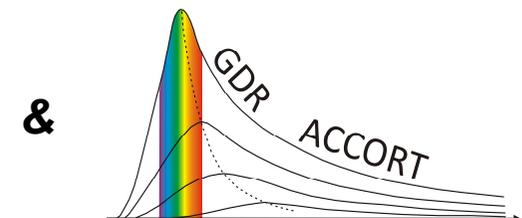
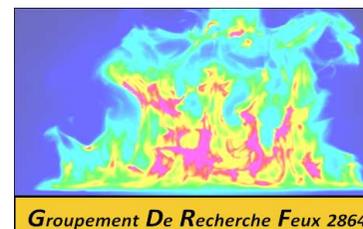


## Mesures radiatives lors de la combustion de PMMA

***G. Parent, Y. Pizzo, Z. Acem, P. Mindykowski et col\*...***

**LEMMA – IUSTI / Juillet 2011**



*\* Avec l'aide de A. Collin, P. Boulet, B. Porterie, A. Khaiss, Y. Billaud, A. Normande...*

## 1<sup>er</sup> Objectif : caractériser une flamme de référence

### Contexte : expériences récentes de caractérisation de flammes

- Essais bacs à Nancy, en tunnel au CEREN, en milieu confiné au CSTB
- Potentiel de la méthode avéré sur le plan qualitatif (rôle des suies / gaz)

### Souhait de travailler sur un cas « académique »

- En laboratoire, sur une manip répétable et fiable
- Identifier des propriétés sur un plan **quantitatif**

- **« Observer » la combustion du PMMA, caractériser la flamme (!)**  
**Identifier sa température de pyrolyse (!!)**

**Permettre de réaliser un benchmark?**

**Identifier des propriétés radiatives, mais aussi des concentrations en espèces? des températures?**

## Dispositif expérimental / Méthode (1)

### Visée par caméra et spectro sur une flamme



• « de face » : observation de la plaque à travers une flamme vraiment mince, possibilité de « voir » la plaque avec des filtres adaptés (en « dehors » des gaz)

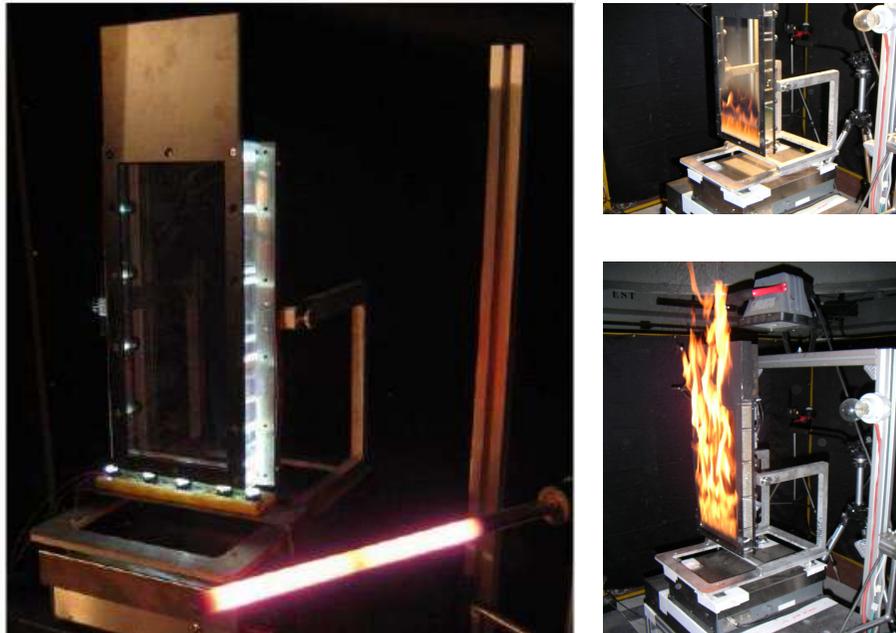
• « de profil », pour des plaques de largeur 5 – 10 – 20 cm (donc des flammes d'épaisseur « contrôlée ») identification de paramètres : concentration et température

• Comparaison avec une source de référence



## Dispositif expérimental / Méthode (2)

### Manip plaque PMMA



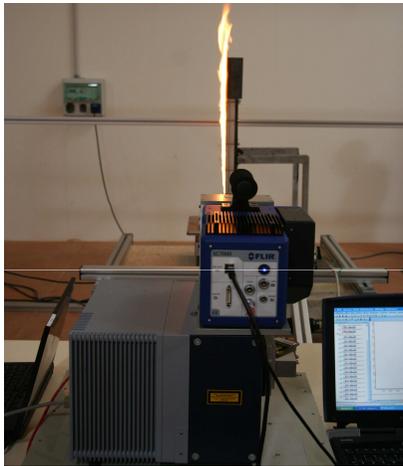
- Allumage par un barreau (résistance électrique) en bas de plaque.
- Répétabilité excellente
- Stabilité apparente de la flamme sur un état stationnaire long (25-30')
- Possibilité de corréler les mesures radiatives à des données de pertes en masse, températures, images de l'avancée du front de pyrolyse (bulles), caractéristiques géométriques de la flamme...

(Thèse Y. Pizzo, 2007)

**Principe : acquisition de spectres d'émission + images IR en simultané à différents instants pendant la combustion de la plaque**

## Dispositif expérimental / Méthode (3)

### Spectro FTIR + caméra



#### Caractéristiques des spectres

de 1000 à 6000  $\text{cm}^{-1}$   
Résolution 4  $\text{cm}^{-1}$

Prise en compte du rayonnement de « fond »  
Comparaison avec rayonnement C.N.

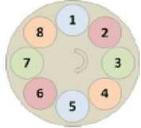
Contexte et Objectifs  
Les résultats tirés d'essais précédents  
Flammes optiquement minces à épaisses  
Bilan, perspectives, références

Les essais de juillet 2010  
Une nouvelle caméra, multispectrale  
Résultats, première analyse  
Peut-on extraire des données ?

### Images infrarouges, une nouvelle caméra multispectrale

Caractéristiques :

- 320 × 256 InSb sensor
- Gamme spectrale [1.5  $\mu\text{m}$  - 5.5  $\mu\text{m}$ ]
- Fréquence jusque 400 Hz
- Temps d'intégration jusque 3  $\mu\text{s}$
- acquisition synchronisée avec une roue à filtres, 8 positions (4 couples de filtres)



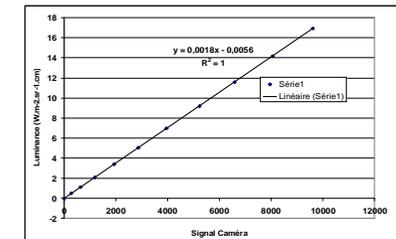
Utilisée avec un délai de 40 ms, images dans 4 bandes : 2.85  $\mu\text{m}$  (émission de  $\text{H}_2\text{O}$ ), 4.25  $\mu\text{m}$  (émission de  $\text{CO}_2$ ), 3.9  $\mu\text{m}$  (pas d'émission de gaz... suies!) et gamme spectrale complète.

Images quasi instantanées !

LEMIA Nancy-Université CNRS GDP, Janvier 2011 8/ 15

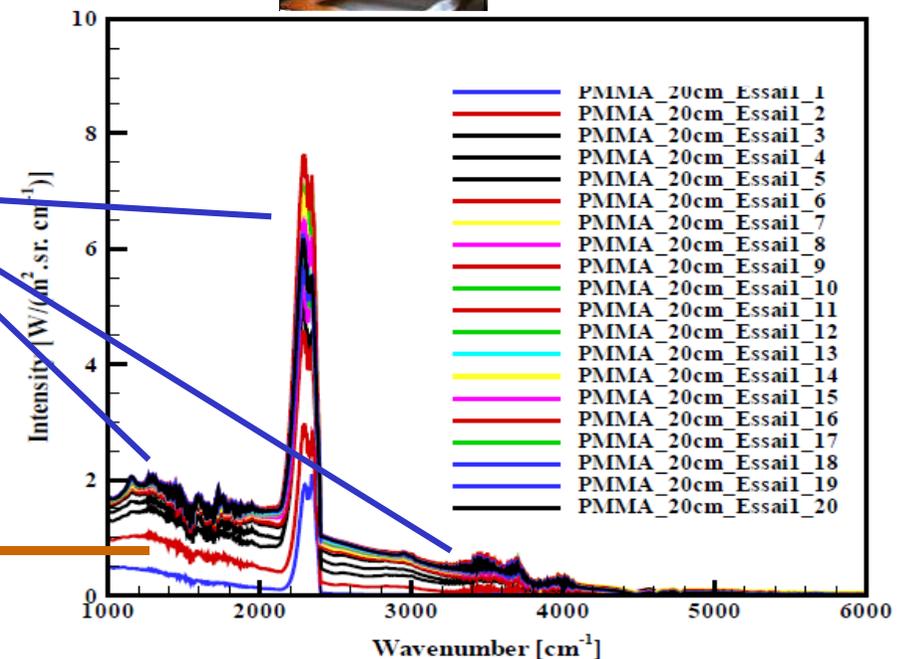
Mieux « ciblé » pour éviter le  $\text{CO}_2$  atmosphérique, à 4,45  $\mu\text{m}$

Luminance = f(signal caméra)  
Etalonnage préalable



## 2<sup>e</sup> Analyse avec le spectromètre FTIR

- Acquisitions successives après allumage / spectre toutes les 30s environ, puis avec un intervalle supérieur à la minute.
- 6 premiers spectres en 3'10 "
- Peu variable ensuite
- Pics liés aux gaz chauds dans la flamme
- + Fond continu dû au rayonnement de la plaque elle-même (suies +/- négligeables?)



## Analyse avec le spectromètre FTIR

Pour mémoire... spectre d'une flamme  
optiquement mince : essentiellement des gaz chauds

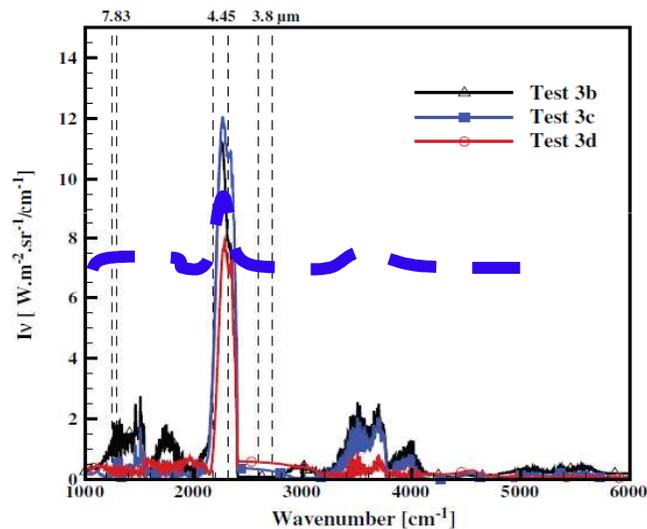
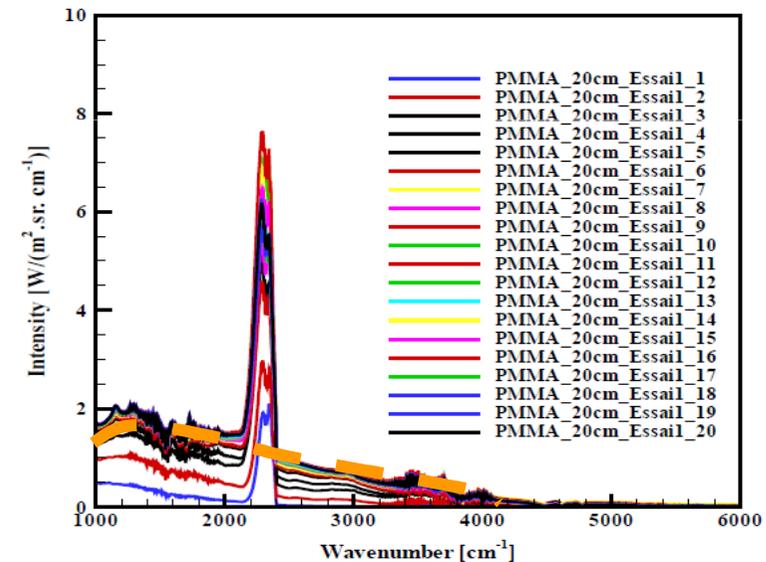


Fig. 4. Spectral intensity emitted in the flame 10 cm above the burning vegetation.

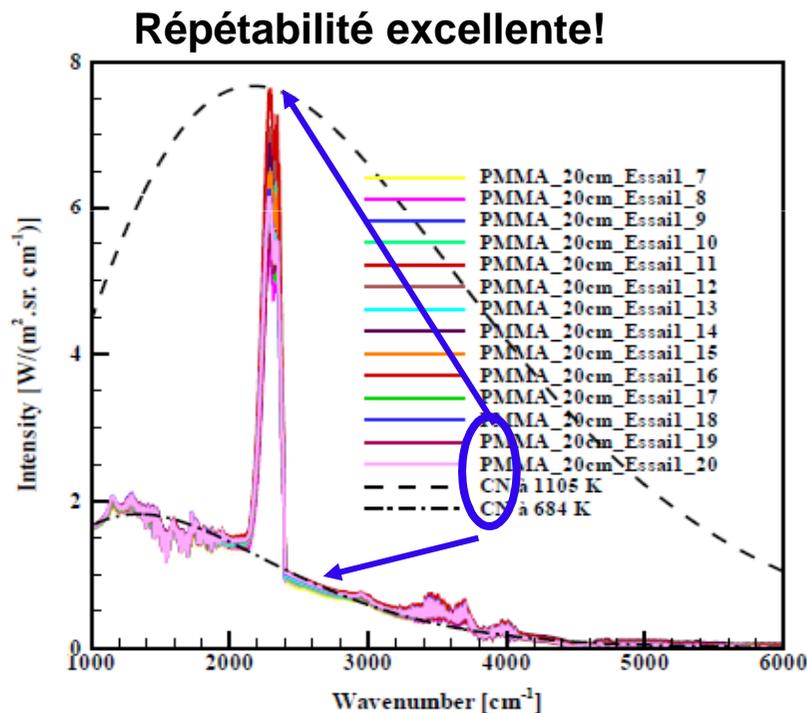
(*extrait de Parent et al. IJTS 2010*)



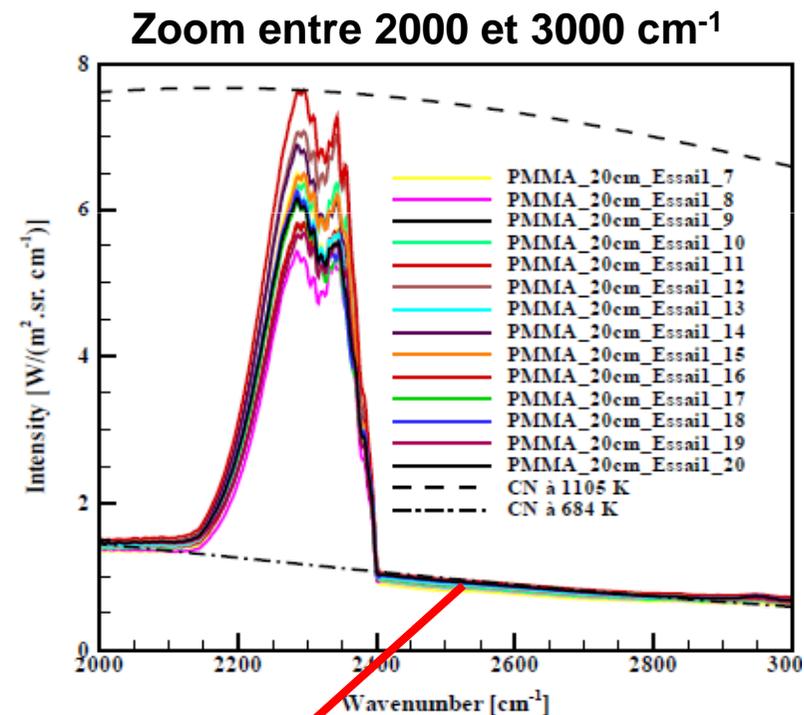
**PMMA : ici on a un net fond continu en plus**

## Analyse avec le spectromètre FTIR

Niveau d'émission en régime établi : des gaz chauds ( $\varepsilon < 1$ ... ils sont plus chauds que 1100 K) et peu de suies (+/-) qui rayonnent devant la plaque qui se décompose



(a) spectres 7 à 20

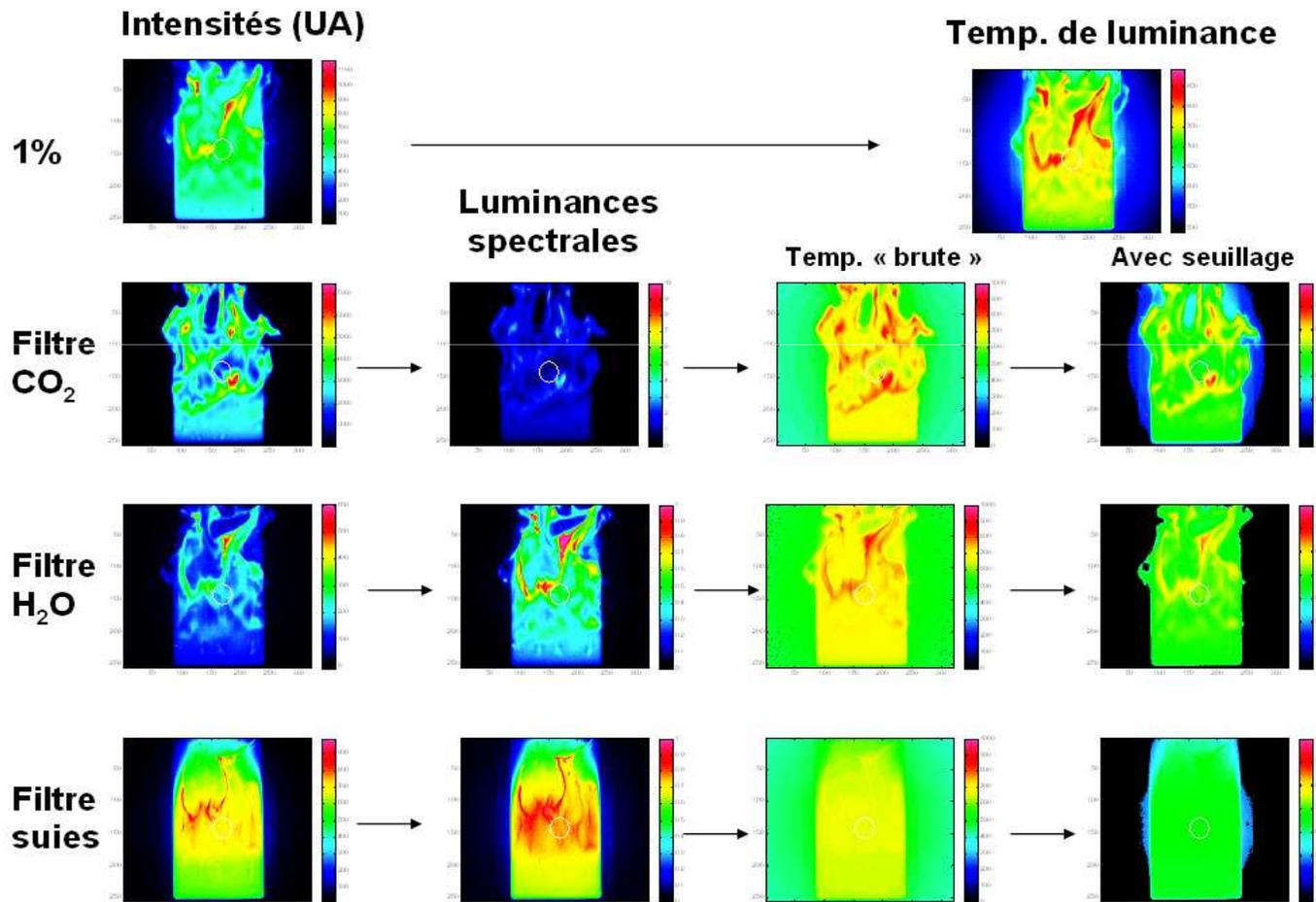


(b) Zoom pic  $CO_2$

La plaque (noire a priori) est à 684 K = temp. de pyrolyse!

### 3<sup>e</sup> Analyse par caméra multi-spectrale

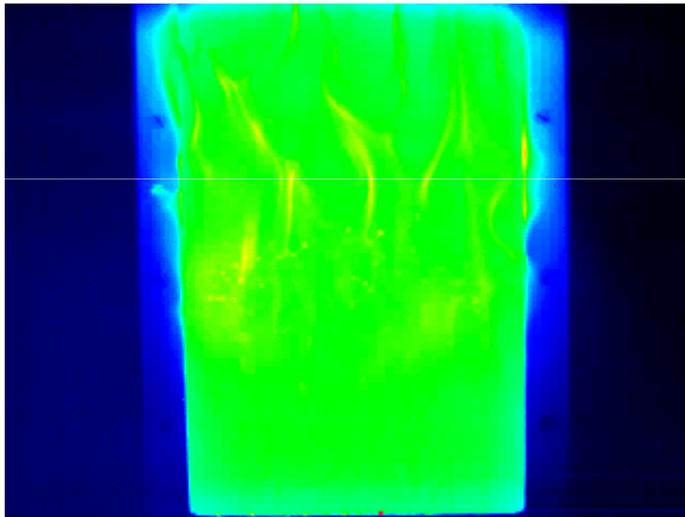
Le principe :  
 dans 4 bandes spectrales,  
 acquisition des niveaux de gris,  
 calcul des luminances puis des  
 températures de luminance grâce  
 aux courbes d'étalonnage.



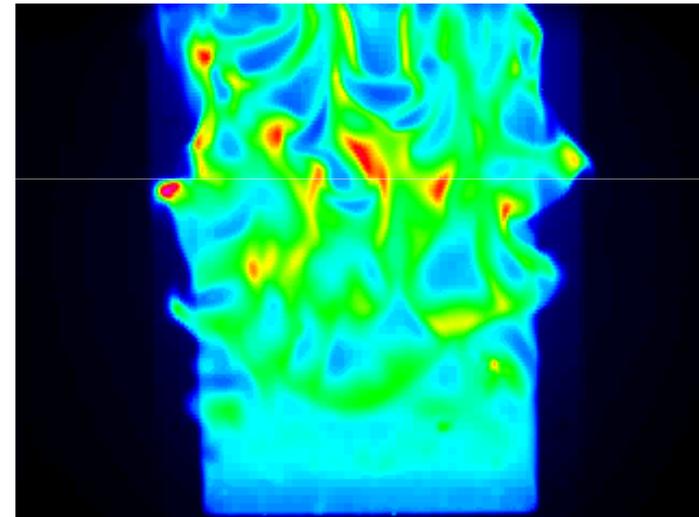
## Images en continu

L'enregistrement montre la stabilité de la flamme, avec des fluctuations liées à la flamme devant la plaque

« film » dans l'IR  
(données brutes)



Suies



CO<sub>2</sub>

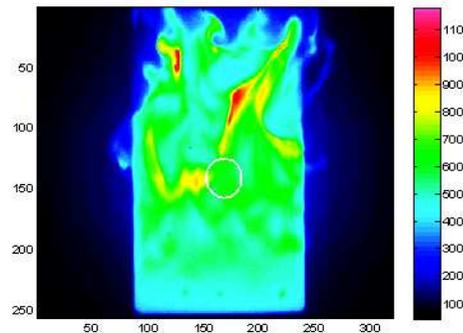
Différence dans les « structures » observées.

Perspectives : coupler les résultats avec la dynamique de la flamme

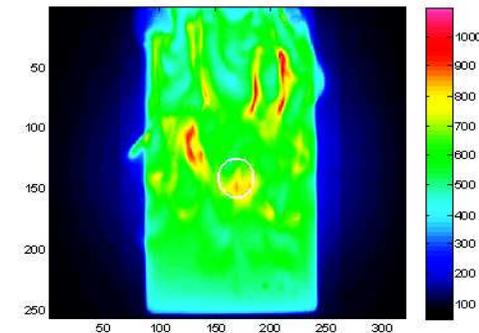
## Répétabilité?

- Comme pour les spectres, la répétabilité est excellente.
- Très bonnes conditions pour une identification de paramètres.

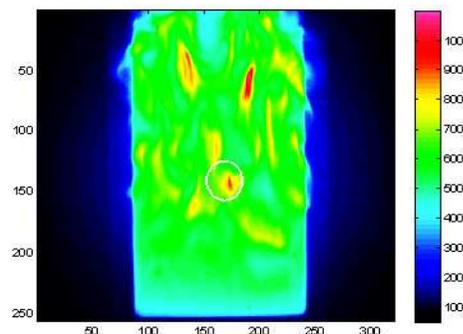
Intensités (UA) / Filtre 1% essais 7 à 10 (entre 4'19 et 7'32 après allumage)



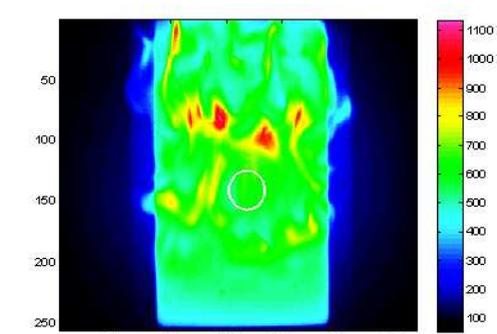
Essai 7



Essai 8



Essai 9



Essai 10

## Extraction de la température de la plaque

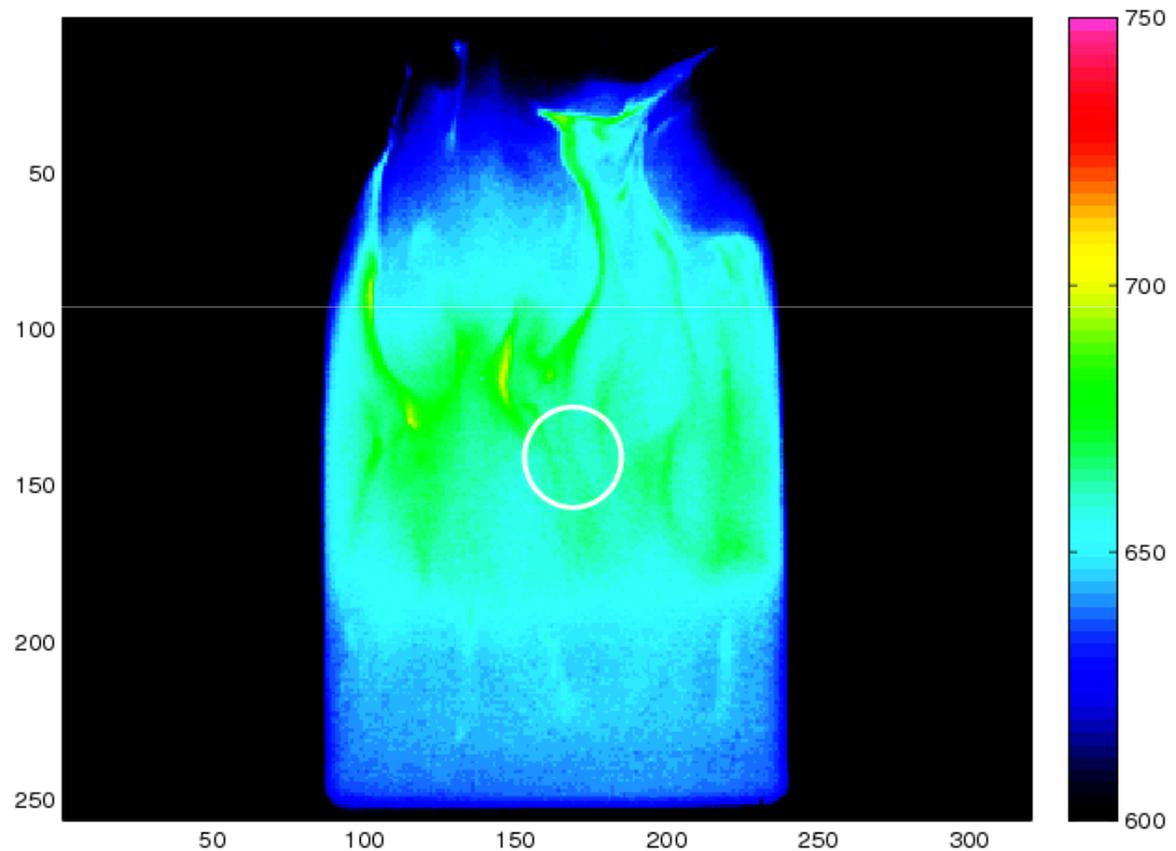
Ici, on n'a pas le rayonnement des gaz, peu de perturbations par les suies.

La plaque est noire (ou presque).

Verdict : le rayonnement est celui d'un CN à 670 K

2% d'écart par rapport à l'analyse spectro

Comment affiner ?

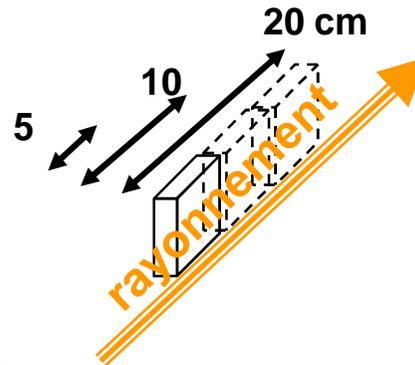
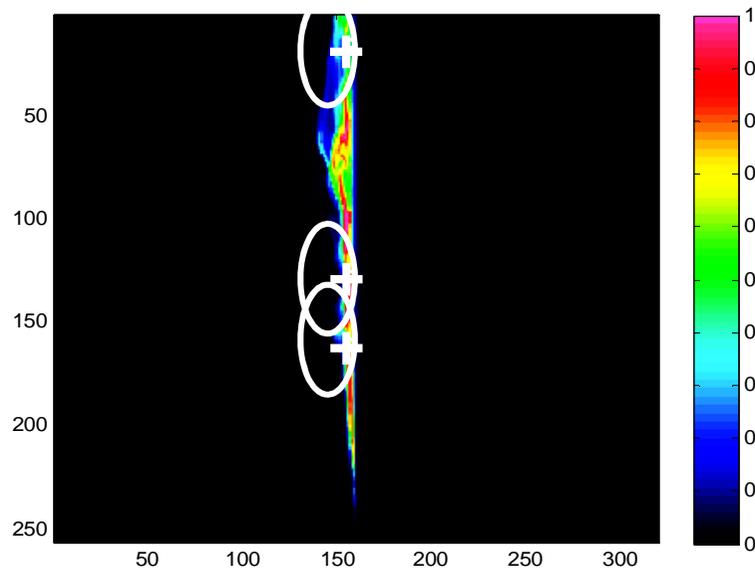


## Plaque de profil / Générer des flammes d'épaisseur contrôlée

### Extraction de $\varepsilon$ ? $\kappa$ ?



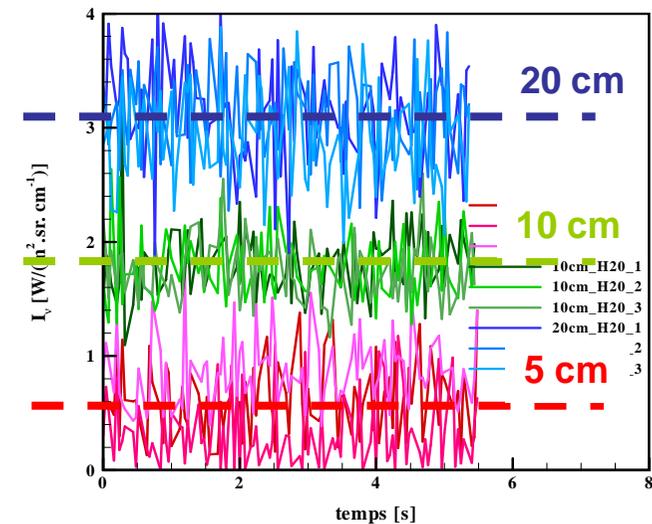
3 pts d'analyse des données



3 plaques / 3 épaisseurs de flammes

La température étant fixée, on obtient  $\varepsilon$ ?  $\kappa$ ?

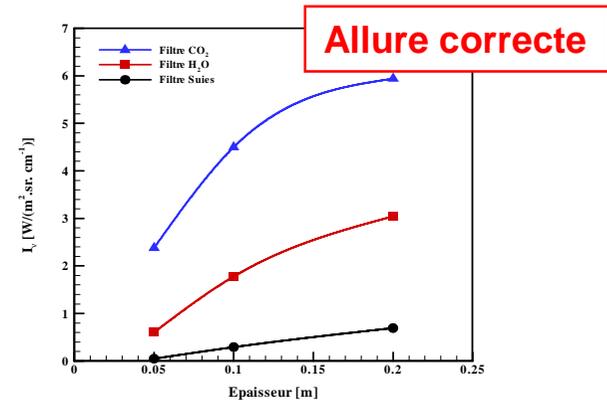
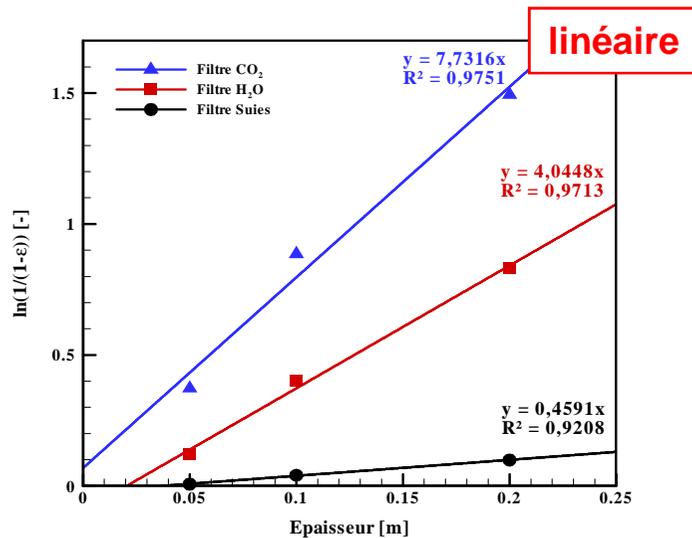
Luminance sur ces 3 pts en fct de  $t$   
pour les 3 épaisseurs de plaque



Plaque de profil / Identifier des propriétés de la flamme

$$L_v = \varepsilon_v L_v^\circ(T_f) = (1 - e^{-\kappa_v E}) L_v^\circ(T_f)$$

$$\ln(1/(1 - \varepsilon))$$



Identification algo génétique ou minimisation  
 Hypothèse  $T_f=1105K$  (discutable...)

à  $2,85\mu m$   $\kappa_{H2O} = 4,0 m^{-1}$

à  $4,45\mu m$   $\kappa_{CO2} = 7,7 m^{-1}$

à  $3,9\mu m$   $\kappa_{suies} = 0,5 m^{-1}$

**d'où  $f_v$  en suies par exp?**  $\implies \kappa_\lambda = 5,5 f_v / \lambda \implies f_v = 3,5 \cdot 10^{-7} m^3/m^3$

## Bilan, perspectives...

- Caractérisation d'une flamme de PMMA... plutôt prometteur / analyse en cours
- Non présenté ici : plaque horizontale (épaisseur moins bien contrôlée, mais réfléchir à la bonne façon d'exploiter les données)
- **Idée de caractériser la plaque en cours de combustion... a priori ça marche : la flamme est optiquement mince, avec un filtre adapté qui évite le rayonnement des gaz + hypothèse plaque noire... on obtient une température de 670K (caméra) – 684K (spectro)**
- **Caractériser la flamme à partir « d'échantillons d'épaisseurs variées »... encore incertain: des problèmes pour identifier à la fois température et concentrations**
- Aller plus loin dans l'identification de paramètres, obtenir les champs de concentration en espèces (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, suies), pour différentes flammes
- Extraire des grandeurs complémentaires de l'analyse des images IR : structure, fluctuations en lien avec la dynamique de la flamme...
- Combiner avec d'autres types de mesures pour mettre au point un vrai benchmark?
- Répéter ce type de mesure sur d'autres dimensions de plaques, d'autres matériaux
- Suggestions?...