



Rayonnement des flammes II

Émission par un milieu équivalent homogène isotherme

Gilles Parent^a, Giacomo Erez^{a,b}, Pascal Boulet^a
Aurélien Thiry^b, Eddie Faure^b, Mathieu Suzanne^b

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

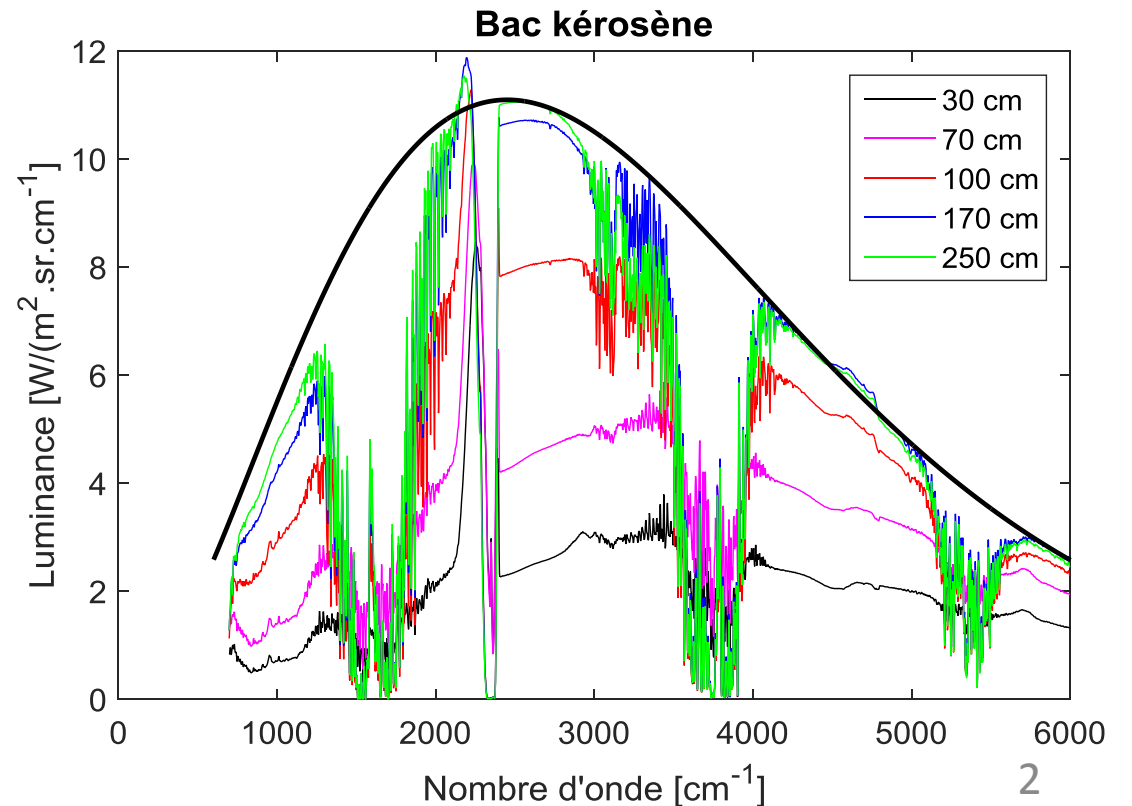
$$L = \varepsilon \frac{\sigma_B}{\pi} T^4$$

Modèle limité :

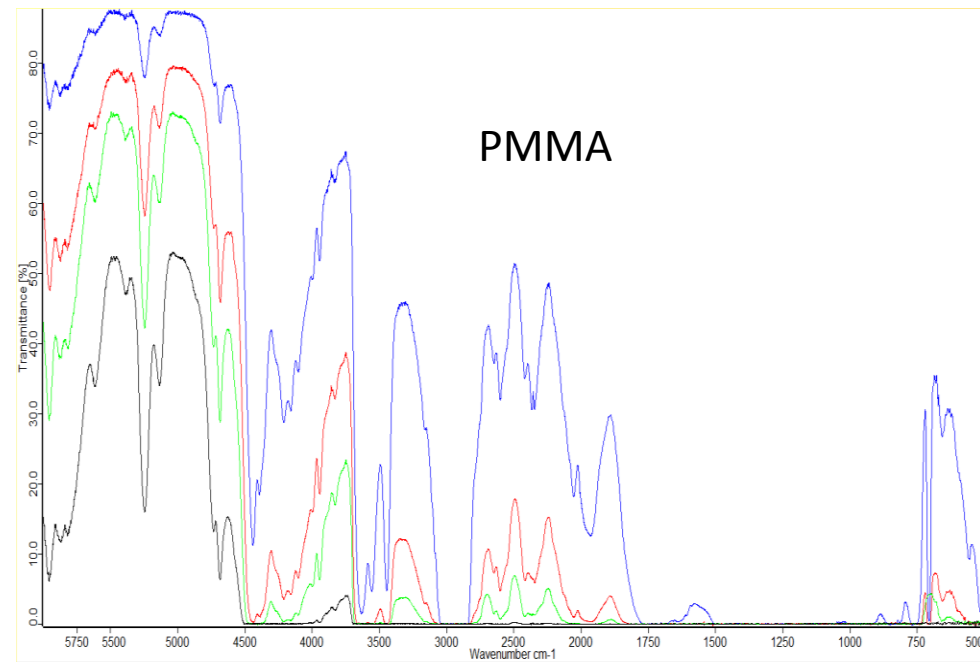
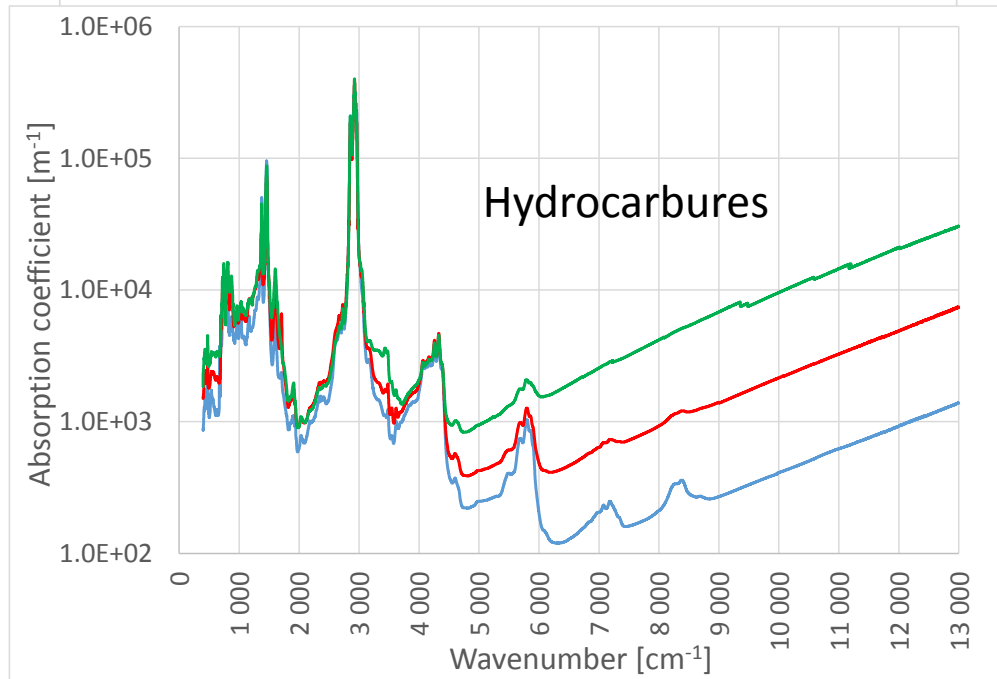
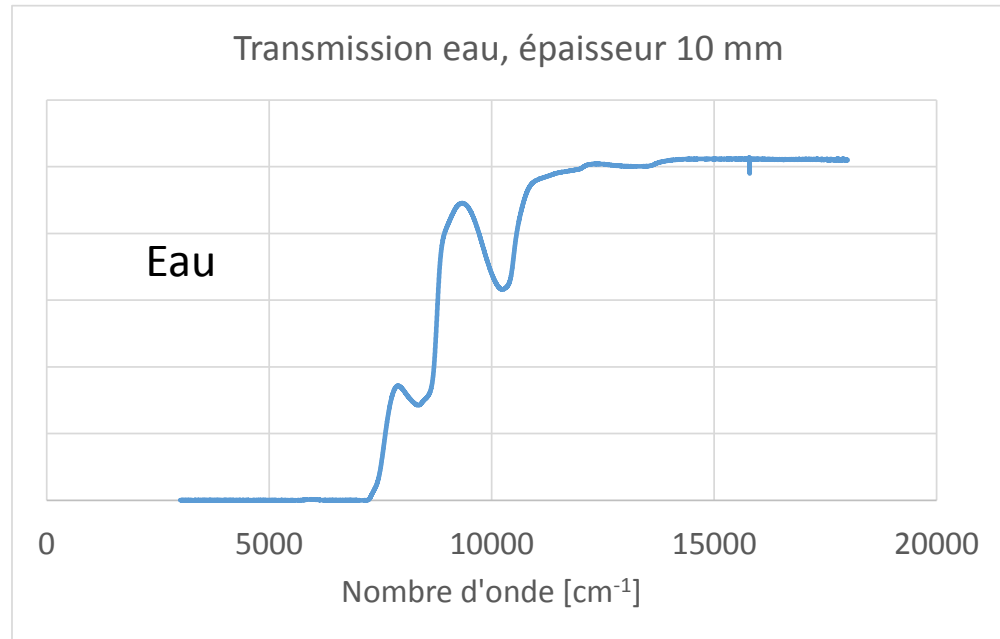
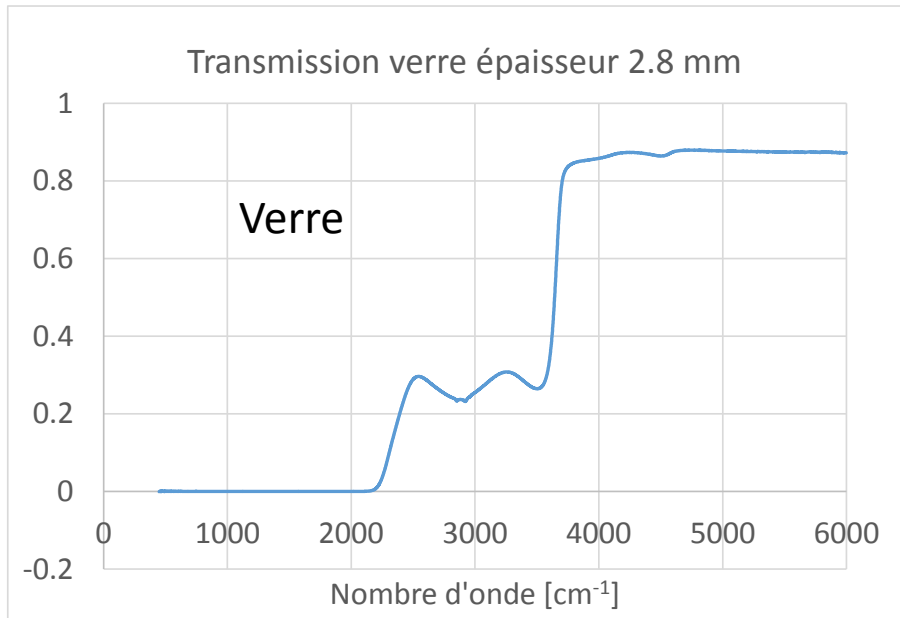
- L'émission par une flamme dépend de son épaisseur
- Les suies ne rayonnent pas comme un corps noir
- Les gaz émettent dans des plages de longueur d'onde bien précises

Quelle valeur de ε 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_{ν}	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_{ν} peut être mesuré par un spectromètre d'émission

Mais L_{ν} 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)

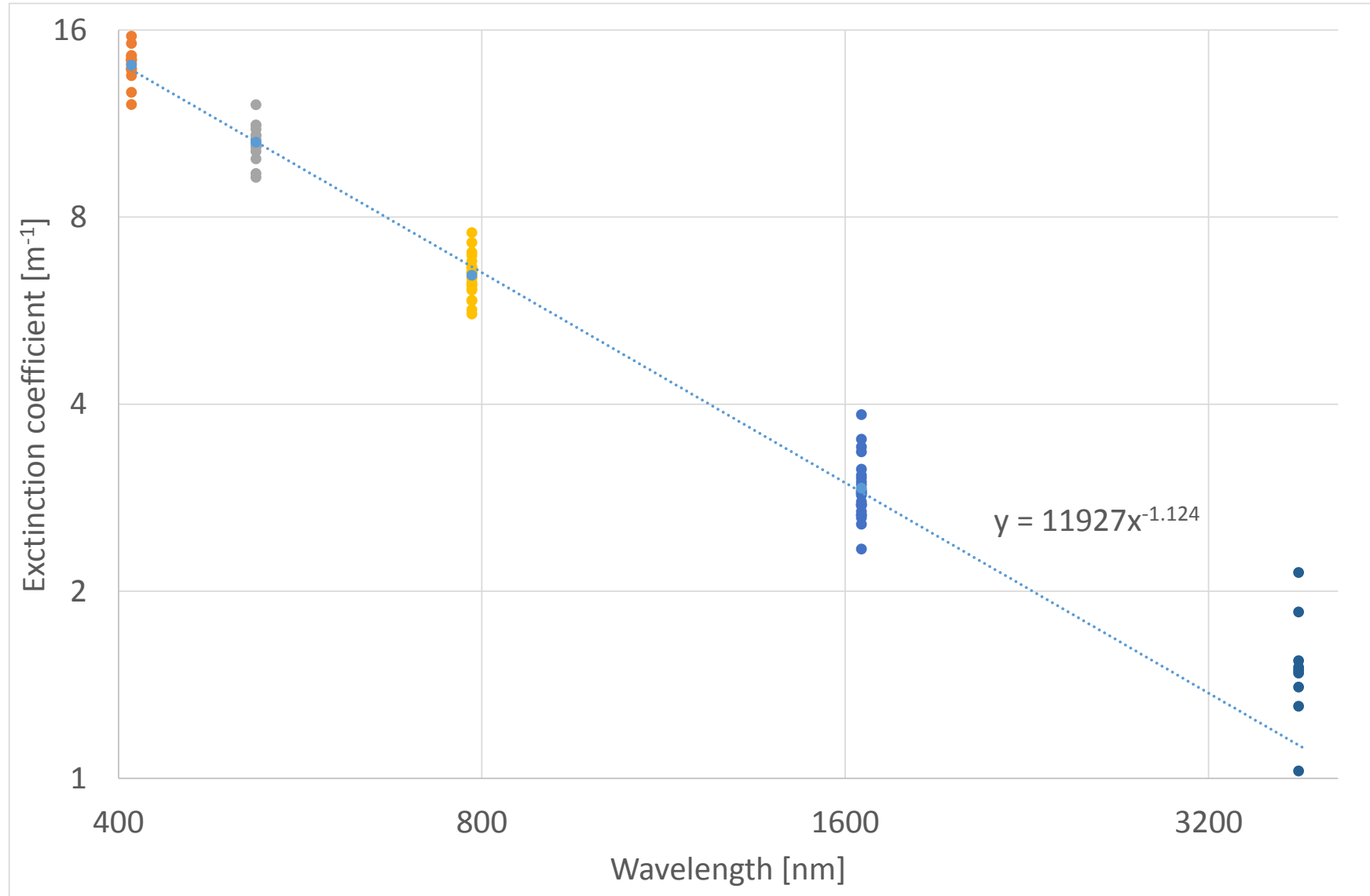
Longueurs d'onde : 410 nm, 520 nm, 785 nm, 1650 nm, 3800 nm

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

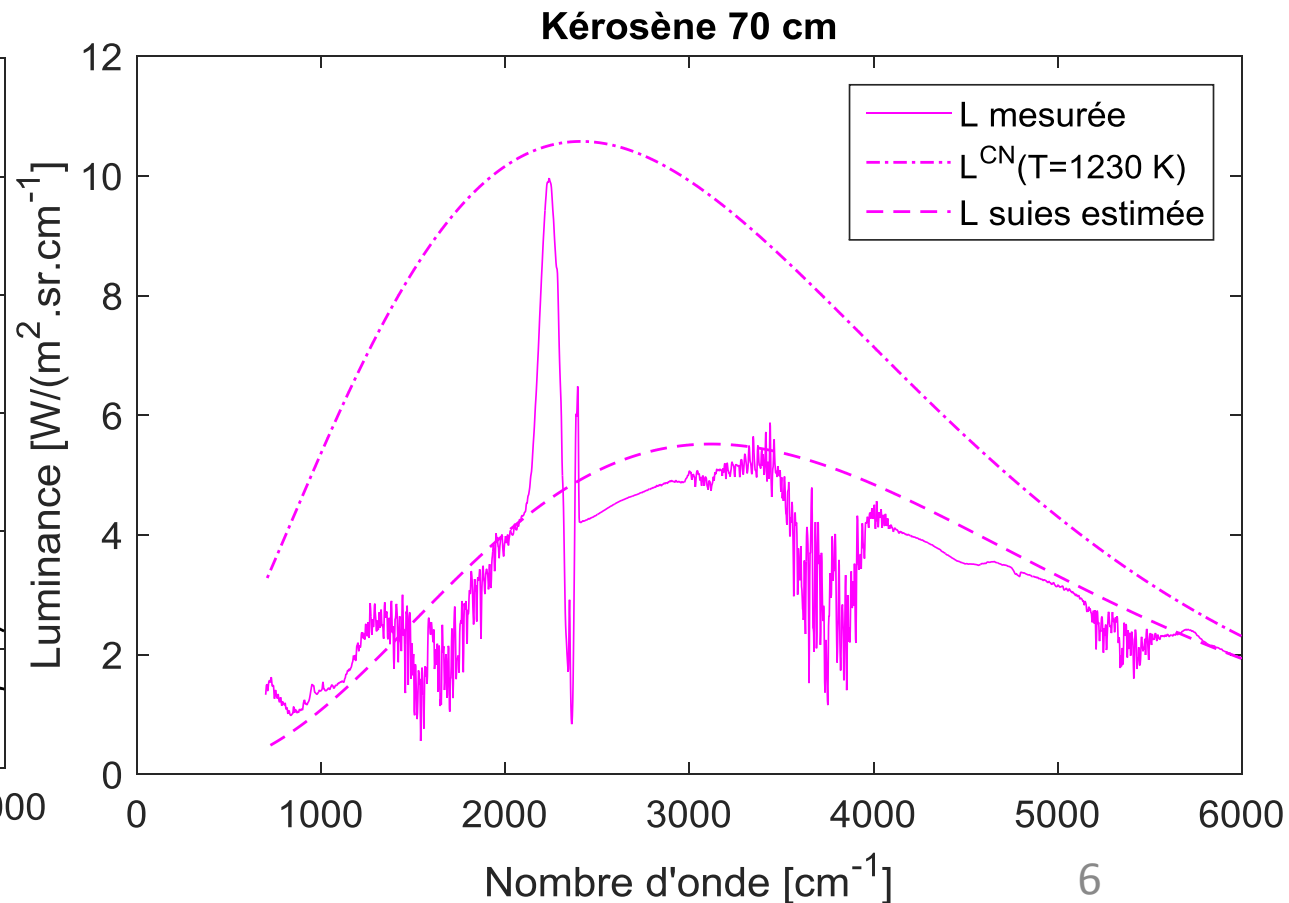
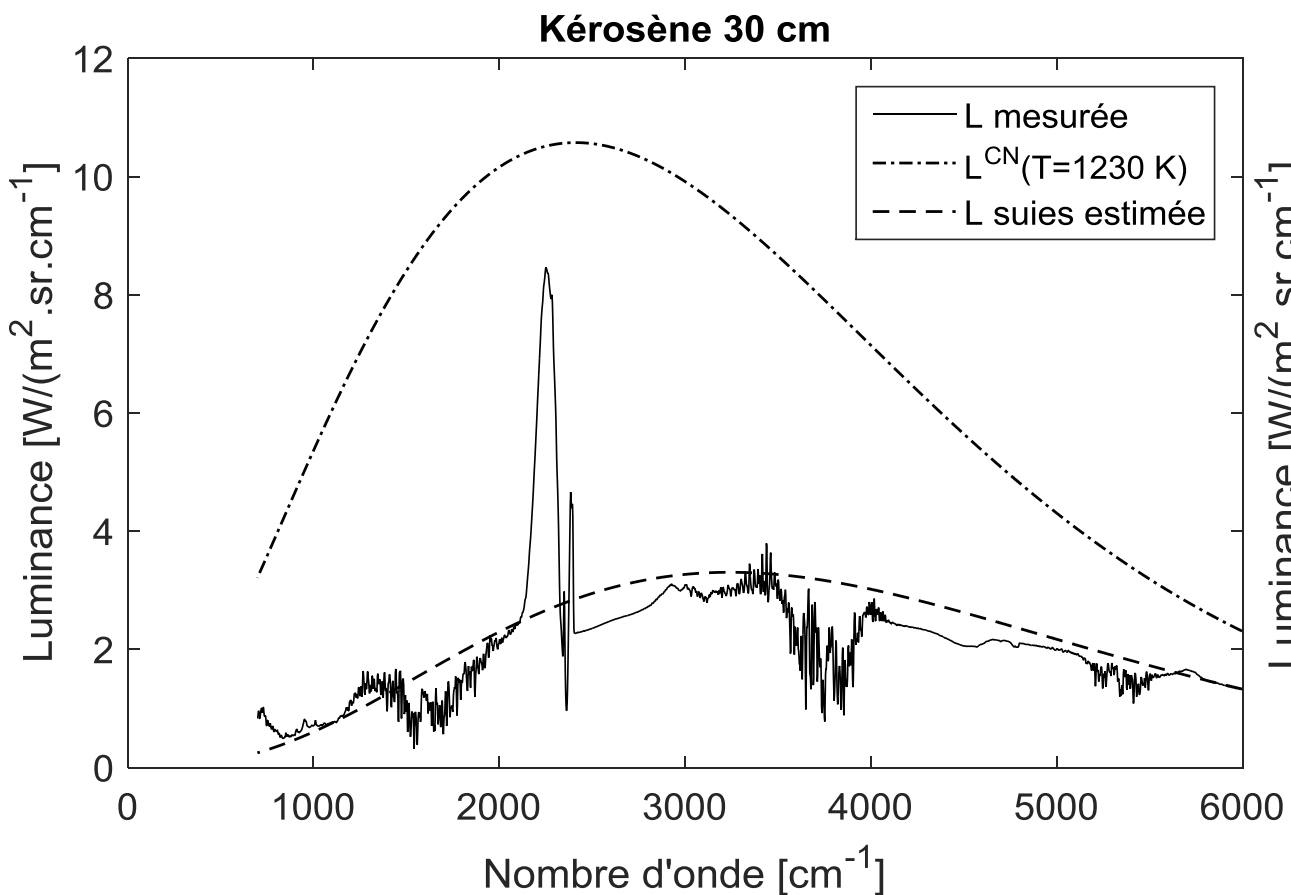
Modèle :

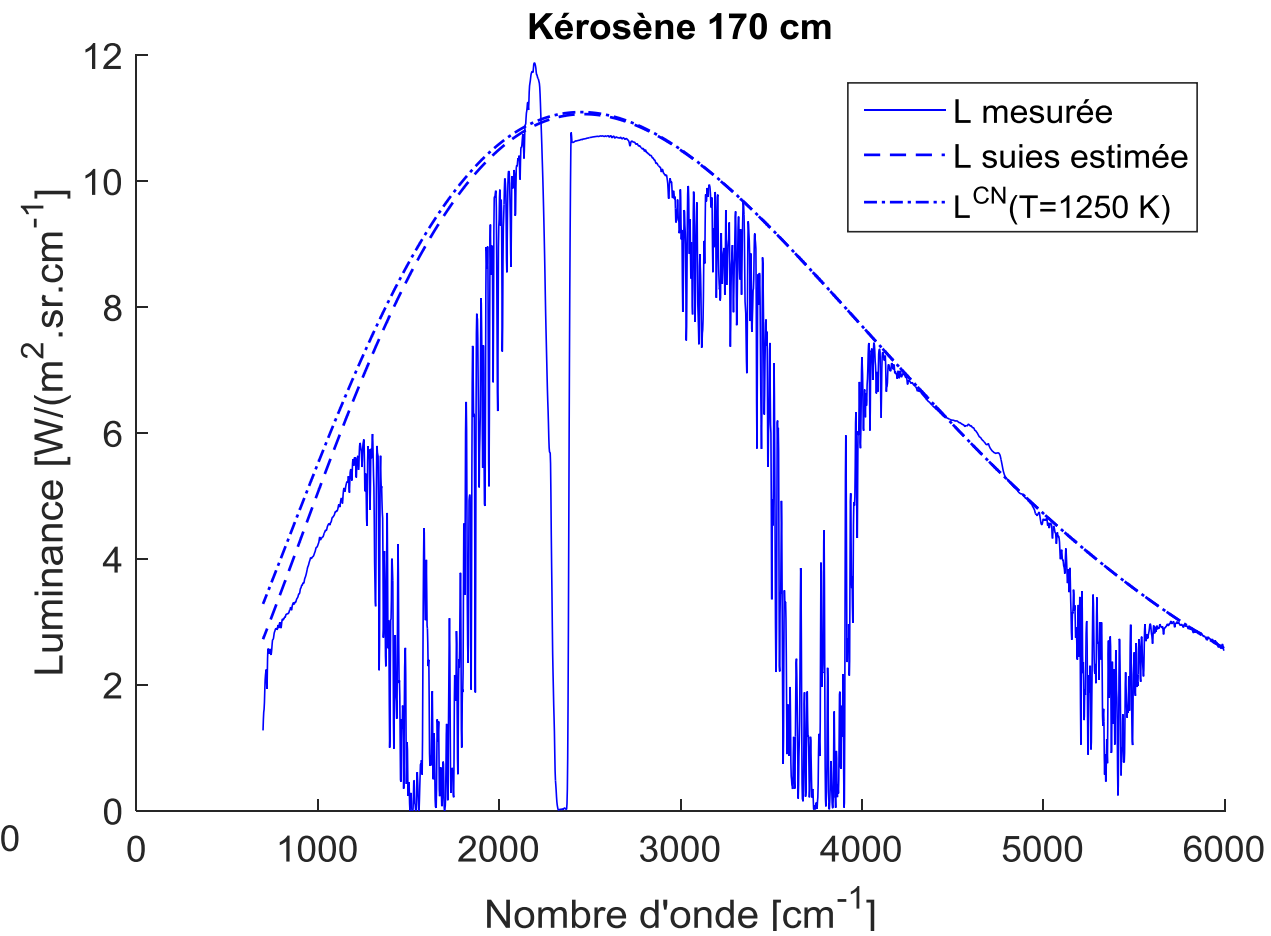
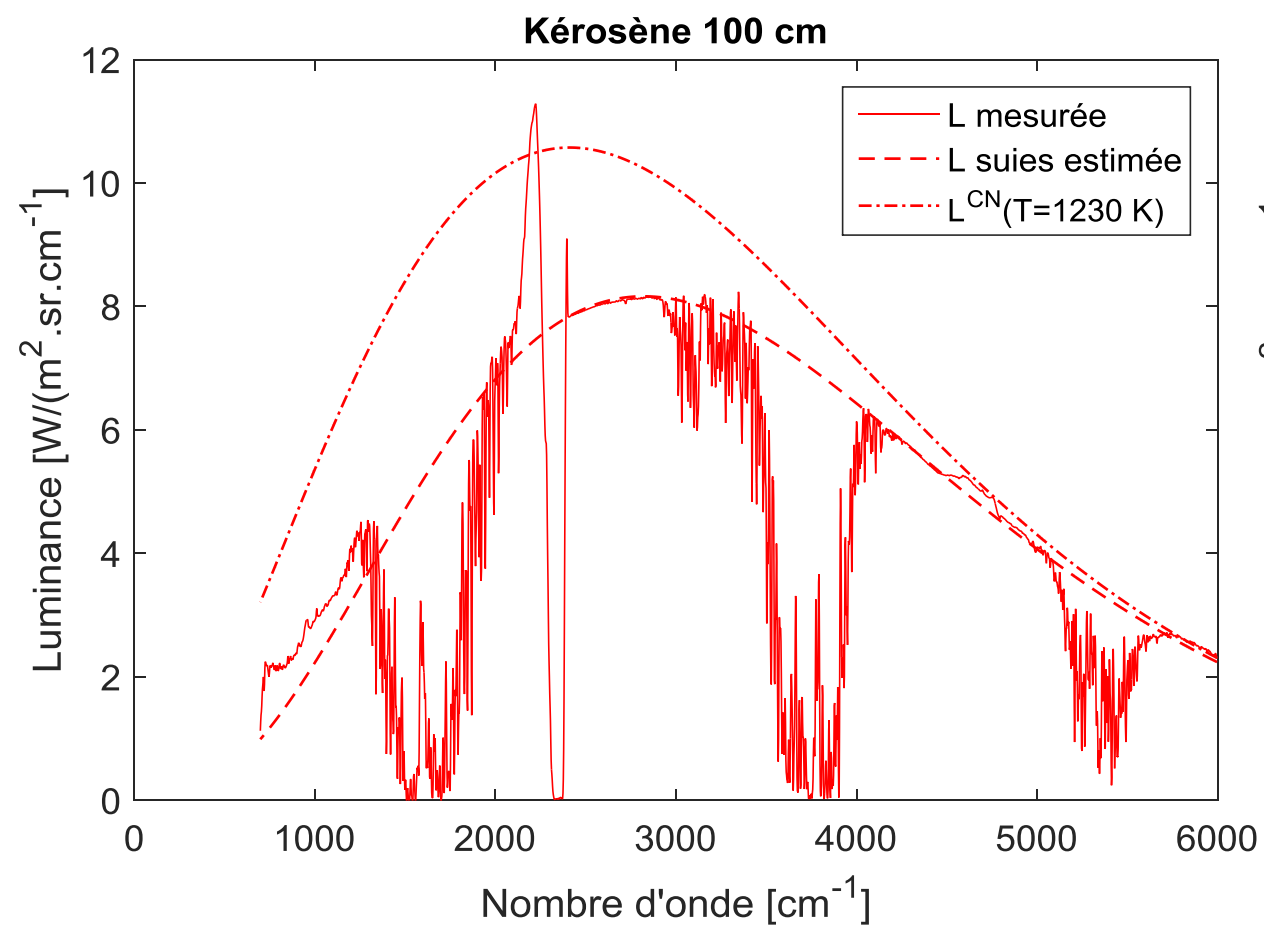
$$L_\nu = (1 - \exp(-\kappa(\lambda) \times e) L_\nu^{CN}(T))$$

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

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

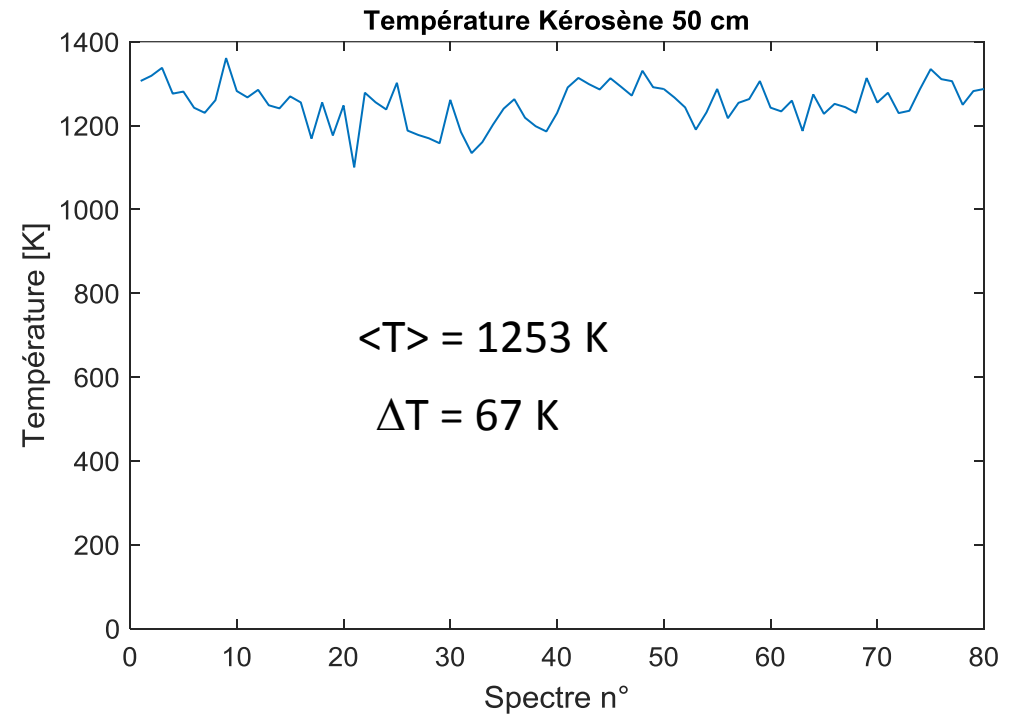
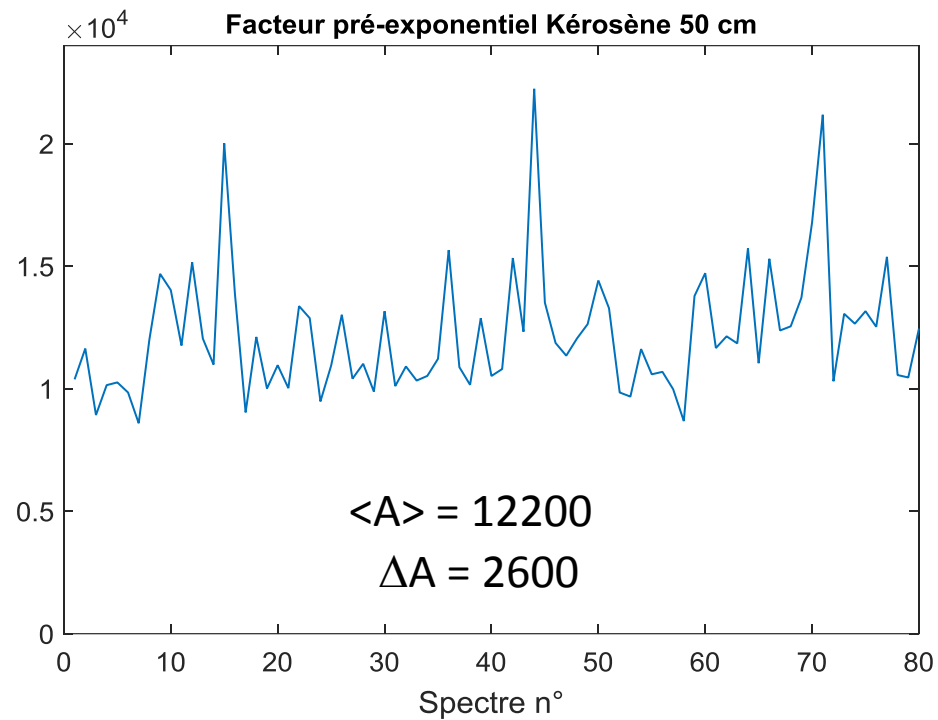
$$L_\nu = (1 - \exp(-\kappa(\lambda) \times e)) L_\nu^{CN}(T)$$

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

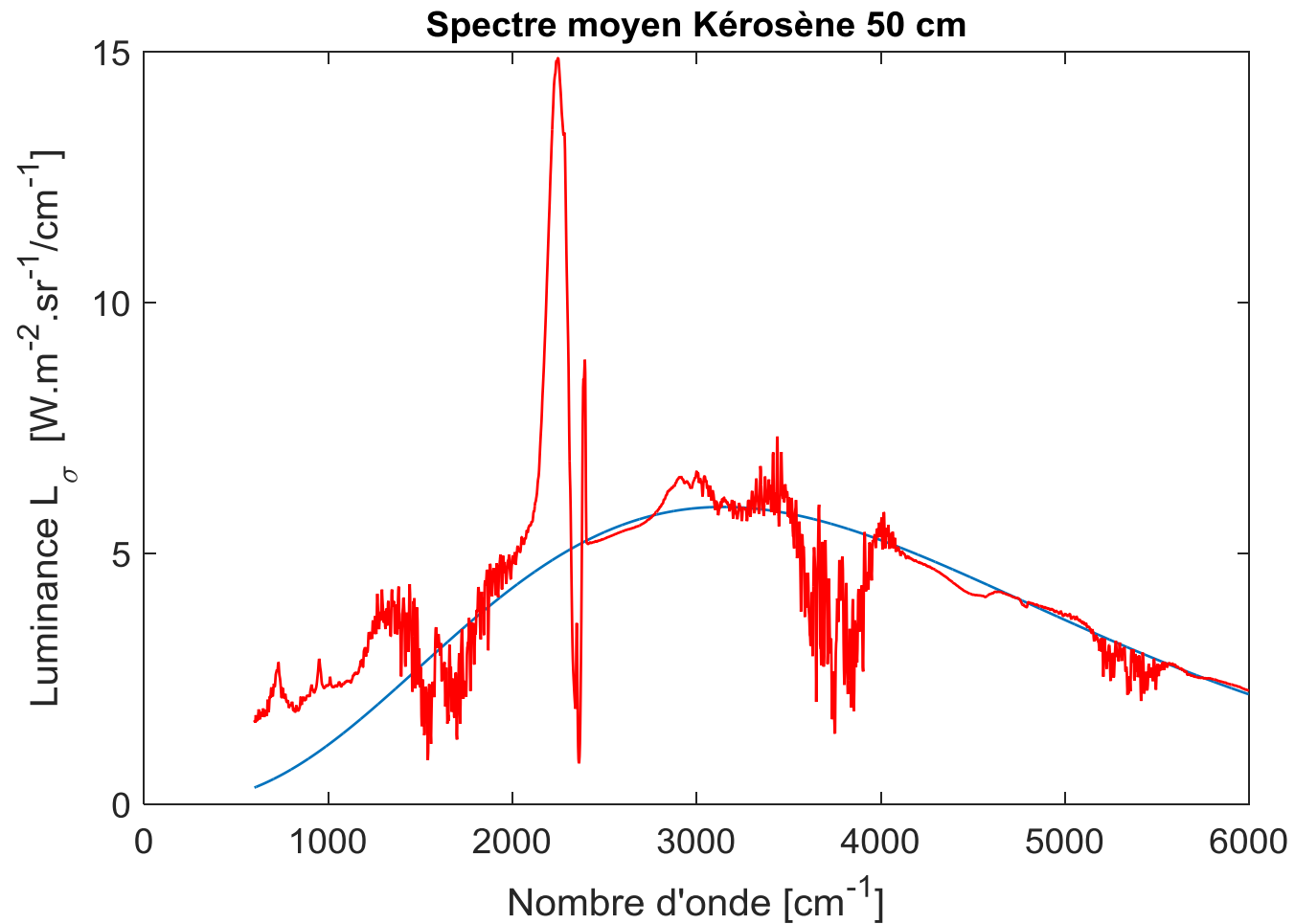
A et T paramètres d'ajustement

$\alpha = 1,1$ paramètre fixe

Kérosène, bac 50 cm



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



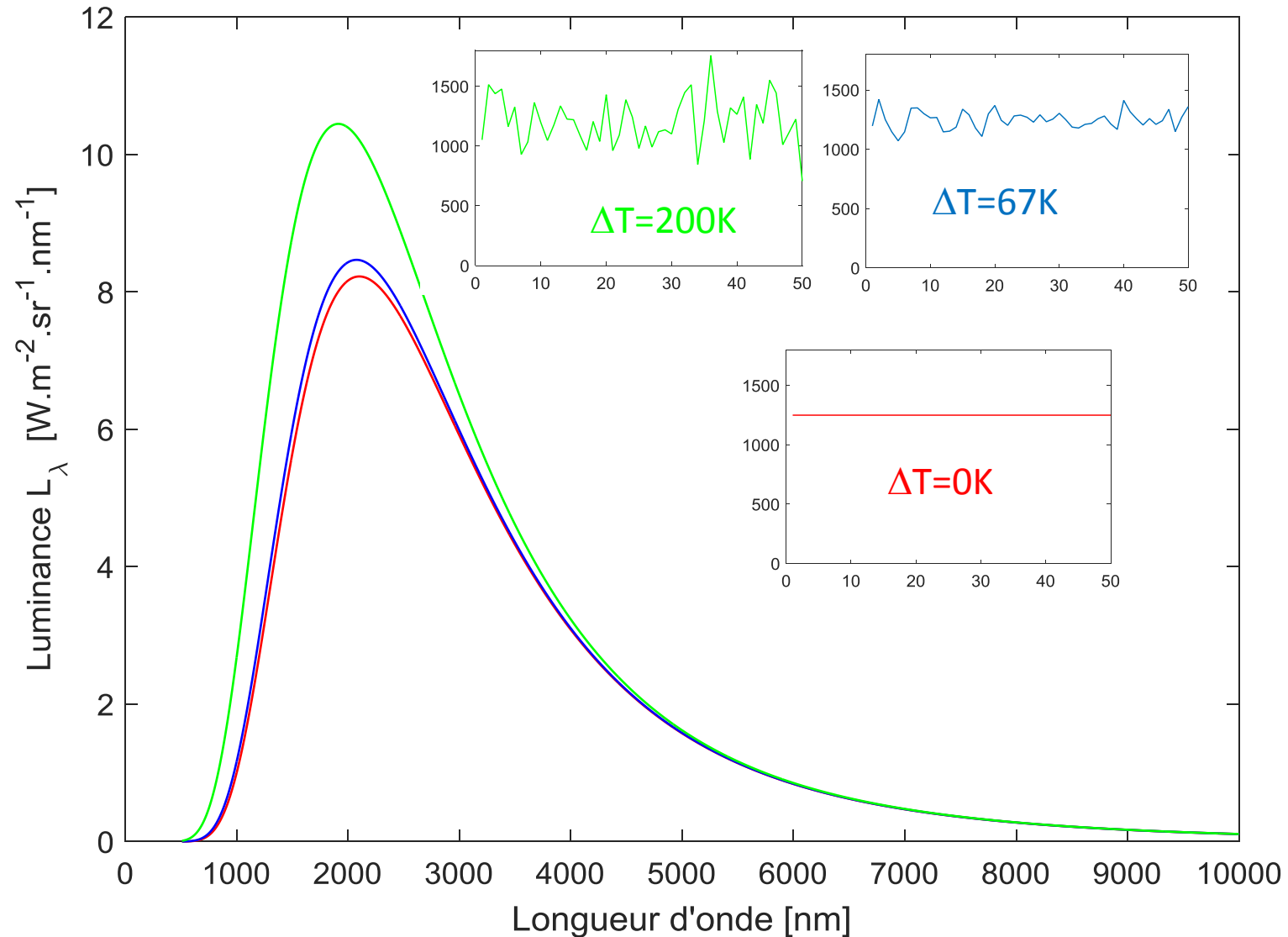
Kérosène, bac 70 cm : $\langle A \rangle = 12300$, A spectre moyen = 12120, $\langle T \rangle = 1295$ K, T spectre moyen = 1296 K

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

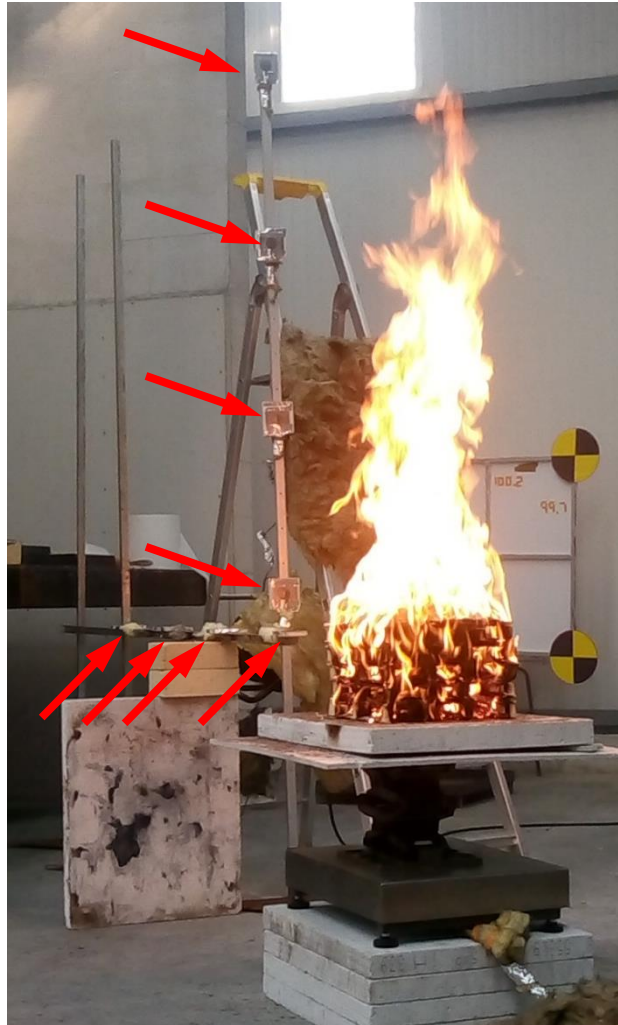
Spectre moyenné en espace

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

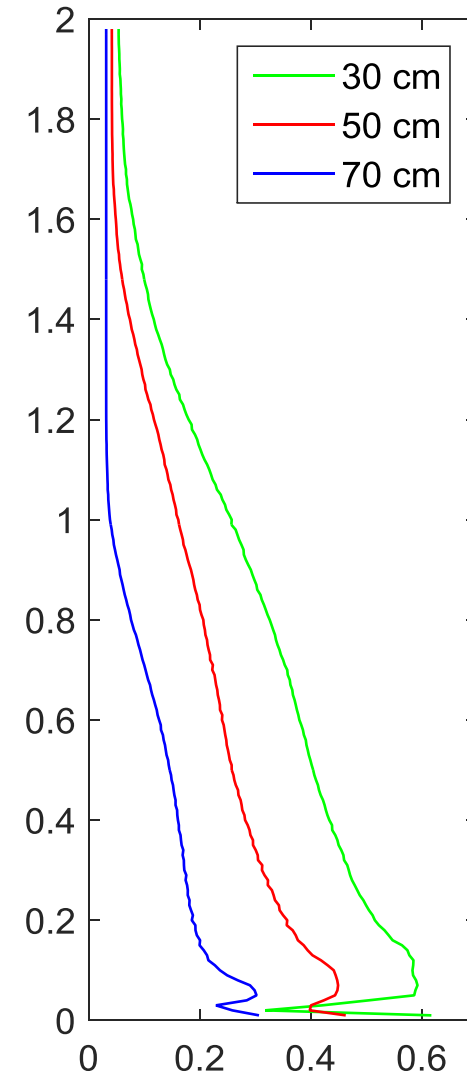
Fluctuations de température suivant une loi gaussienne de moyenne $\langle T \rangle = 1250$ K et d'écart-type ΔT



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

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

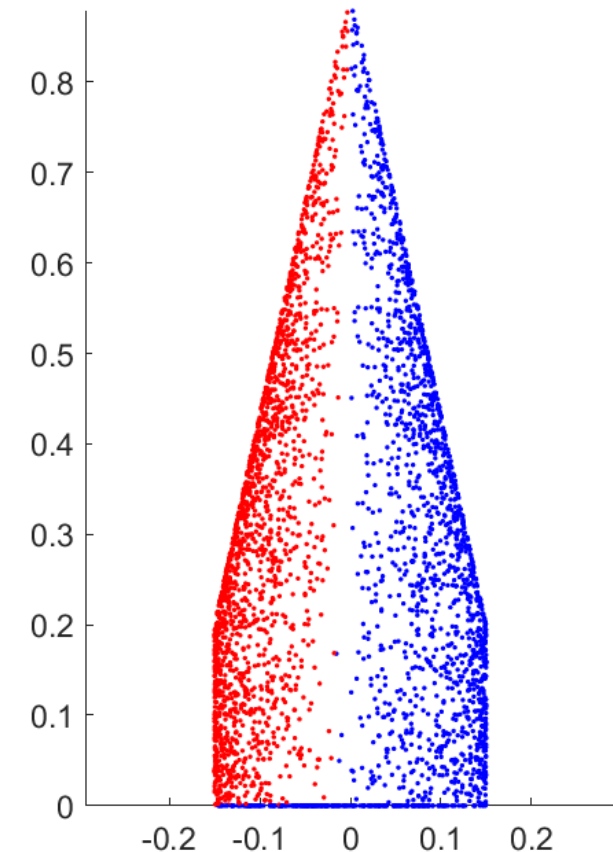
$$L_v = (1 - \exp(-\kappa(\lambda) \times e) L_v^{CN}(T)$$

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

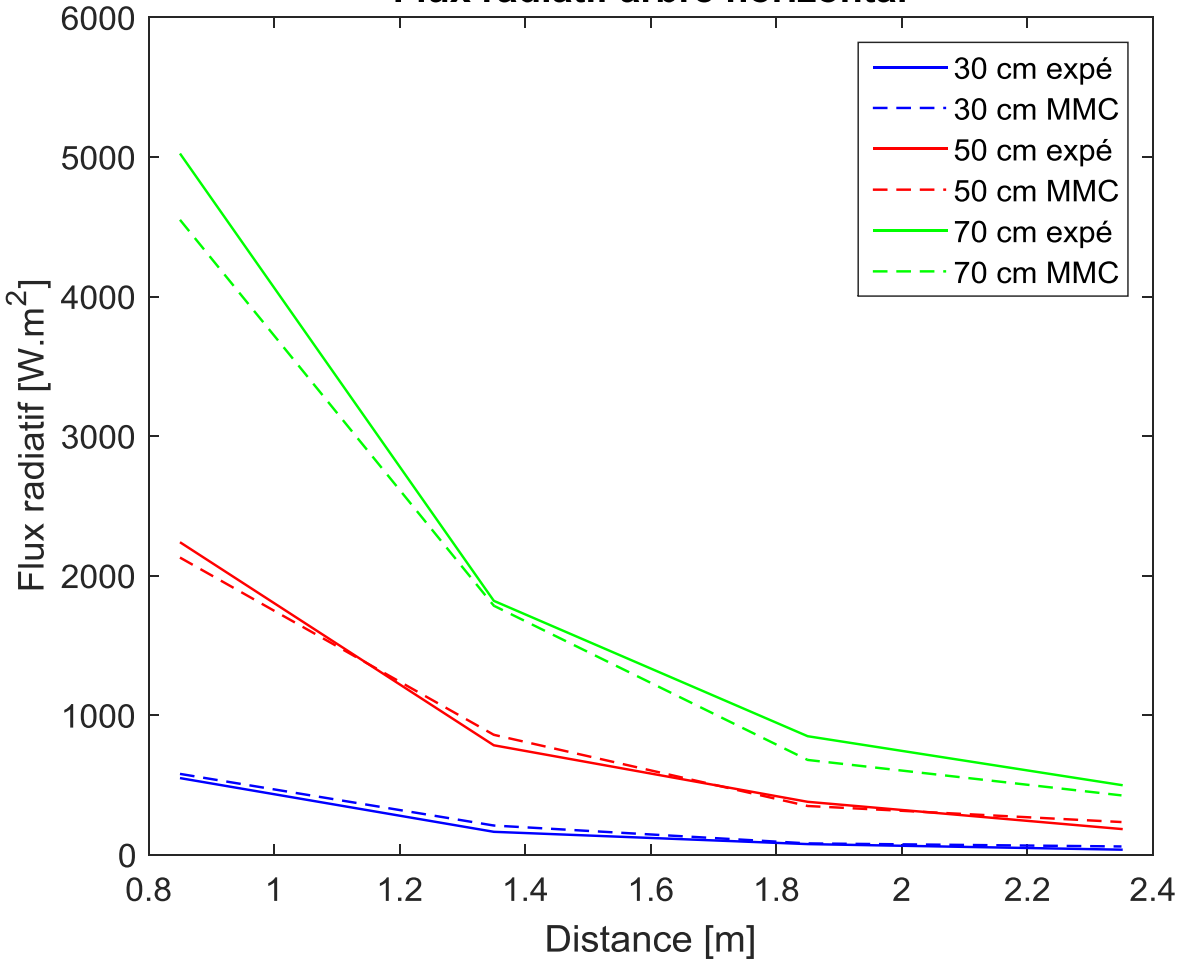
Hypothèses

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

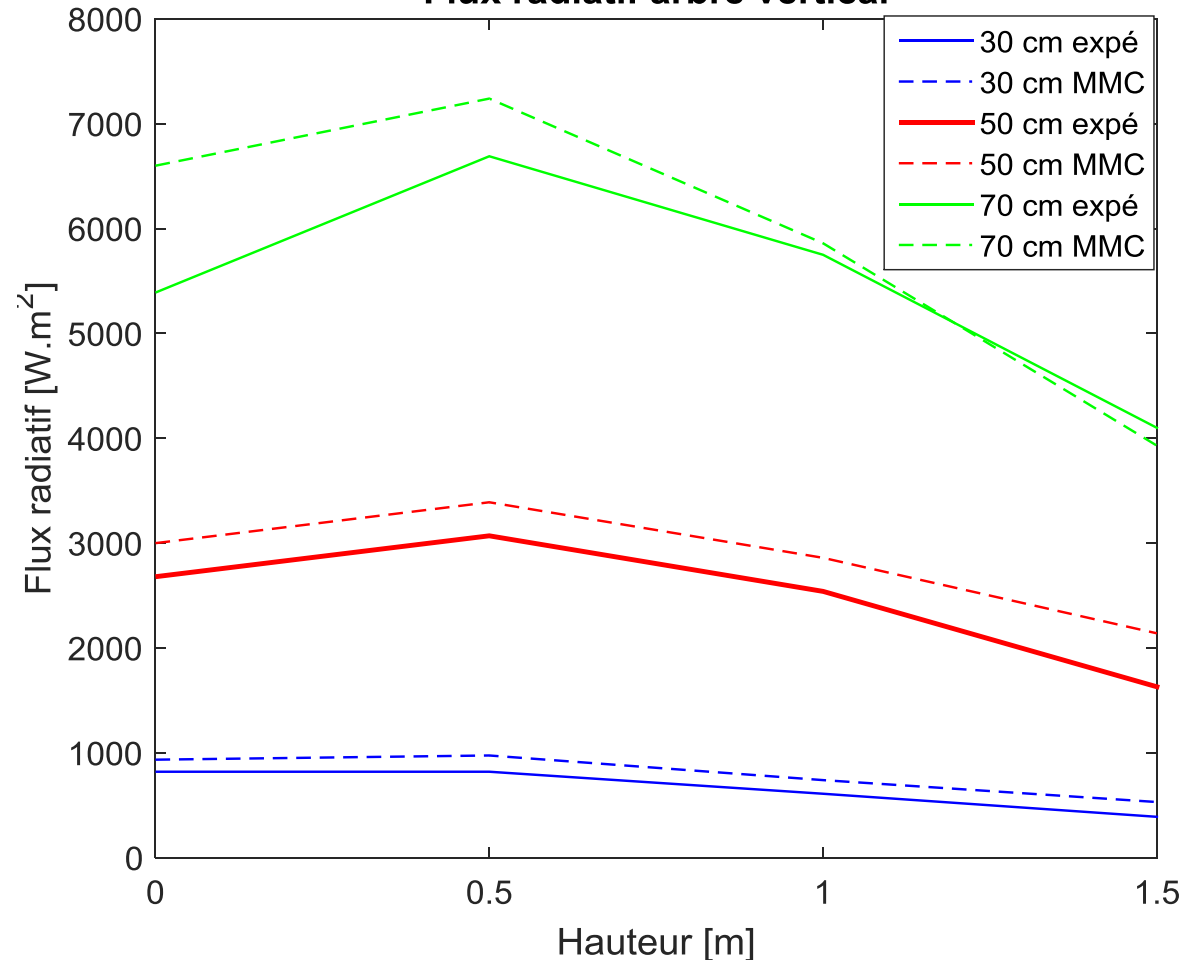
Forme de flamme simplifiée



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, 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)

