



# Rayonnement des flammes II

## Émission par un milieu équivalent homogène isotherme

Gilles Parent<sup>a</sup>, Giacomo Erez<sup>a,b</sup>, Pascal Boulet<sup>a</sup>  
Aurélien Thiry<sup>b</sup>, Eddie Faure<sup>b</sup>, Mathieu Suzanne<sup>b</sup>

a) LEMTA, UMR CNRS 7563, université de Lorraine

b) LCPP, Préfecture de Police de Paris

`gilles.parent@univ-lorraine.fr`

GDR Feux, Rouen, 6- 7 décembre 2018

# Problématique

## Emission de rayonnement par une flamme :

- terme source pour l'évaporation ou la pyrolyse du combustible
- Propagation du feu de proche en proche ou à distance (départ de feu de cibles combustibles éloignées)

Réalité : Flamme = Milieu inhomogène, anisotherme, turbulent. Emission par les gaz et par les suies

## Modèles simplifiés :

### 1. Emission surfacique par une surface rayonnante noire ou grise

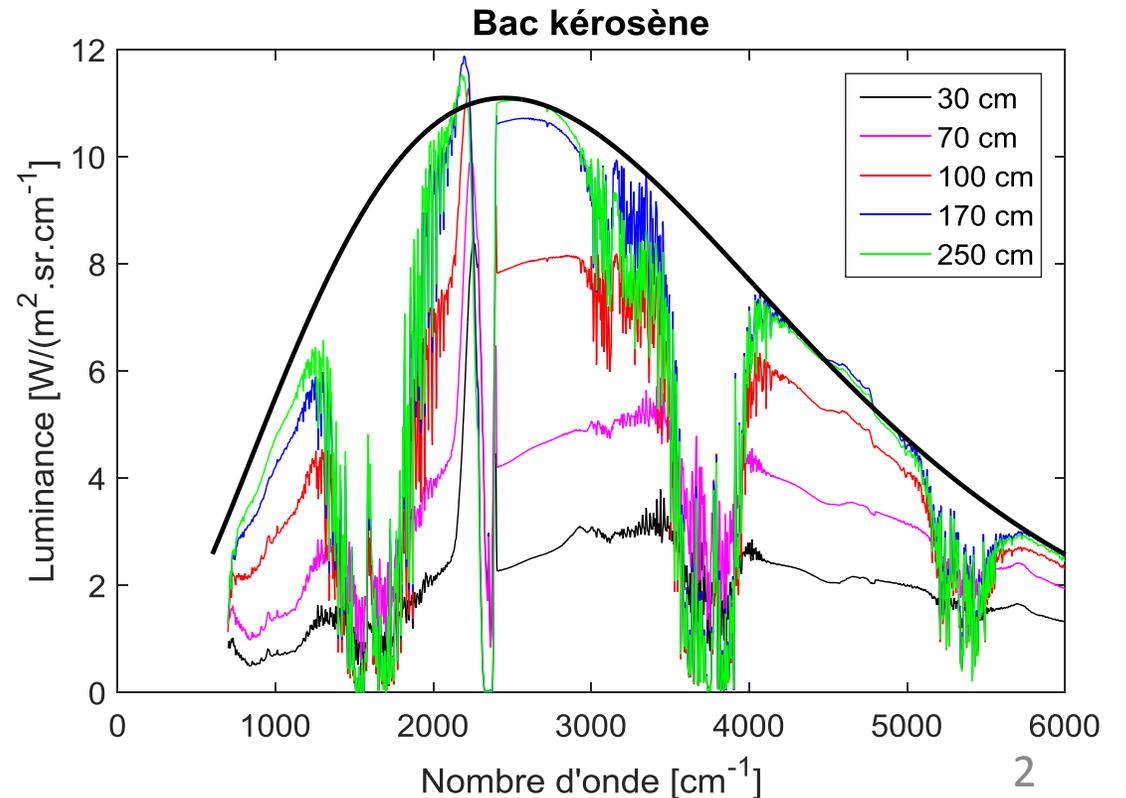
$$L = \varepsilon \frac{\sigma_B}{\pi} T^4$$

#### Modèle limité :

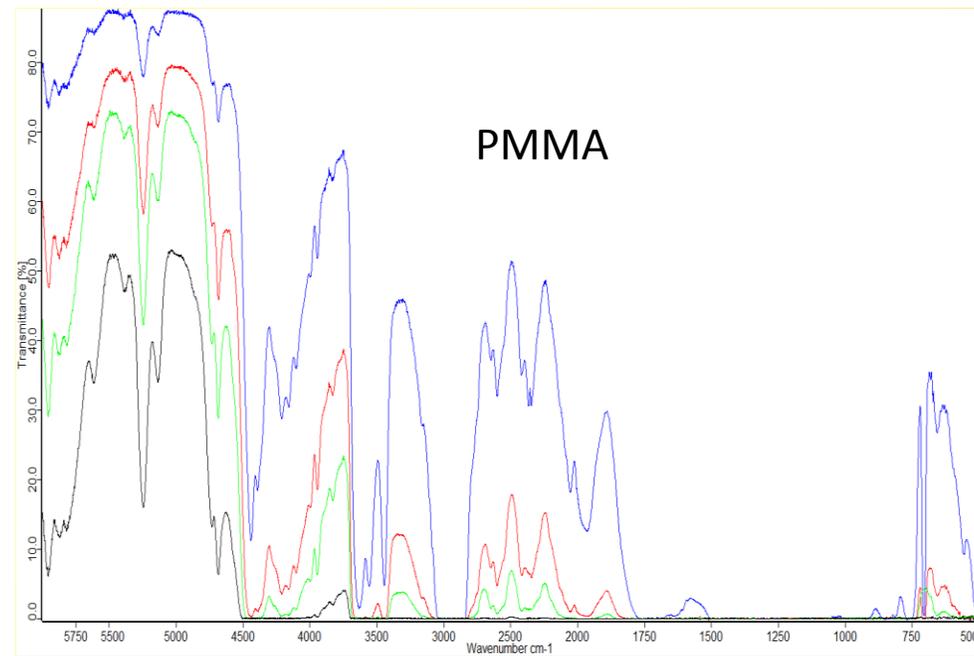
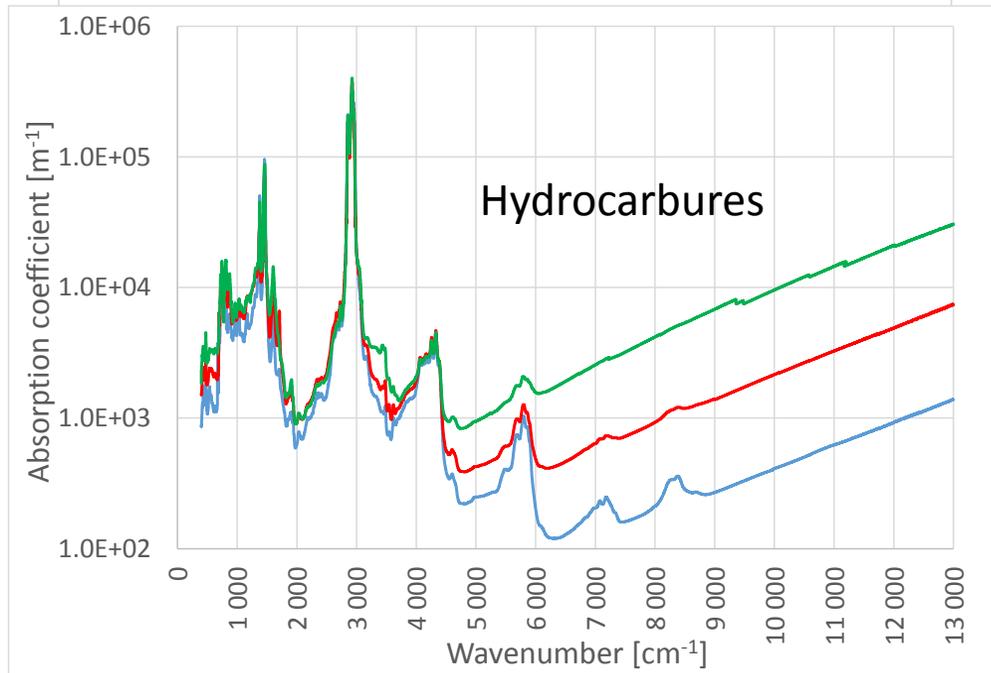
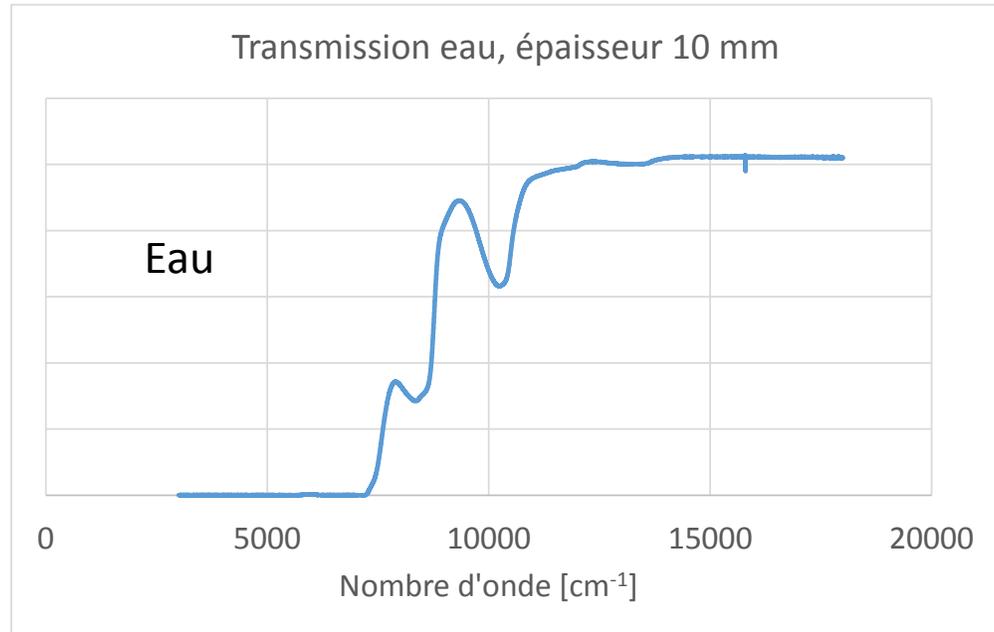
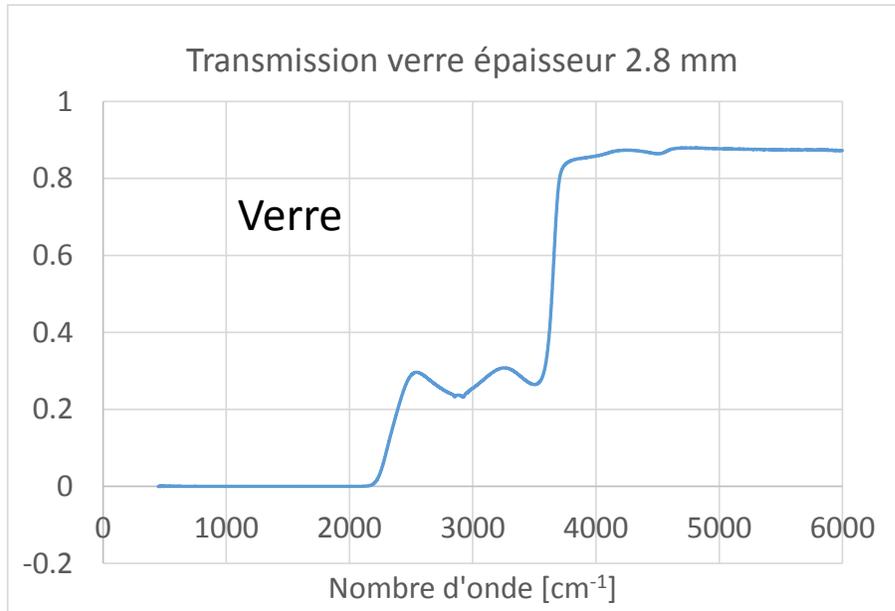
- L'émission par une flamme dépend de son épaisseur
- Les suies ne rayonnent pas comme un corps noir
- Les gaz émettent dans des plages de longueur d'onde bien précises

Quelle valeur de  $\varepsilon$  en fonction de

- la dimension de la flamme ?
- du type de combustible ?



# Un modèle de rayonnement gris ne convient pas pour des milieux fortement non gris



## 2. Emission volumique par un milieu homogène, isotherme équivalent

$$\begin{aligned}L_{\nu} &= \epsilon(\nu) L_{\nu}^{CN}(T) \\ &= (1 - \tau(\nu)) L_{\nu}^{CN}(T) \\ &= (1 - \exp(-\kappa(\nu) \times e) L_{\nu}^{CN}(T)\end{aligned}$$

$L_{\nu}$	Luminance émise
$L_{\nu}^{CN}(T)$	Luminance du corps noir à la température T
$\epsilon(\nu)$	Emissivité spectrale
$\tau(\nu)$	transmittance spectrale
$\kappa(\nu)$	Coefficient d'absorption spectral

$L_{\nu}$  peut être mesuré par un spectromètre d'émission

Mais  $L_{\nu}$  est le produit de deux grandeurs  $\epsilon(\nu)$  par  $L_{\nu}^{CN}(T)$  ce qui nécessite deux mesures

➡ Mesure de transmission multispectrale.

Principe :

un faisceau laser modulé traverse la flamme, on mesure la lumière transmise par détection synchrone afin d'éliminer l'émission propre de la flamme (particulièrement importante dans l'IR)

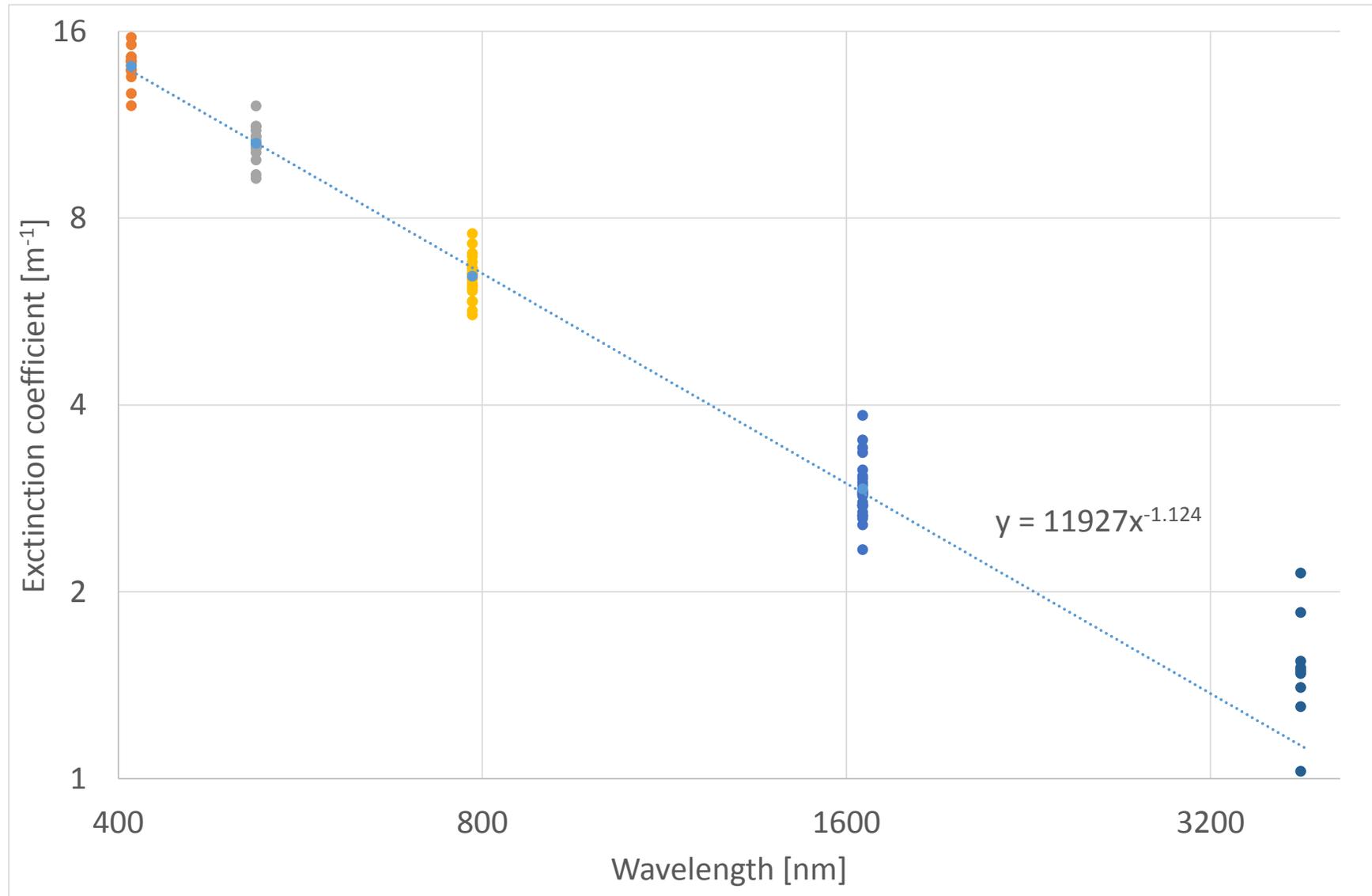
Longueurs d'onde : 410 nm, 520 nm, 785 nm, 1650 nm, 3800 nm

Longueurs d'onde en dehors des zones d'émission des gaz,  
**seules les suies absorbent** à ces longueurs d'onde

# 1. Mesures du coefficient d'absorption de la flamme

$$\kappa(\lambda) = \frac{1}{e} \ln(\tau(\lambda))$$

$e$  = taille du bac (mesures faites à la base de la flamme)  
Diffusion négligée



## 2. Emission par les suies

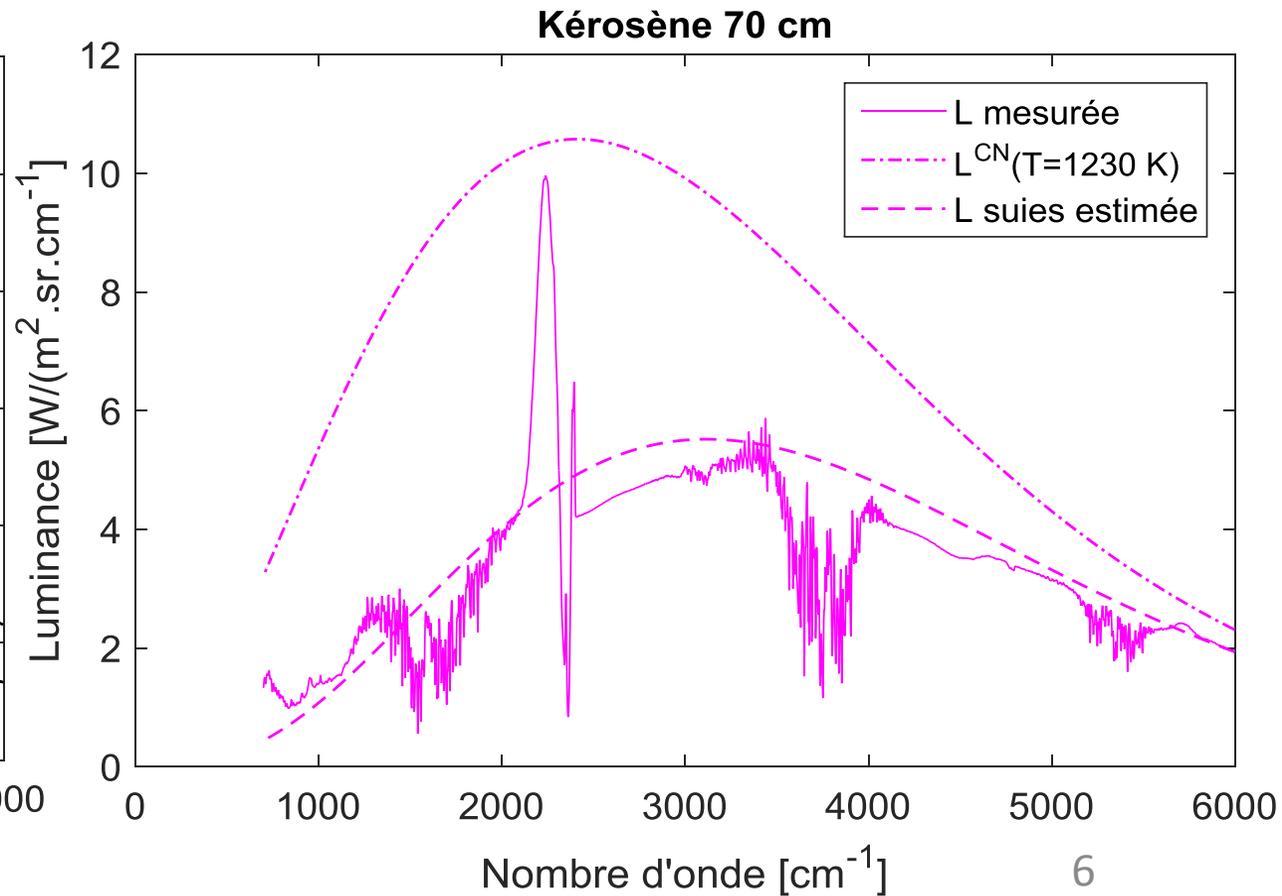
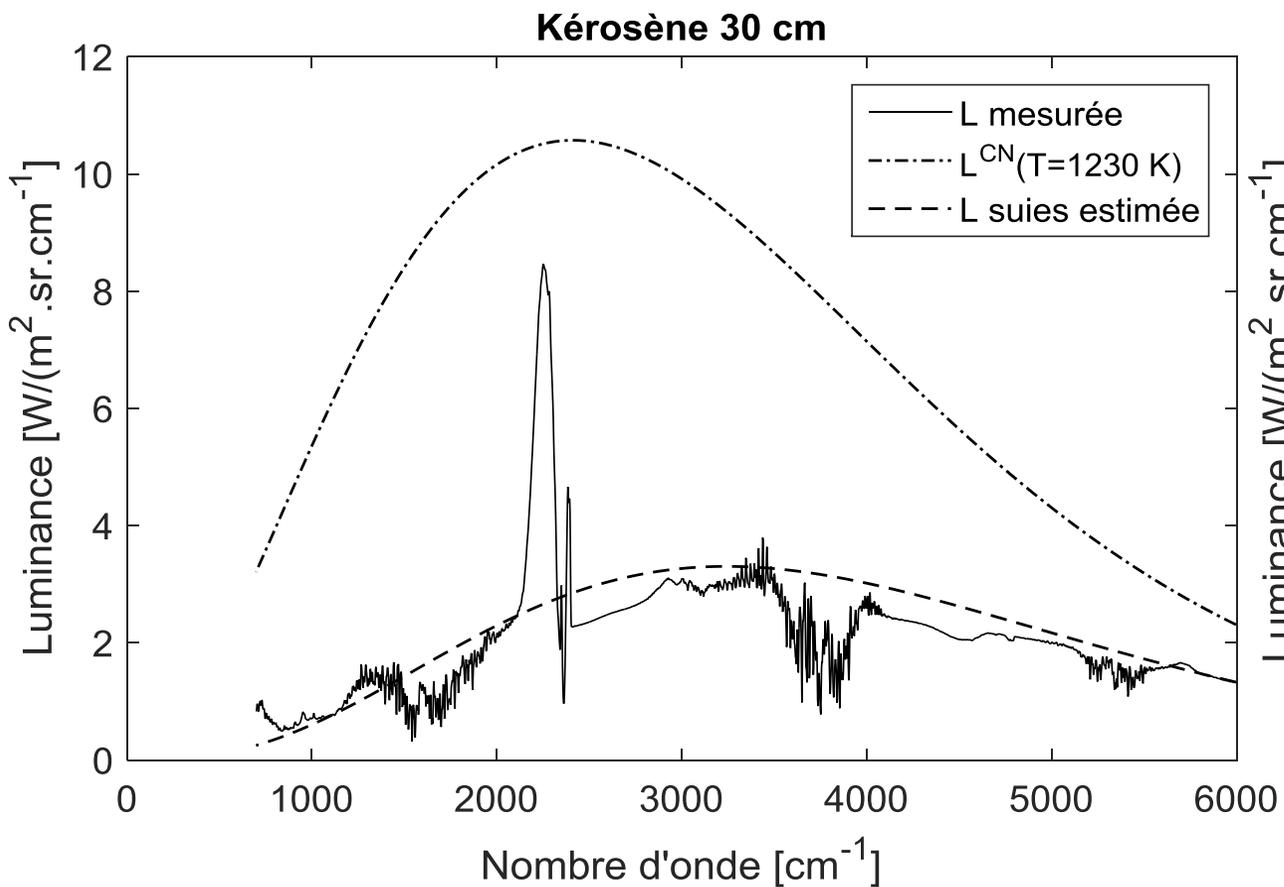
Modèle :

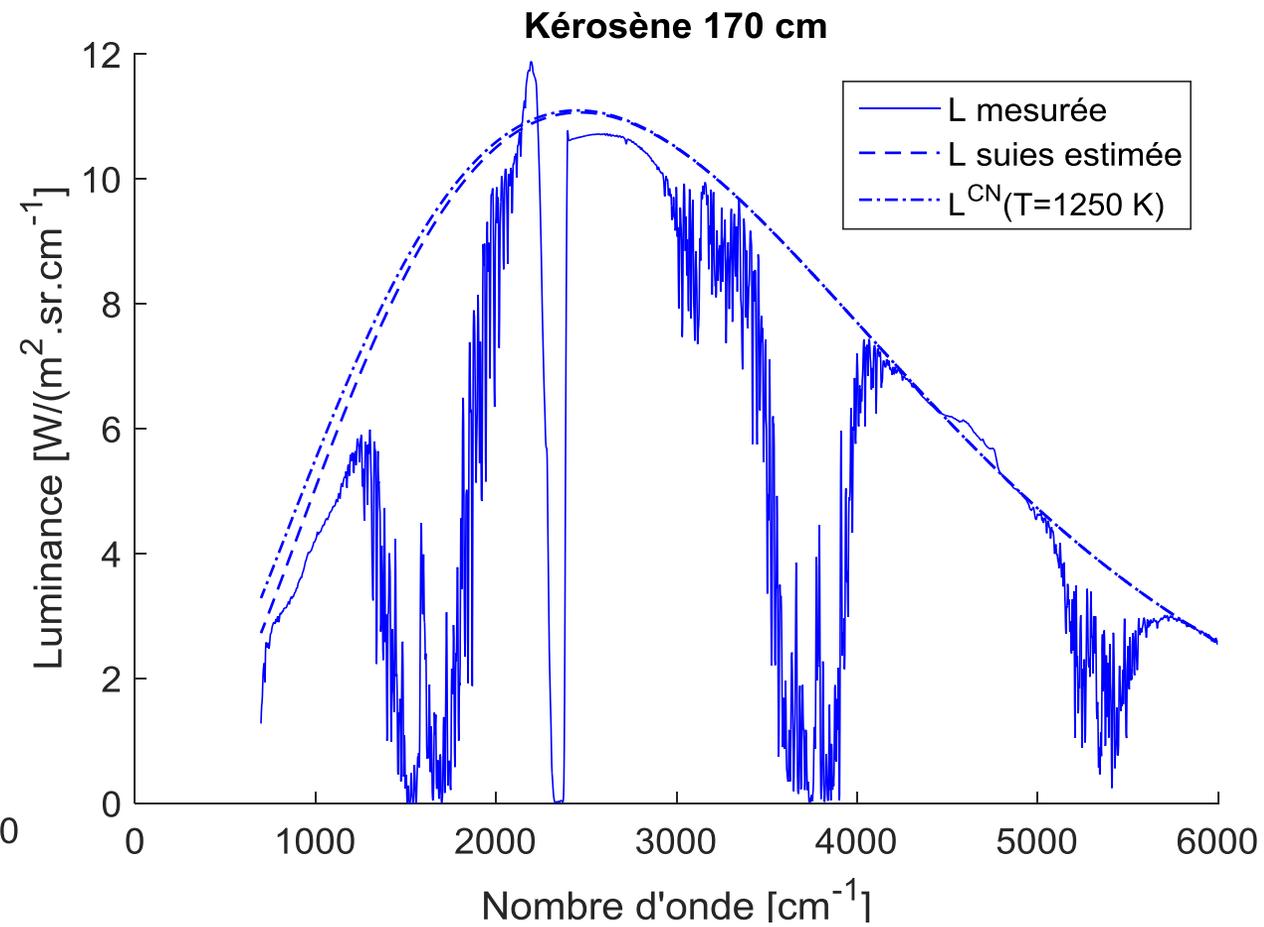
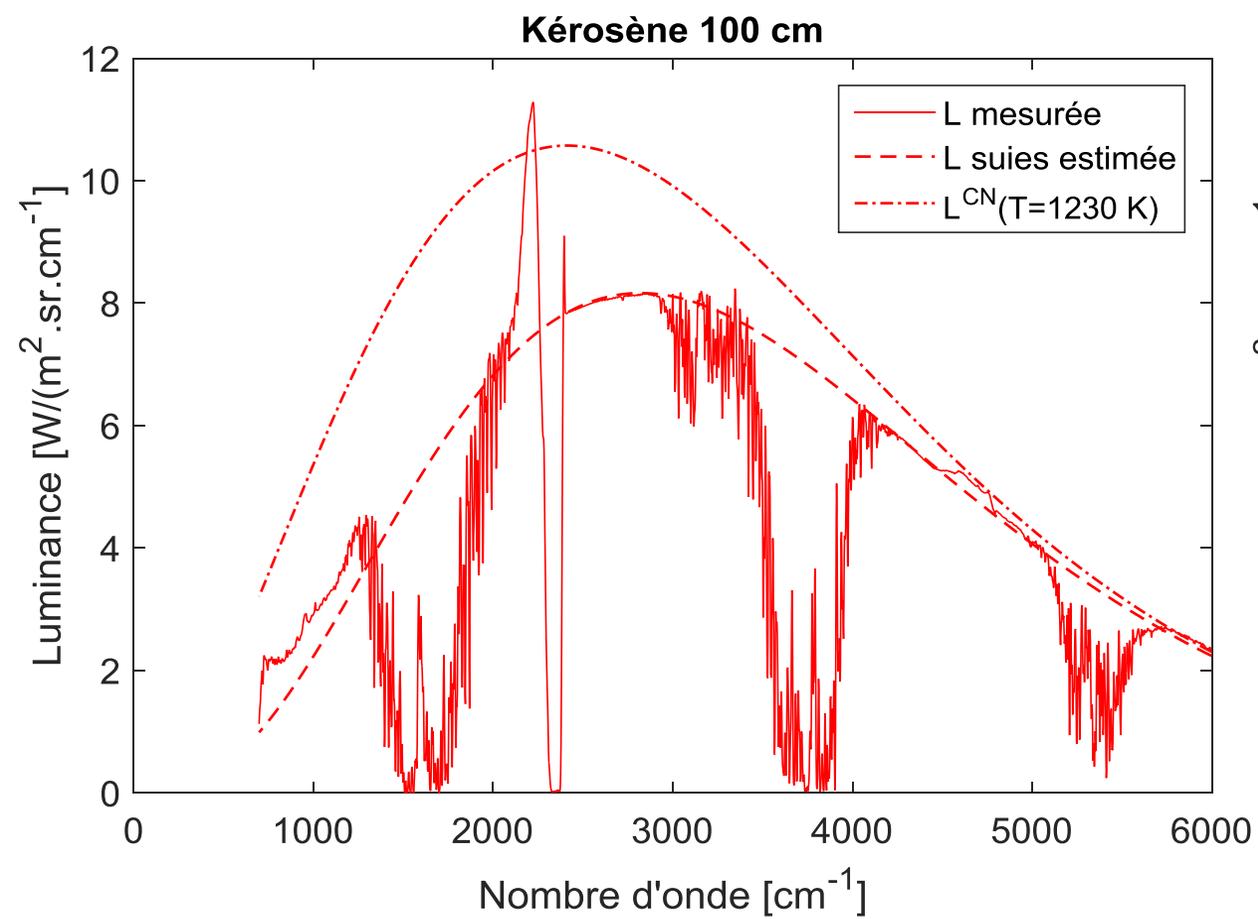
$$L_\nu = (1 - \exp(-\kappa(\lambda) \times e) L_\nu^{CN}(T)$$

$$\kappa(\lambda) = \frac{A}{\lambda^\alpha} \quad A = 11927, \alpha = 1.12$$

T seul paramètre d'ajustement libre

Température du milieu homogène isotherme équivalent





### 3. Peut-on travailler sur un spectre moyenné en temps et en espace ?

La fonction de Planck n'est pas linéaire avec la température T

$$L_\nu^{CN} = \frac{2 h c^2 \nu^3}{\left(\exp\left(\frac{h c \nu}{k_B T}\right) - 1\right)}$$
$$L_\lambda^{CN} = \frac{2 h c^2 \lambda^{-5}}{\left(\exp\left(\frac{h c}{\lambda k_B T}\right) - 1\right)}$$

**Mathématiquement** la somme de deux fonctions de Planck n'est pas une fonction de Planck

#### Deux cas limites

- Grandes longueurs d'ondes  $\lambda \gg \lambda_{wien}$   $h c \nu \ll k_B T$   $\left(\exp\left(\frac{h c \nu}{k_B T}\right) - 1\right)^{-1} \approx \frac{k_B T}{h c \nu}$  (Loi de Rayleigh-Jeans)

Linéaire en température

- Petites longueurs d'ondes  $\lambda \ll \lambda_{wien}$   $h c \nu \gg k_B T$   $\left(\exp\left(\frac{h c \nu}{k_B T}\right) - 1\right)^{-1} \approx \exp\left(-\frac{h c \nu}{k_B T}\right)$  (Loi de Wien)

Fortement non linéaire en température

## Spectre moyenné en temps

Au lieu de fitter le spectre moyenné temporellement, chaque spectre est fitté par

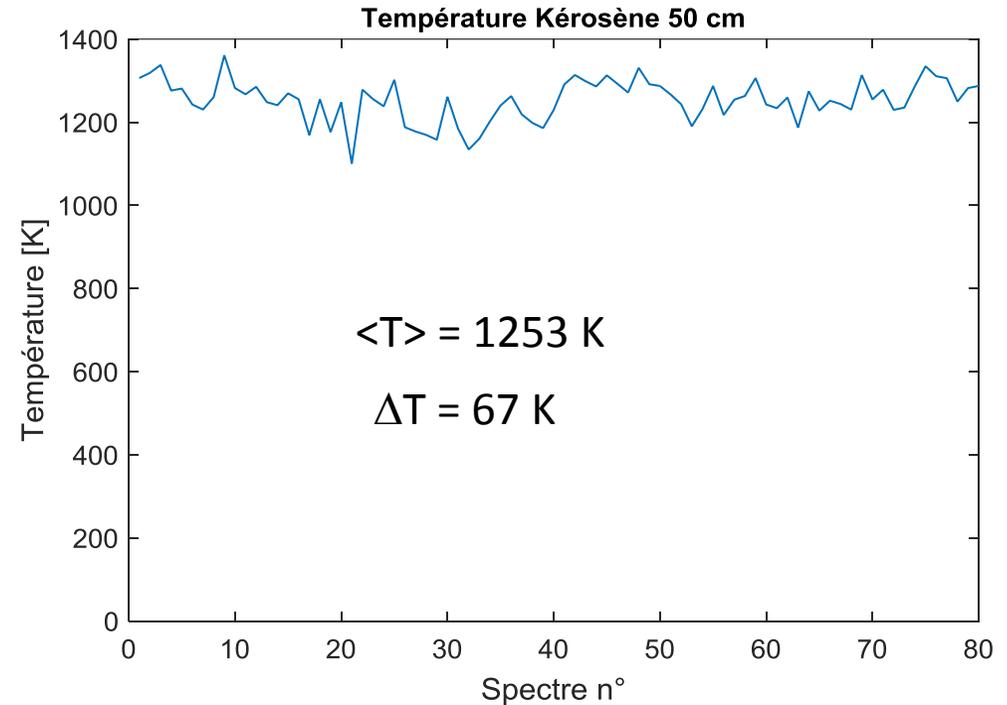
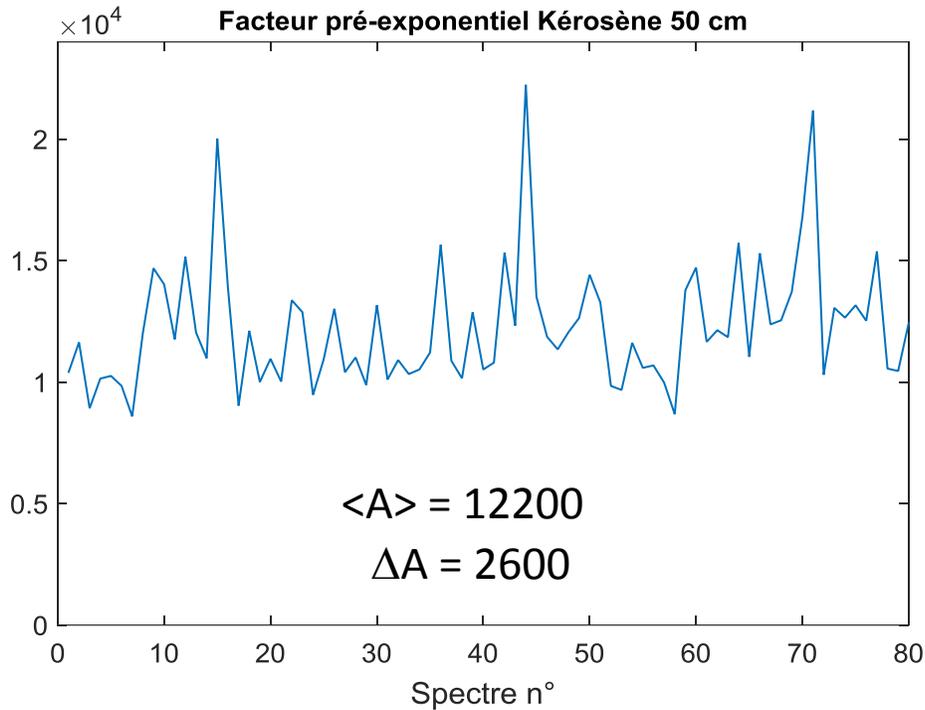
$$L_\nu = (1 - \exp(-\kappa(\lambda) \times e)) L_\nu^{CN}(T)$$

$$\kappa(\lambda) = \frac{A}{\lambda^\alpha}$$

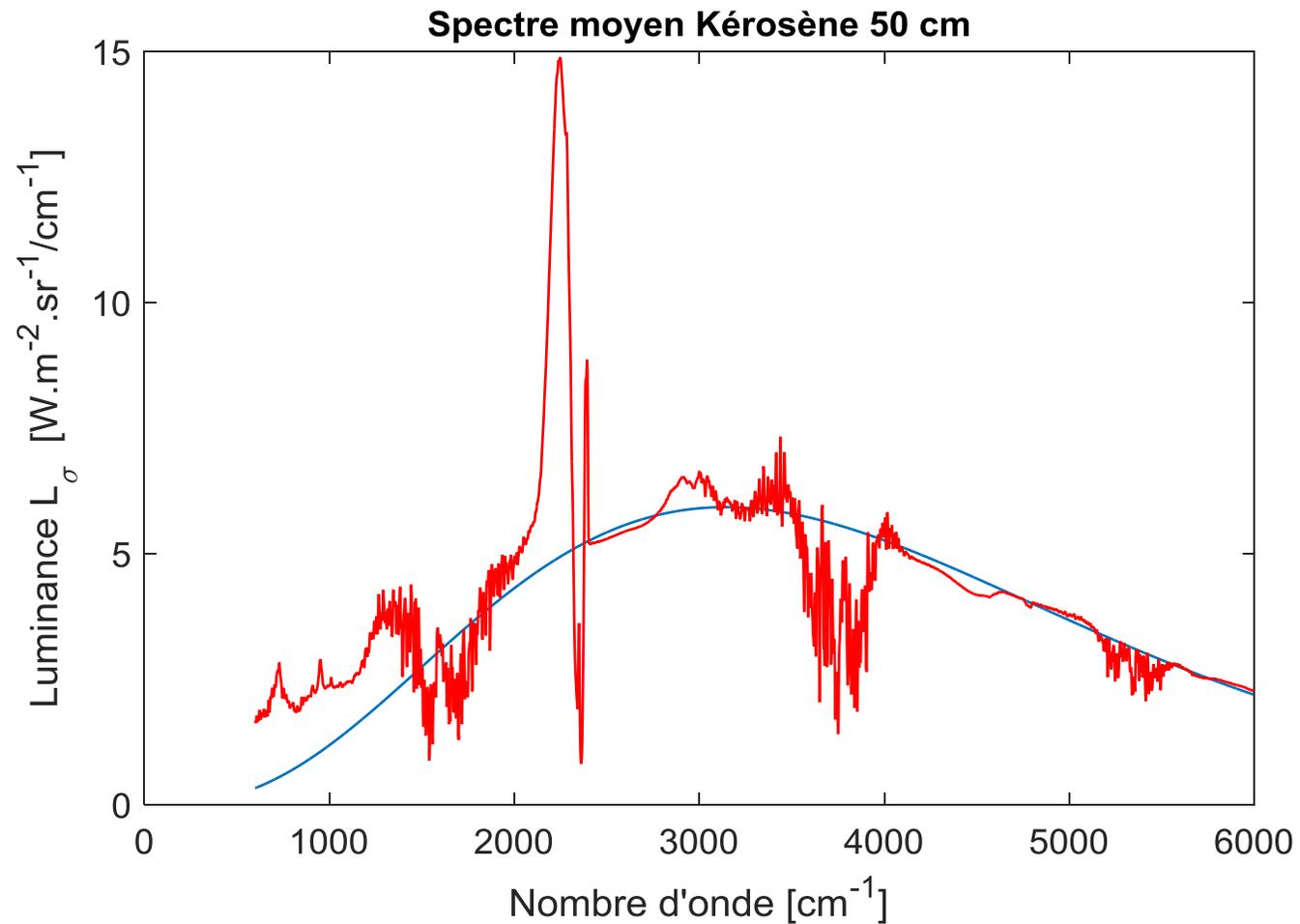
A et T paramètres d'ajustement

$\alpha = 1,1$  paramètre fixe

### Kérosène, bac 50 cm



Ajustement sur le spectre moyen :  $A = 12060$ ,  $T = 1256 \text{ K}$



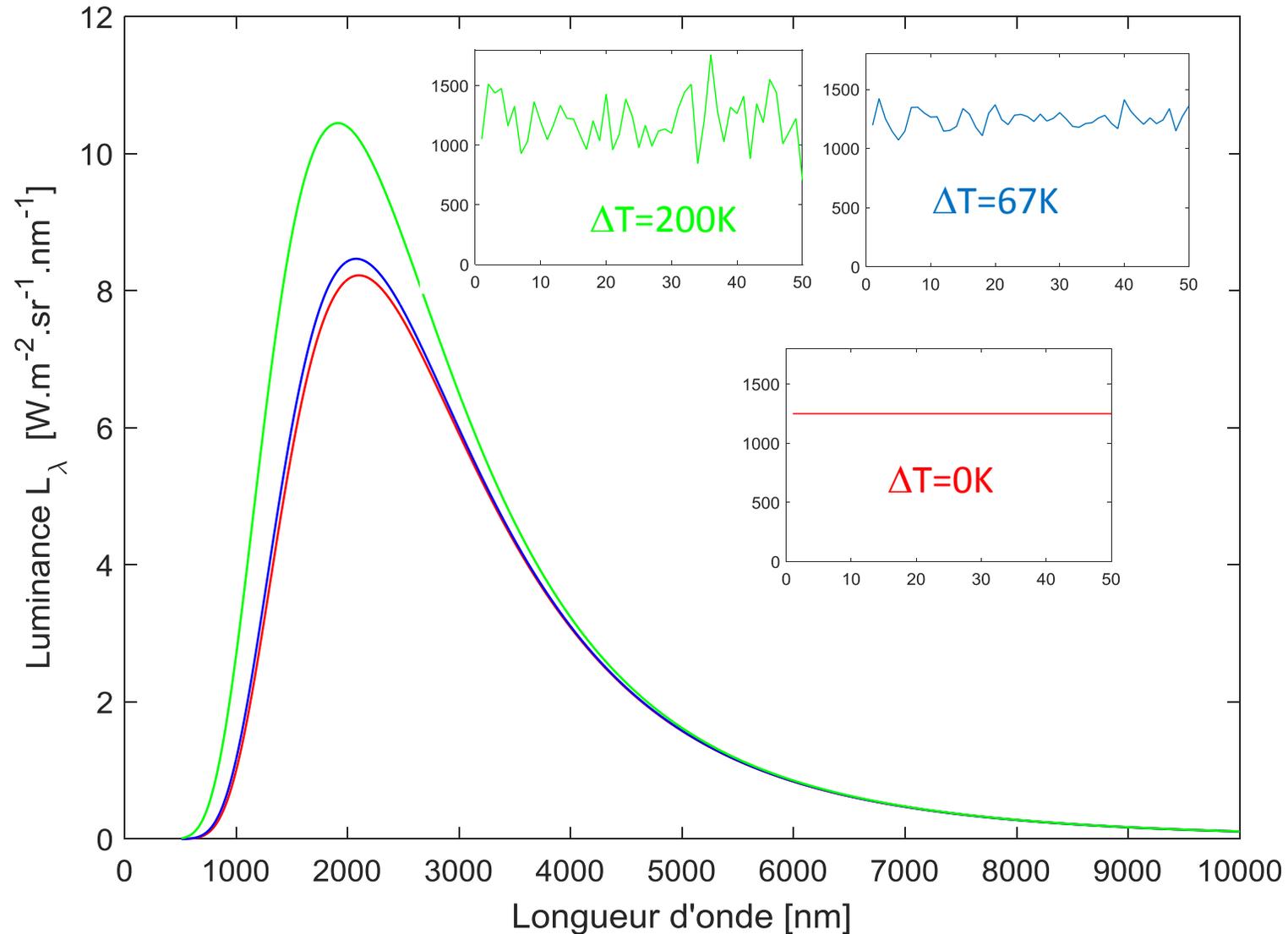
Kérosène, bac 70 cm :  $\langle A \rangle = 12300$  , A spectre moyen = 12120,  $\langle T \rangle = 1295$  K, T spectre moyen = 1296 K

Kérosène, bac 30 cm :  $\langle A \rangle = 11050$  , A spectre moyen = 10965,  $\langle T \rangle = 1246$  K, T spectre moyen = 1247 K

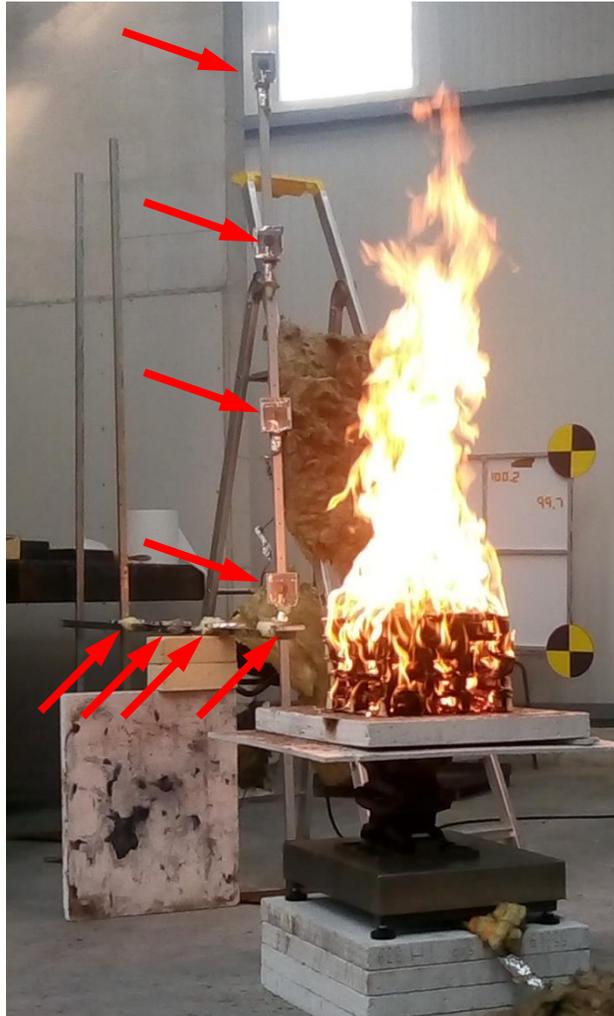
## Spectre moyenné en espace

On construit un spectre synthétique en calculant l'ETR pour un milieu non isotherme.

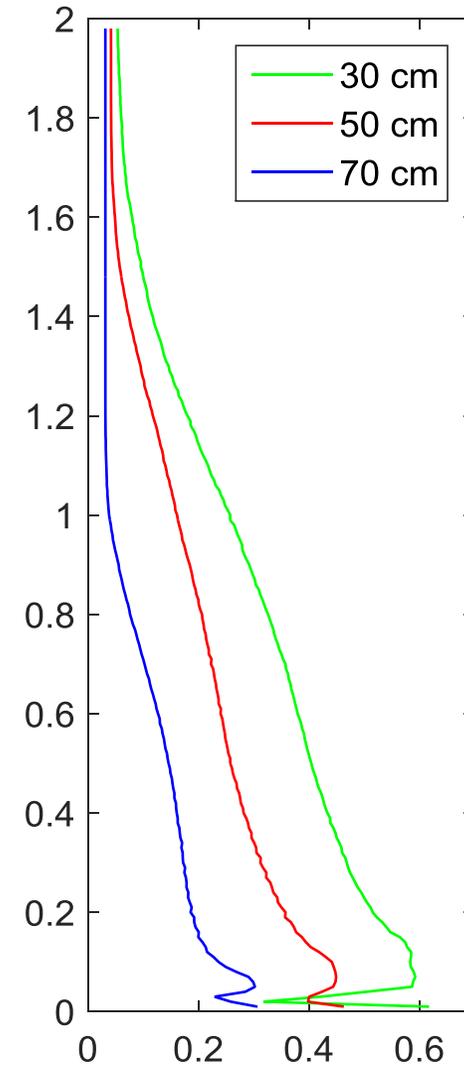
Fluctuations de température suivant une loi gaussienne de moyenne  $\langle T \rangle = 1250$  K et d'écart-type  $\Delta T$



## 4. Evaluation de flux reçus



1 arbre vertical de 4 fluxmètres verticaux  
1 arbre horizontal de 4 fluxmètres horizontaux



Extraction du profil de flamme  
moyen à partir d'images caméra

Méthode de Monte-Carlo inverse : rayons lancés depuis la cible (fluxmètre). On détermine les points d'intersection avec la flamme, donc la distance  $e$  parcourue dans la flamme, donc la luminance reçue pour chaque rayon

$$e = \sqrt{(x_s - x_e)^2 + (y_s - y_e)^2 + (z_s - z_e)^2}$$

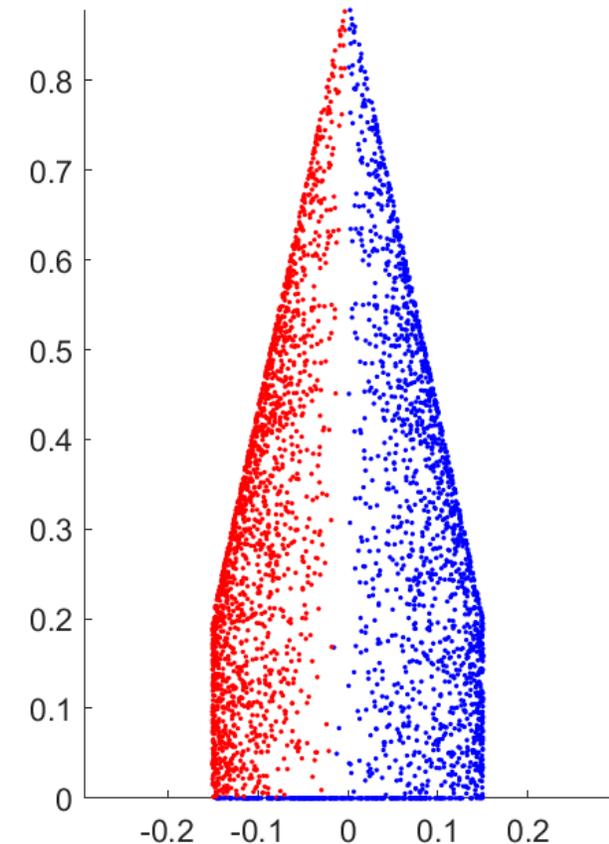
$$L_v = (1 - \exp(-\kappa(\lambda) \times e) L_v^{CN}(T)$$

$$\kappa(\lambda) = \frac{A}{\lambda^\alpha}$$

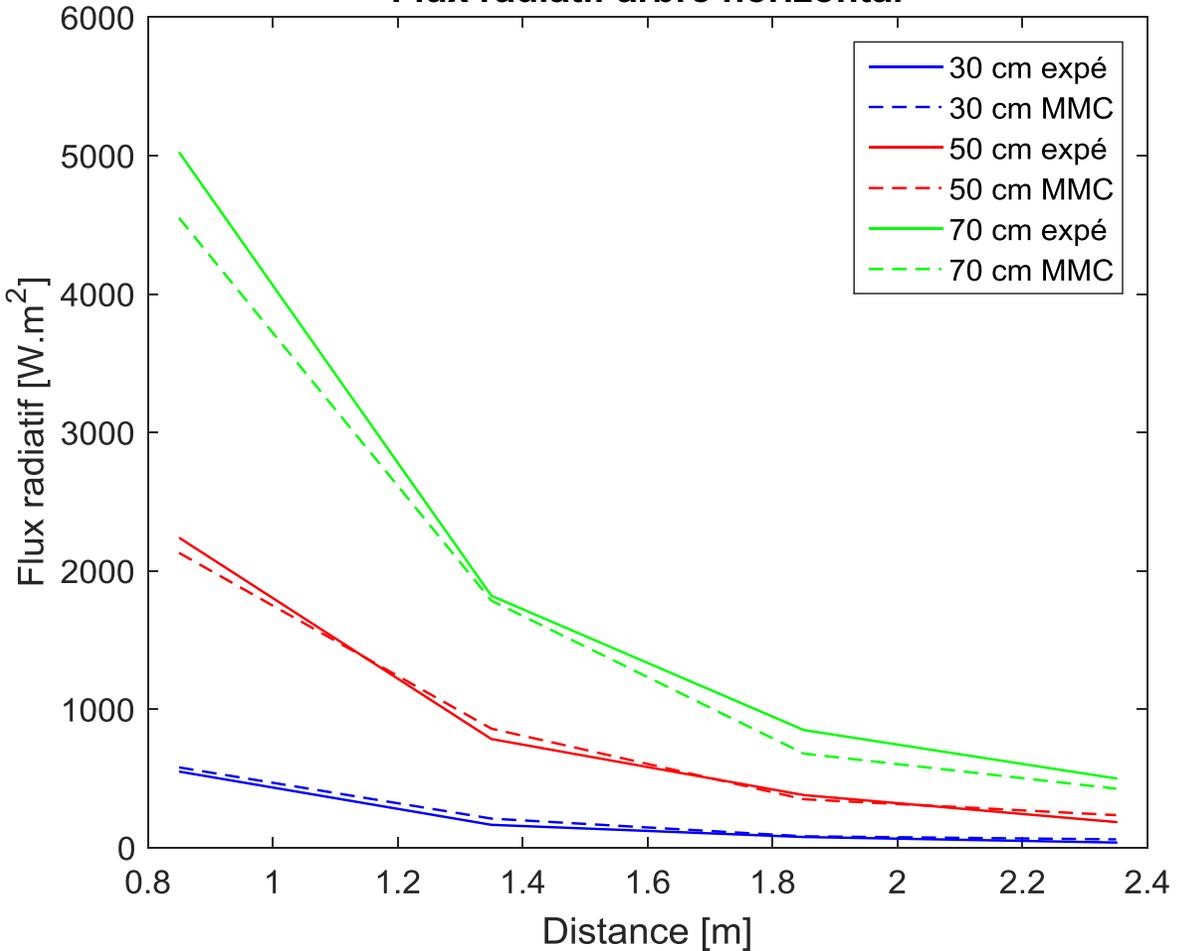
### Hypothèses

- Géométrie de flamme simplifiée
- Flamme complètement homogène isotherme :  $A$ ,  $\alpha$  et  $T$  fixés
- Emission par les suies uniquement
- Pas d'absorption atmosphérique

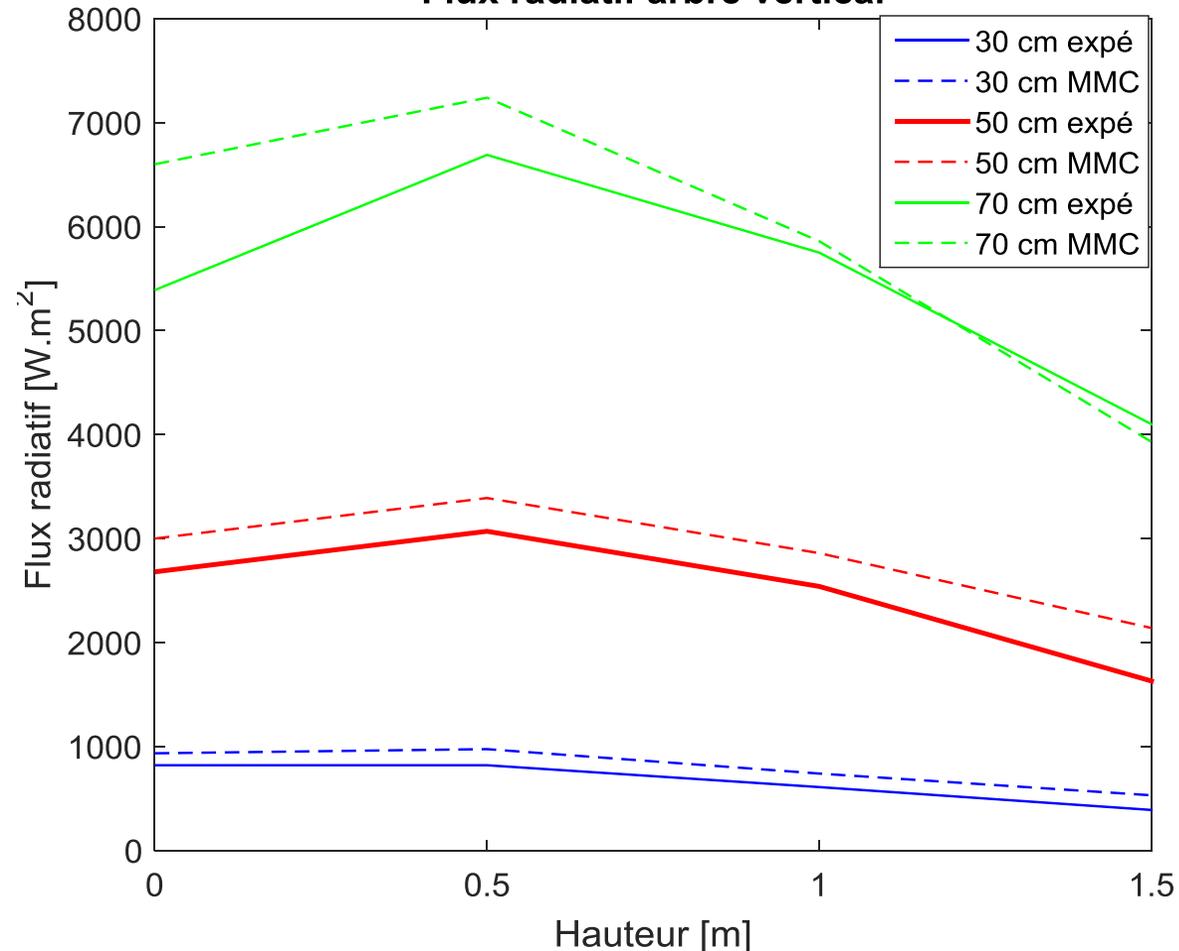
Forme de flamme simplifiée



### Flux radiatif arbre horizontal



### Flux radiatif arbre vertical



Bon accord calculs MMC et mesures malgré des hypothèses très sévères

## Conclusion

- Un modèle de flamme homogène isotherme permet un bon ajustement des spectres de rayonnement émis par les suies dans une flamme de feu
  - Le coefficient d'absorption suit une loi  $\kappa(\lambda) = \frac{A}{\lambda^\alpha}$  avec  $A \sim 12000$  et  $\alpha \sim 1,1$  pour le kérosène dans la gamme  $400 \text{ nm} < \lambda < 4000 \text{ nm}$
  - $\kappa(\lambda)$  varie peu avec l'épaisseur de la flamme
- Ce modèle permet une bonne prédiction des flux reçus

## Perspectives

- Améliorations du calcul de flux en levant/réduisant certaines hypothèses :
  - Amélioration du profil utilisé (profil moyen réel, voire profil instantané réel)
  - Prise en compte de variations des propriétés optiques des suies dans la hauteur de la flamme
  - Prise en compte de rayonnement des gaz,  $\text{CO}_2$  principalement, en particulier sur les épaisseurs de flamme faibles
  - Prise en compte de l'absorption atmosphérique (modèle SNB, prêt)
- Calculs de flux reçus par le combustible (thèse Giacomo Erez, LCPP)
- Exploitation des mesures sur d'autres combustibles (Gazole, Heptane, bois, Mousse PU)
- Exploitation de spectres proche IR et visible (Données jusqu'à 500 nm)

