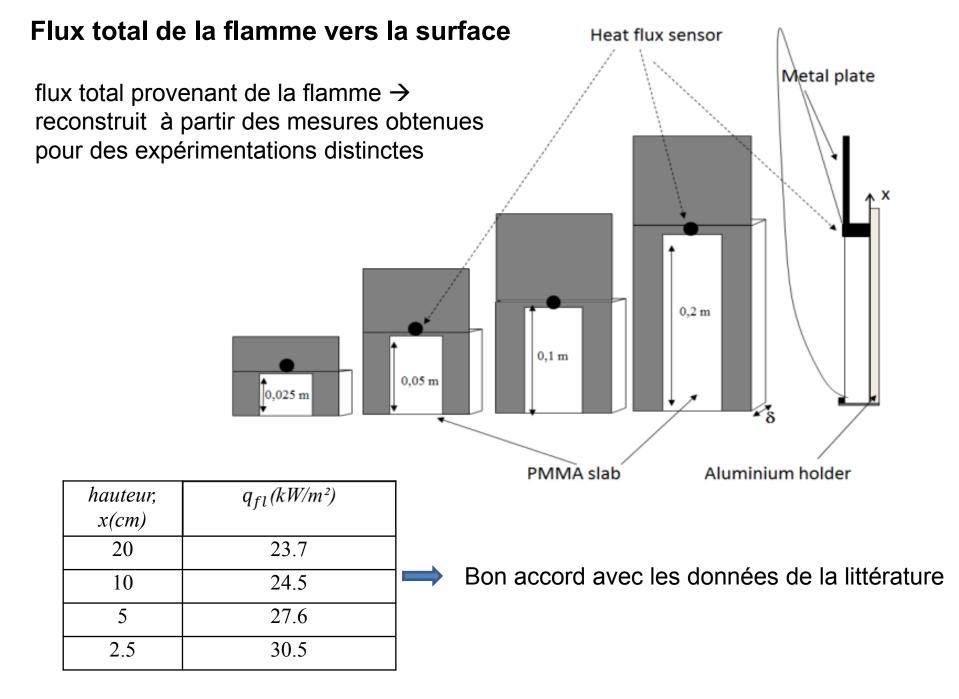
#### Configuration retenue, dispositif expérimental et instrumentation

- ✓ Plaque plane PMMA (10 cm de large, 3 cm d'épaisseur, 20 cm de hauteur)
- ✓ Masque acier definissant la zone de pyrolyse, socle aluminium rotatif
- ✓ Allumage en partie basse (barreau chauffant)
- ✓ Balance de précision, caméras CCD\*, thermocouples, fluxmètres total et radiatif (Captec)

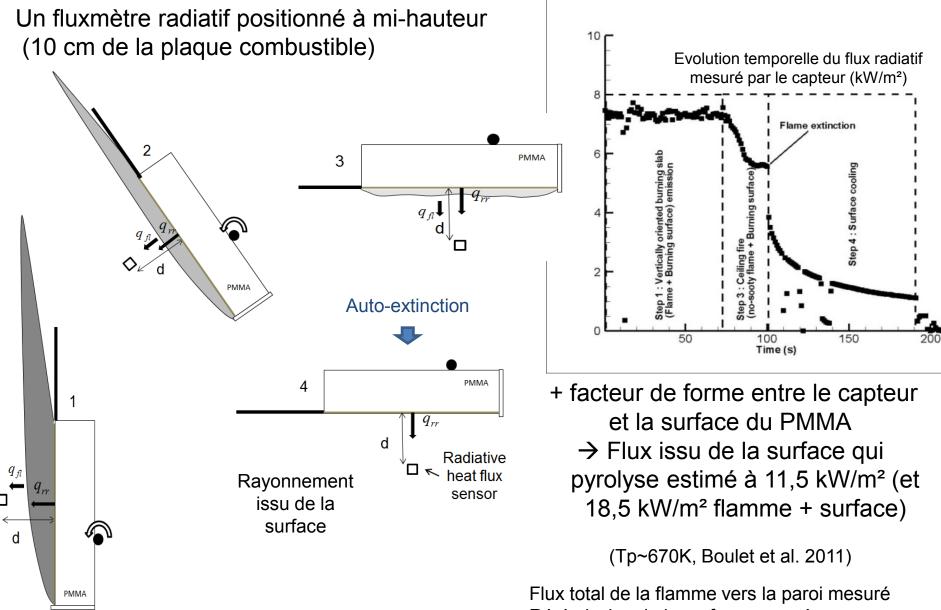


#### Débit massique surfacique de pyrolyse le long de la plaque combustible (rappel)





Ré-émission de la surface : procédure d'auto-extinction

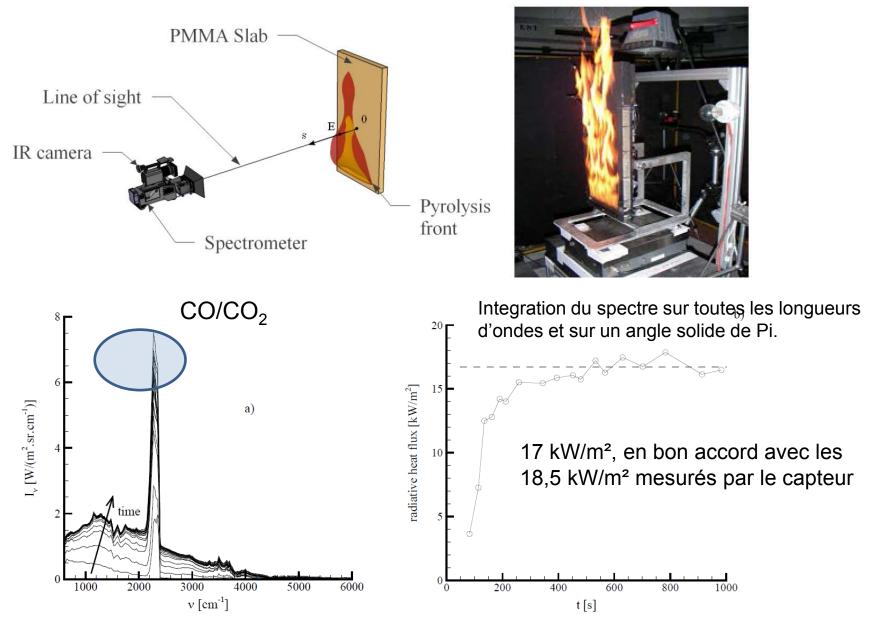


+ le flux réémis par la surface

Rayonnement de la flamme vers l'environnement

Ré-émission de la surface mesurée .

#### Mesures complementaires: FTIR et caméra multispectrale (LEMTA, Nancy)

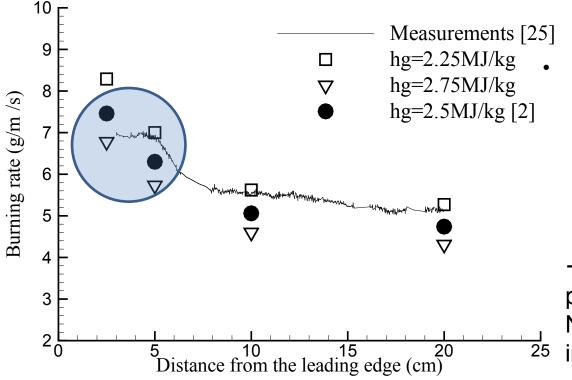


Fond continu (plaque qui rayonne comme un coprs noir) autour de 12 kW/m²

#### Débit massique surfacique de pyrolyse (bilan simplifié vs. Exp.)

ĺ	x (cm)	<i>ṁ</i> déduit de Eq.	<i>m</i> mesuré [9]	Erreur relative (%)	$L_g = 2500  kJ/kg$
		(3)   g/	m²/s		
	20	4.74	5.10	-7.06	
-	10	5.06	5.50	-8.00	→ Bon accord
	5	6.30	6.90	-8.70	Sans s'intéresser aux
	2.5	7.46	7.00	+6.57	pertes internes

Influence de la chaleur de gazéification sur le débit local de pyrolyse stationnaire



Près du bord d'attaque :
contribution convective → valeur plus
élevée de la chaleur de gazéification
(L<sub>g</sub>=2.75 MJ/kg)
De wilde, 1988:

Radiative heating: 1300-1700 (kJ/kg) Convective heating: 2500-2700 (kJ/kg)

→ Extension à la phase de préchauffage (instationnaire) → Nécessité de s'intéresser aux pertes internes

8

#### Pertes internes dans le matériau solide : modèle numérique

La procedure consiste à résoudre l'équation 1D de transfert couplés conduction / rayonnement (hypthèse de propriétés thermophysiques du PMMA constantes), l'équation de la chaleur prend la forme :

 $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \vec{\nabla} \cdot \vec{q}$ 

L'approximation de Schuster-Schwarzschild pour un milieu 1D, non gris, absorbant / diffusant

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{q} = \int_0^\infty \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_{\eta} \, d\eta = \int_0^\infty \left( \frac{dq_{\eta}^+}{dy} - \frac{dq_{\eta}^-}{dy} \right) d\eta$$

$$+\frac{dq_{\eta}^{+}}{dy} = 2\kappa_{\eta} \left( E_{b\eta} - q_{\eta}^{+} \right)$$

$$-\frac{dq_{\eta}^{-}}{dy} = 2\kappa_{\eta} \left( E_{b\eta} - q_{\eta}^{-} \right)$$

 $E_{b\eta}$  (W/m) est l'émissivité spectrale du corps noir à la température T

Arrhenius pour le calcul du débit de pyrolyse

Propriétés radiatives 14 bandes de kulkarni, brehob, monohar, Nair, 1994→Boulet et al. 7668 bandes

Validation : 2 températures dans le matériau, position de l'interface et perte de masse

#### Pertes internes dans le matériau solide : modèle numérique

Conditions aux limites au niveau de la surface exposée "noire" (y = s(t)):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y}(s,t) = q_{fl}^{rad} + q_{fl}^{conv} - E_b^{air}(T_s) - E_b(T_s) + q^-(s) - \dot{m}(L_{pyr})$$

Bilan complet précédent

$$q_{\eta}^{+}(s) = E_{b\eta}(T_{s}) = \sigma T_{s}^{4}$$

$$T_{s} = T(s, t)$$

$$q^{-}(s) = \int_{0}^{\infty} q_{\eta}^{-}(s) d\eta$$

$$E_{b}(T_{s}) = \int_{0}^{\infty} E_{b\eta}(T_{s}) d\eta$$

$$E_{b}^{air}(T_{s}) = \int_{0}^{\infty} E_{b\eta}^{air}(T_{s}) d\eta$$

Conditions aux limites au niveau de la face arrière "claire" (y = L):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y}(L,t) = q_0^{conv}$$
$$q_{\eta}^{-}(L) = \varepsilon_{\eta} E_{b\eta}(T_0)$$

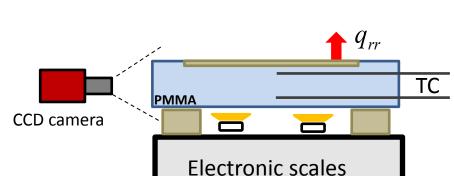
Configuration de référence (10 x 10 x 3 cm<sup>3</sup>) : non flaming ( $q_{cc} < q_{cri}$ ), plaque plane verticale

soumise à un flux radiatif calibré

2 flux imposés (14 et 18 kW/m²), avec et sans suies à la surface l'échantillon (représentatif de la propagation)

Perte de masse et position de l'interface combustible / gaz

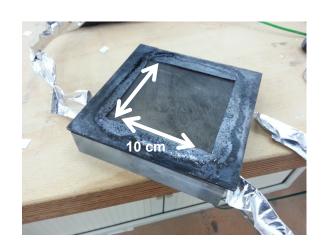
 Températures à deux profondeurs dans le matériau (2 TC, 5 mm avant et 5 mm arrière)

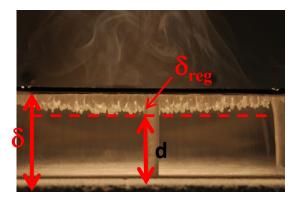


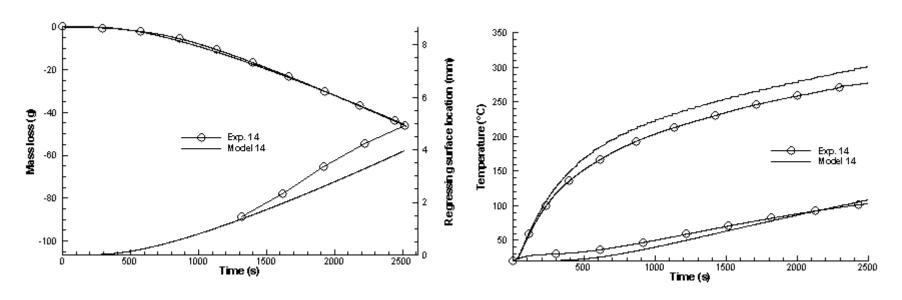
 $q_{CC}$ 

Cone

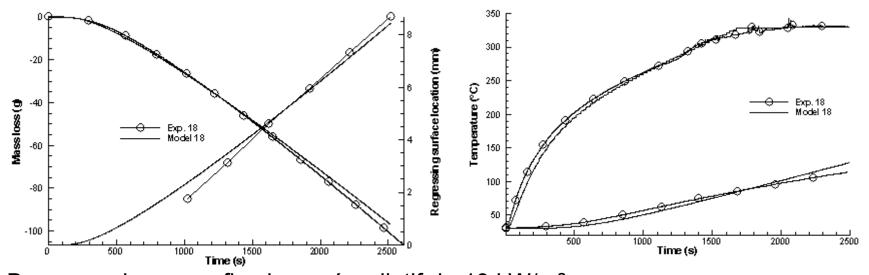
Calorimeter







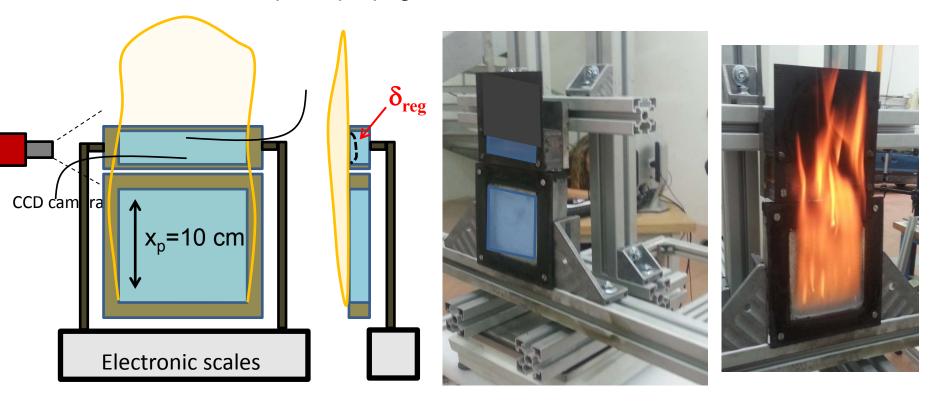
Bon accord pour un flux imposé radiatif de 14 kW/m²



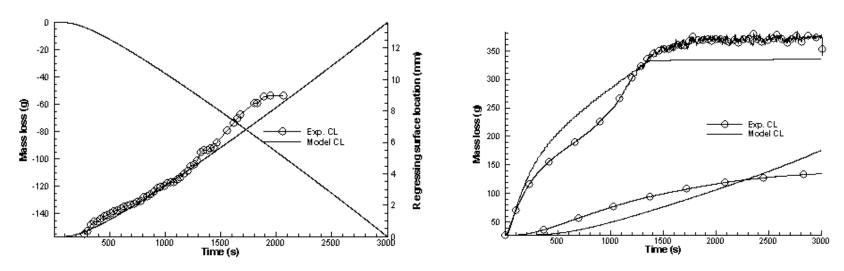
Bon accord pour un flux imposé radiatif de 18 kW/m²

Configuration de référence (10 x 10 x 3 cm<sup>3</sup>) avec flamme :

Difficulté à s'affranchir de la phase propagative → developpement d'une flamme stationnaire → qui se propage sur un échantillon instrumenté.



- Position de l'interface combustible / gaz
- Températures à deux profondeurs dans le matériau (5mm de l'avant, et 5 mm l'arrière)



Bon accord pour un flux imposé représentatif de la flamme (x<sub>p</sub>=10 cm)

Flux radiatif de 14 kW/m<sup>2</sup>,  $h_{conv} = 10$  et  $T_{flamme} = 1100$  °K.

#### Conclusion

- Bon accord concernant les debits massiques surfaciques calculés (bilan simplifié) et obtenus par mesure directe
- → Conformément à Orloff et al. 1976, les pertes internes n'ont pas à être considérées dans une phase de combustion stationnaire
- Extention du modèle à la phase de instationnaire de combustion et à la phase de préchauffage
  - → Etude détaillée des pertes internes (modèle 2 flux, spectral)
  - → Propriétés spectrales du PMMA, 7668 bandes (LEMTA, Nancy)
  - → Validation du modèle de dégradation sans flamme pour 14 et 18 kW/m²
  - $\rightarrow$  Validation du modèle de dégradation avec flamme à  $x_p = 10$  cm

#### Estimation analytiques des pertes internes

$$C_p = 2000 \, J/kg \qquad \qquad \dot{m}'' \times (L_{mel} + \int_{T_0}^{T_p} C_p(T) dT) = q_{id}^{cond} + q_{id}^{rad}$$
 
$$L_{mel} + \int_{T_0}^{T_p} C_p(T) dT = 950 \, kJ/kg \qquad \qquad m^{\cdot \prime \prime}_{moyen} = 0,0055 \, kg/m^2/s$$
 
$$\dot{m}'' h_{ng} = 5150 \, W/m^2$$
 
$$q_{id}^{cond} + q_{id}^{rad} \approx 5kW/m^2$$

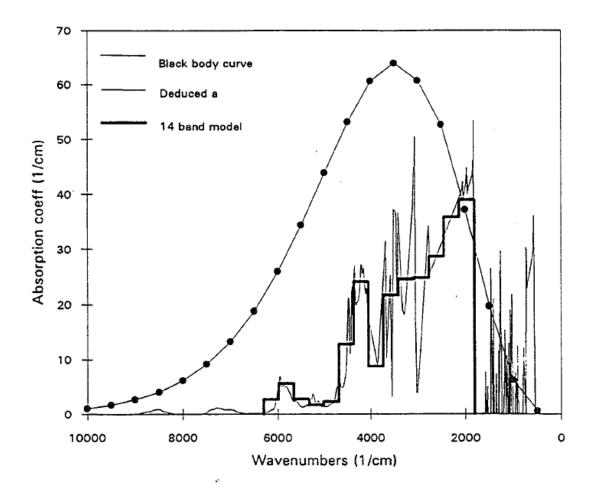


Figure D4: Spectral absorption coefficient and the 14 band model. The superimposed blackbody curve shows the distribution of energy in this wavenumber regime