



# Rayonnement des flammes

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, Balma, 12- 13 octobre 2017

# Problématique

**Emission de rayonnement par une flamme** : terme source pour l'évaporation ou la pyrolyse du combustible

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

**Modèles** :

- Emission surfacique par un panneau rayonnant noir ou gris

*Modèle relativement limité, intuitivement on pressent que l'émission par une flamme doit dépendre de son épaisseur et qu'en raison de la présence de gaz, l'émission n'est probablement pas noire/grise*

- Emission volumique par un milieu homogène, isotherme équivalent

$$L_\nu = \epsilon(\nu) L_\nu^{CN}(T)$$

$L_\nu$  Luminance émise

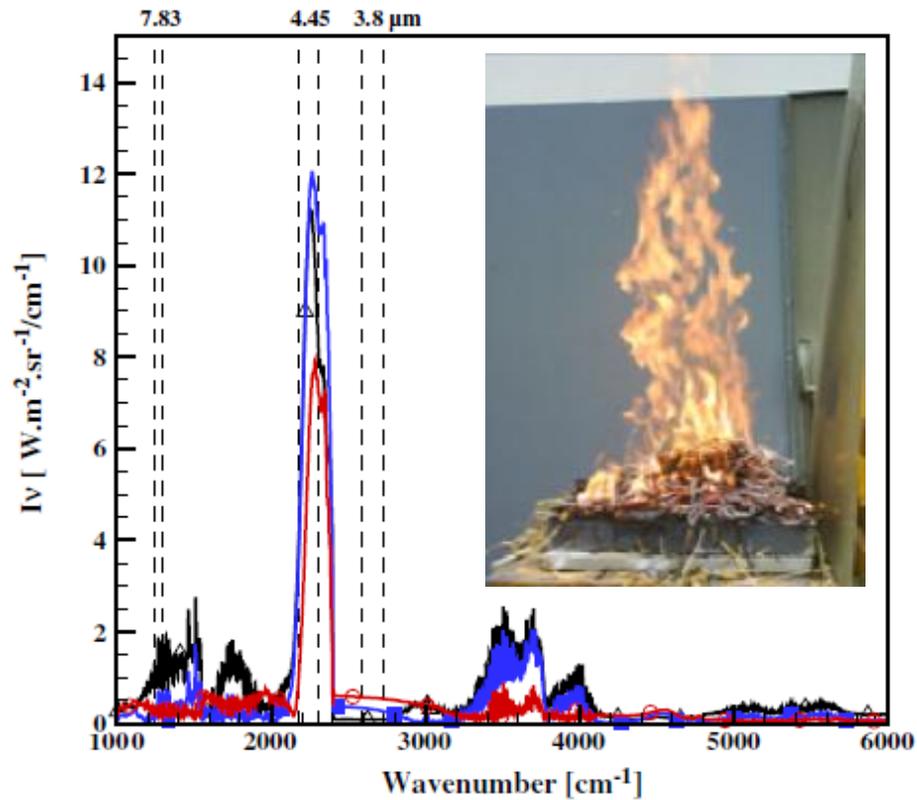
$L_\nu^{CN}(T)$  Luminance du corps noir à la température T

$\epsilon(\nu)$  Emissivité spectrale

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

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

## Quelques travaux antérieurs de l'équipe « Feux » du LEMTA



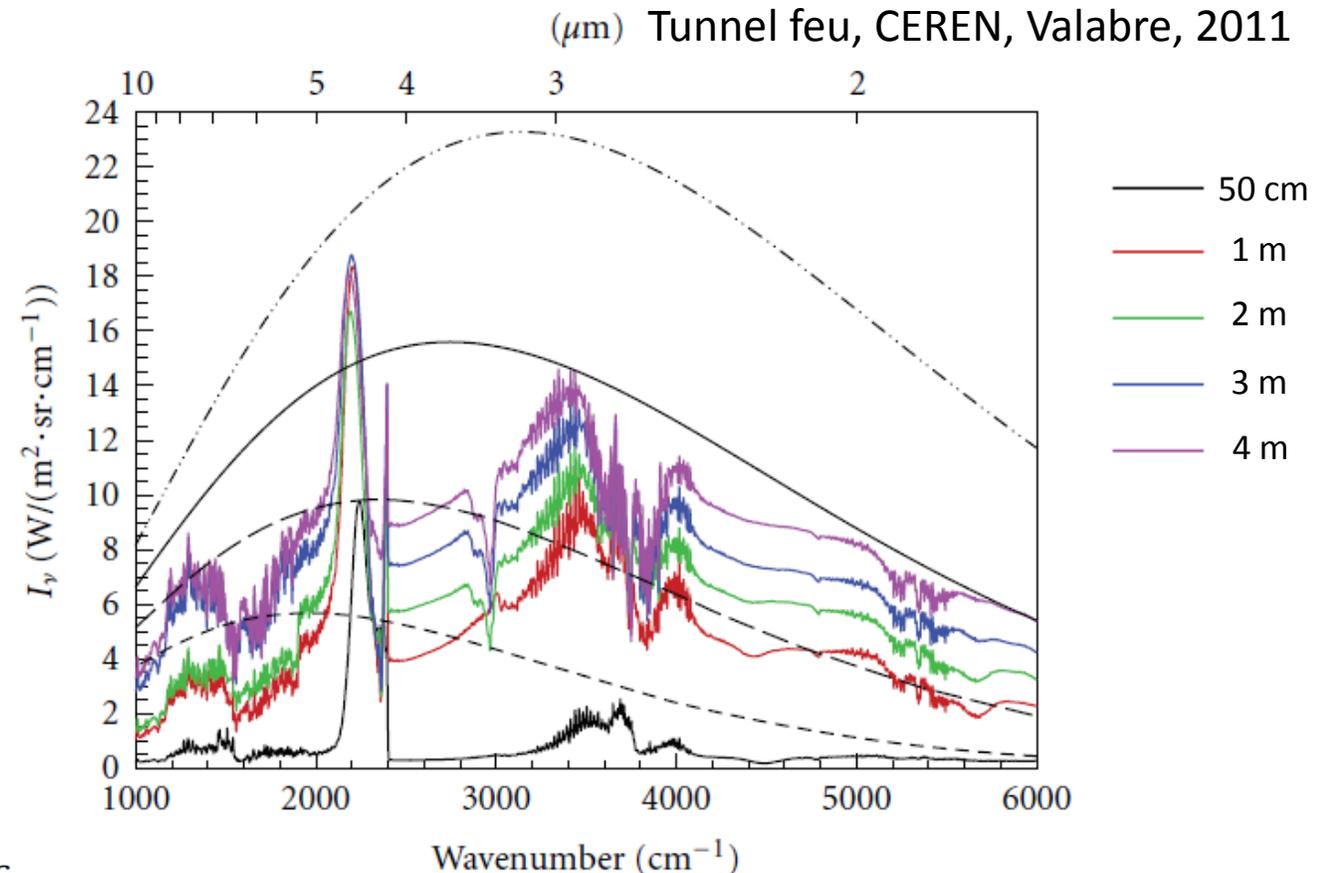
Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire

G. Parent, Z. Acem, S. Lechêne, P. Boulet\*

*International Journal of Thermal Sciences* 49 (2010) 555–562

### Questions :

- Comment évolue le rayonnement émis par une flamme avec son épaisseur ?
- Une flamme peut-elle être noire (opaque) ?
- Peut-on déterminer  $T$  indépendamment de  $\epsilon(\nu)$  ?



### Experimental Investigation of Radiation Emitted by Optically Thin to Optically Thick Wildland Flames

P. Boulet,<sup>1</sup> G. Parent,<sup>1</sup> Z. Acem,<sup>1</sup> A. Kaiss,<sup>2</sup> Y. Billaud,<sup>2</sup> B. Porterie,<sup>2</sup> Y. Pizzo,<sup>2,3</sup> and C. Picard<sup>3</sup>

*Journal of Combustion*

Volume 2011, Article ID 137437,

## Instrumentation mise en œuvre

- *Mesure de masse, thermocouples, fluxmètres, caméras visible*
- Spectromètre à transformée de Fourier
- Caméra multispectrale, 3 filtres passe-bande :  $2,85 \mu\text{m}$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ;  $3,8 \mu\text{m}$  (suies) ;  $4,45 \mu\text{m}$  ( $\text{CO}_2$ )

**NEW!**

- Mesure d'opacité multispectrale.

Longueurs d'onde : 410 nm, 520 nm, 785 nm, 1650 nm, 2300 nm, 3800 nm



### 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)

### Difficultés :

- Mesure multi-longueurs d'onde
- Transmission potentiellement très faible ( $10^{-5}$ )
- Déviation du faisceau dans la flamme (gradients d'indice optique)



# Mesures feux de grande taille : Hangar HN6, Aéroport de Paris, Orly

Hangar dimensions L 300 m x l 50 m x H 20 m

2 campagnes de mesure :

- Février 2017, bûchers palettes bois : 1 x 10 palettes, 2x3x10 palettes, 4x3x9 palettes
- Juillet 2017, bacs de kérosène : 70 x70 cm ; 1m x 1m ; 1,7 x 1,7 m ; 2,5 m x 2,5 m



Bac de kérosène, 2,5 m x 2,5 m, 6 m<sup>2</sup>, 300 L de kérosène



# Mesures feux de petite taille : Plateforme PROMETHEI, La Bouzule (Nancy)

1 campagne de mesure, octobre 2017

- bûchers « mini » palettes bois : 30x30 cm ; 50x50 cm ; 70x70 cm

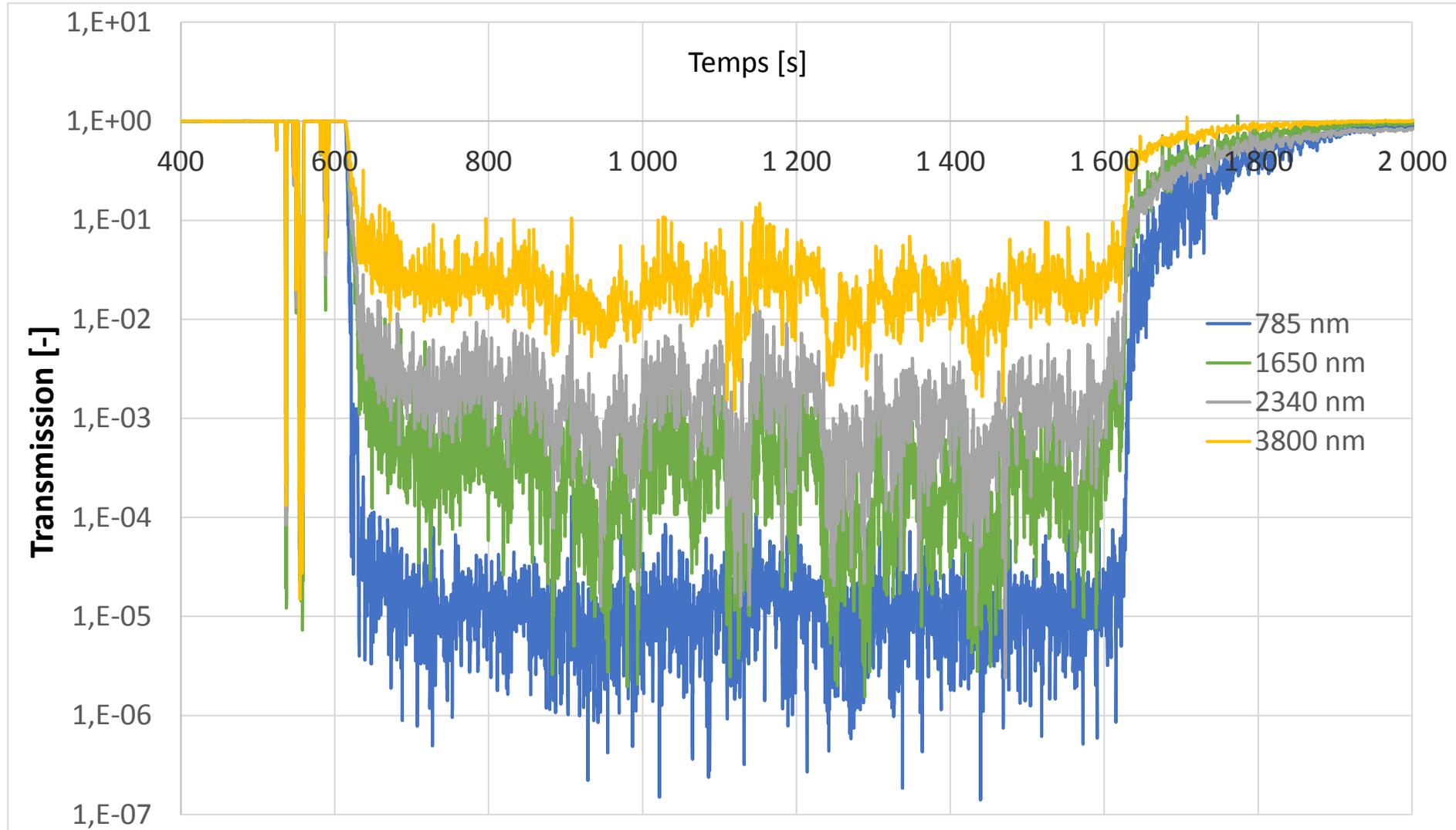


- Bacs combustible liquide (kérosène, gazole) : 30x30 cm ; 50x50 cm ; 70x70 cm



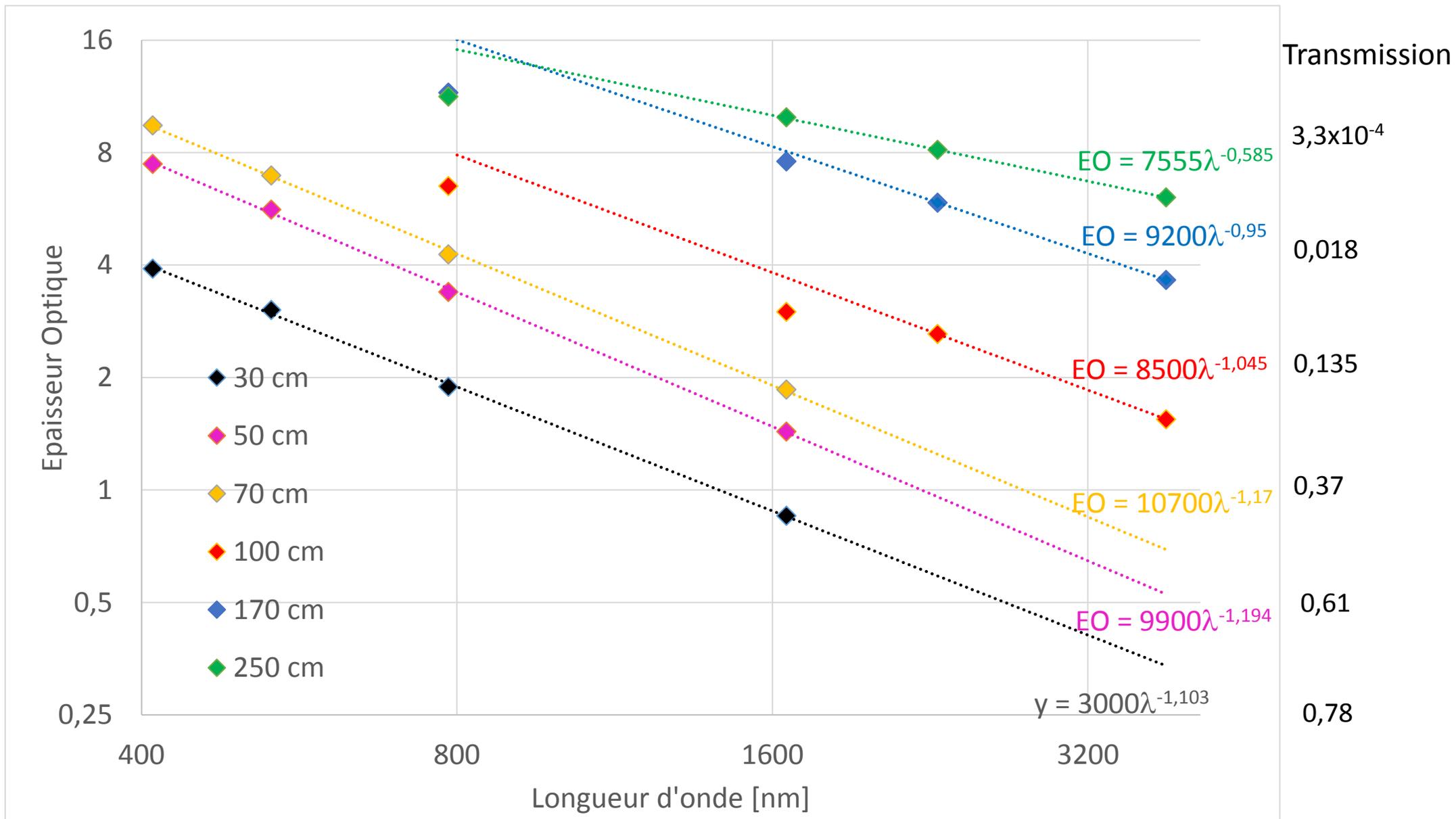
# Résultats

# Mesure d'opacité de la flamme

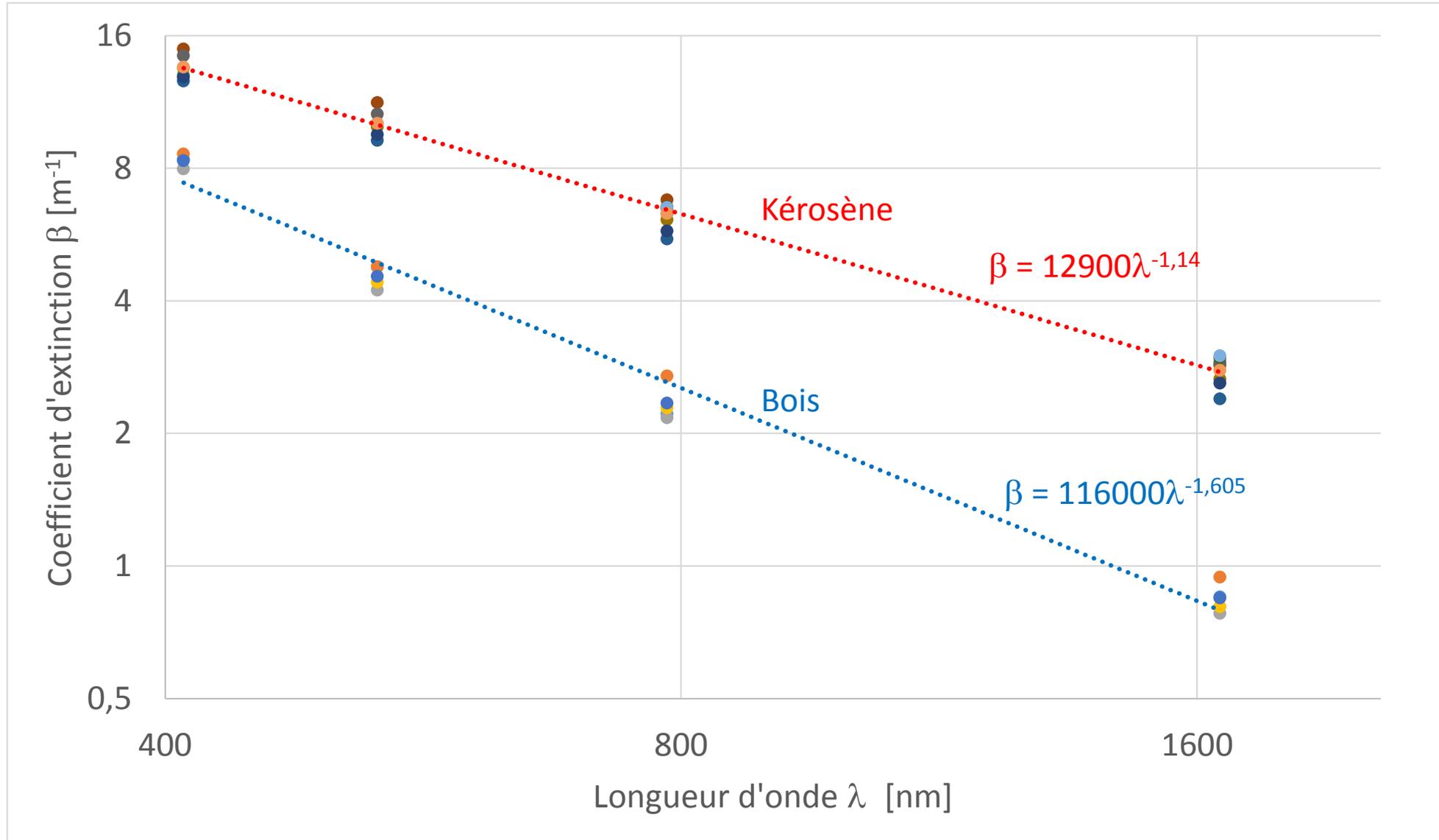


Bac kérosène 1,7 m

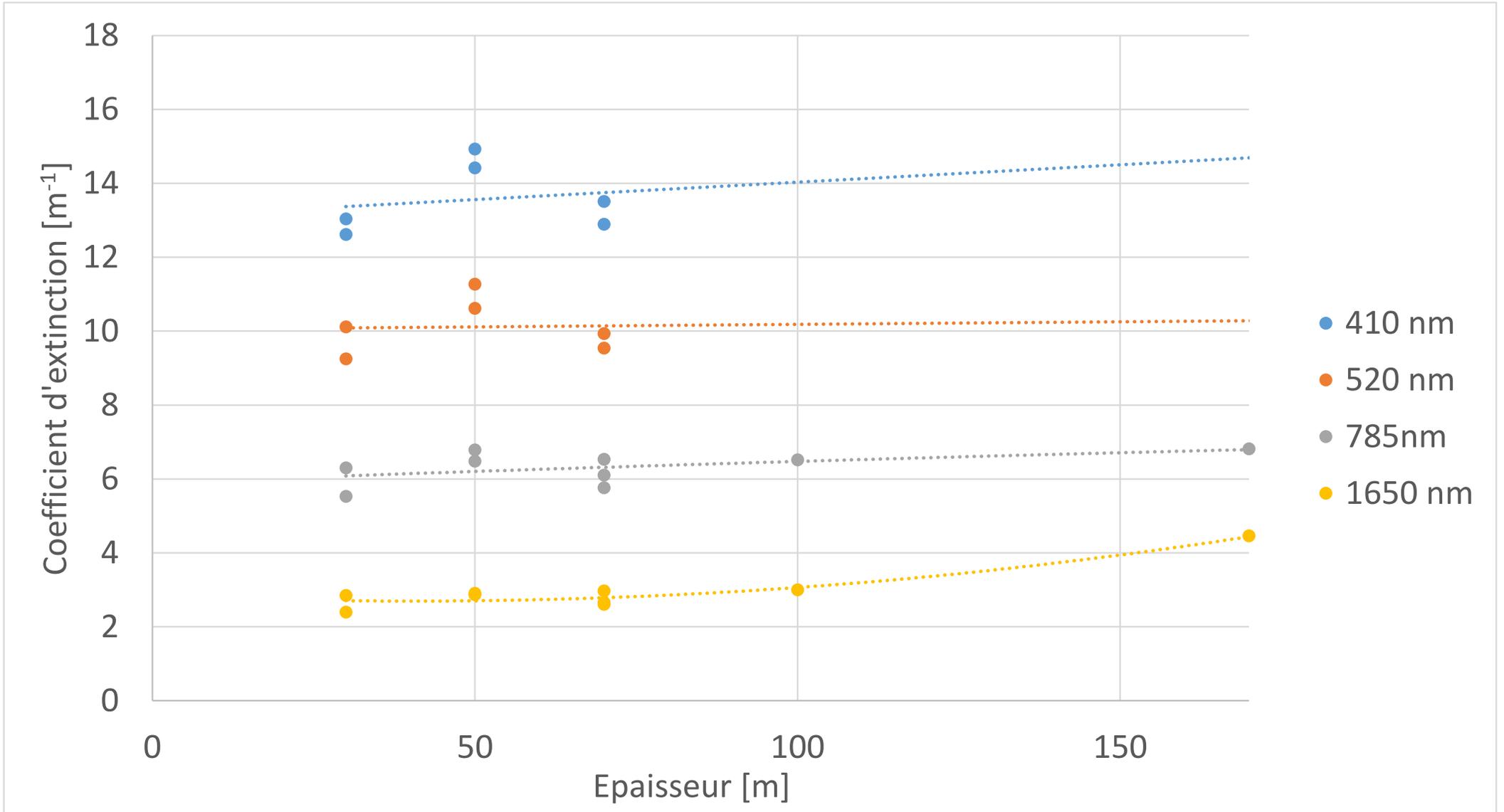
# Epaisseur optique (Kérosène)



# Coefficient d'extinction en fonction de $\lambda$

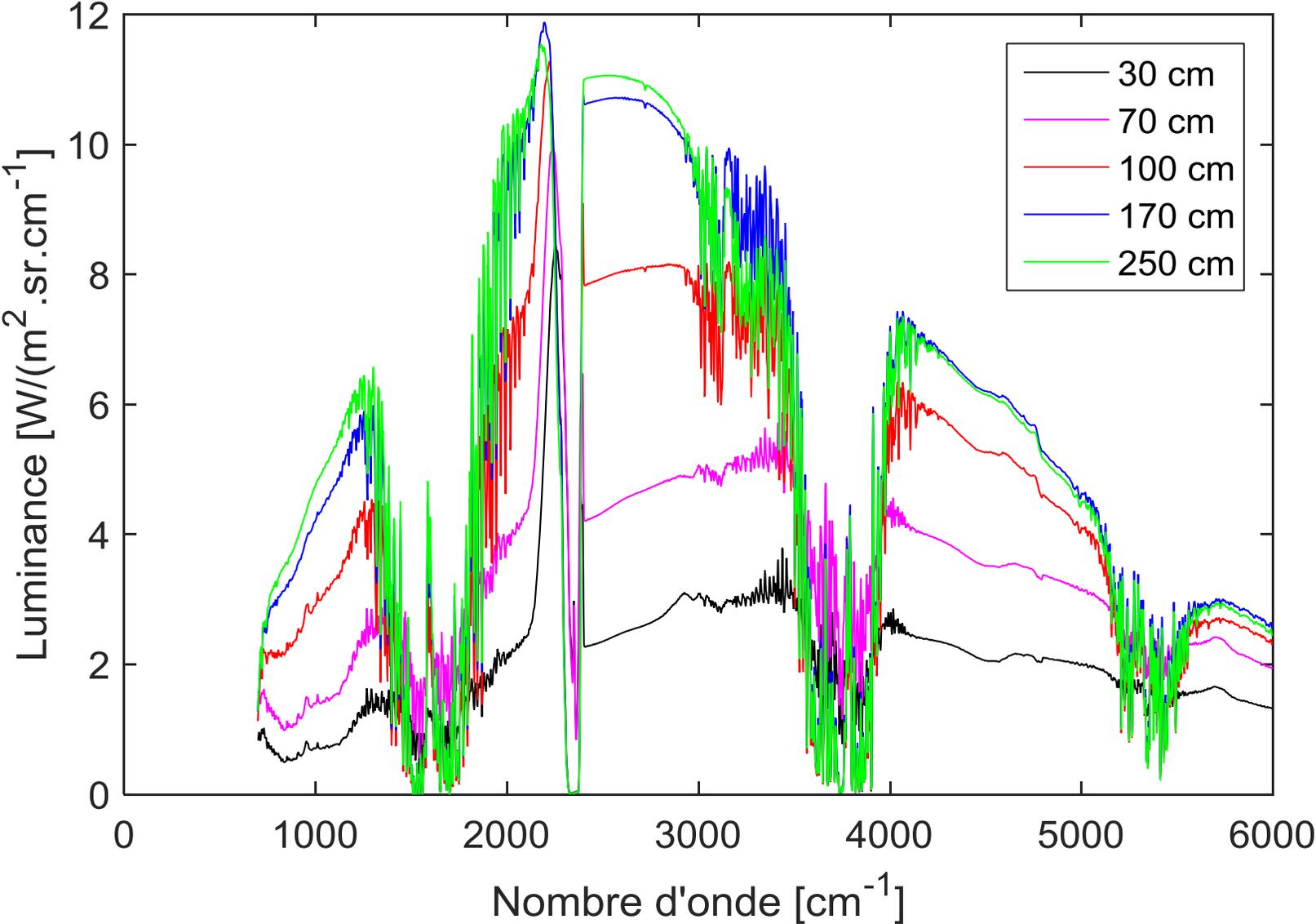


Coefficient d'extinction en fonction de l'épaisseur (kérosène)



Emission de rayonnement par la flamme

Bac kérosène



# Modélisation de l'émission par les suies

$\sigma(\nu)$  Coefficient de diffusion

$\kappa(\nu)$  Coefficient d'absorption

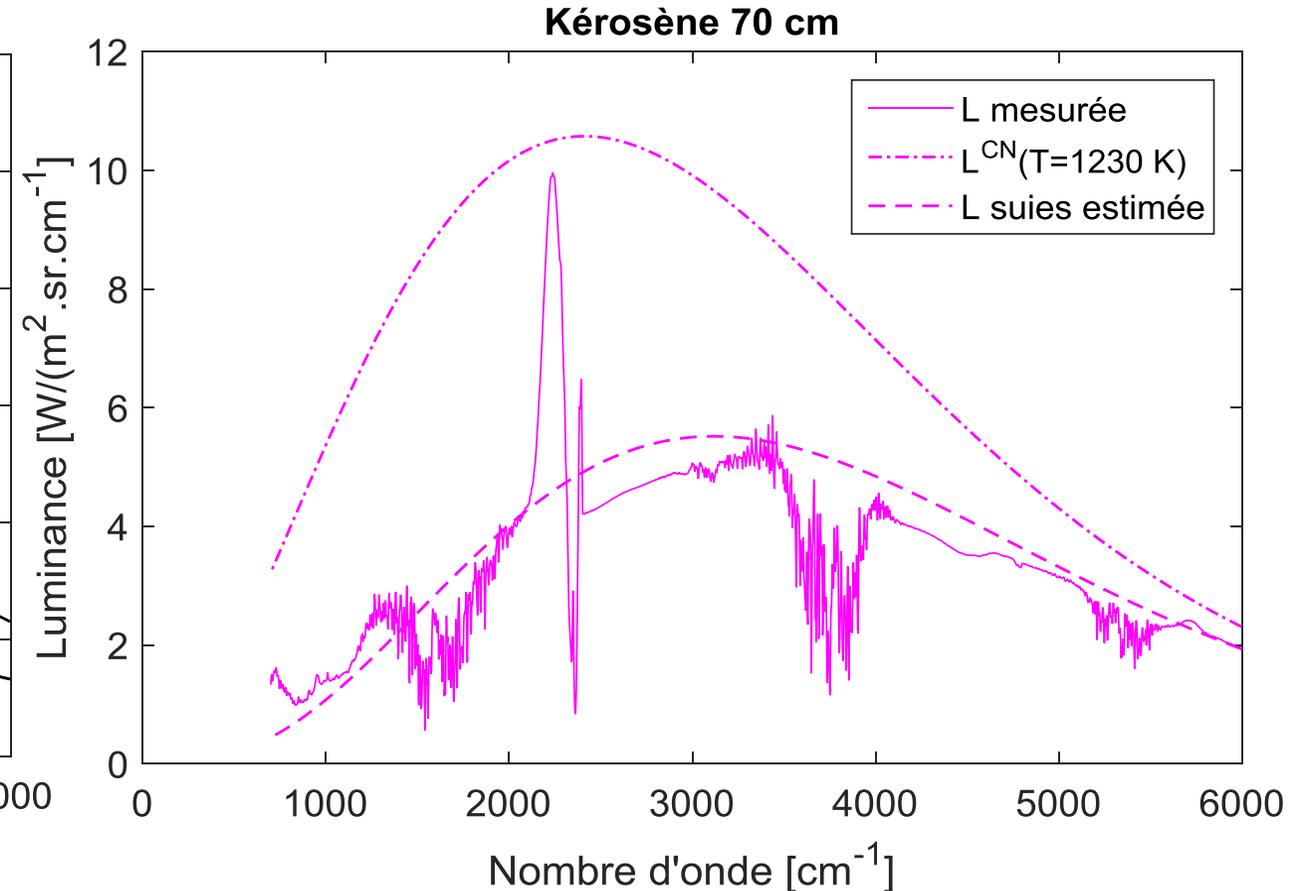
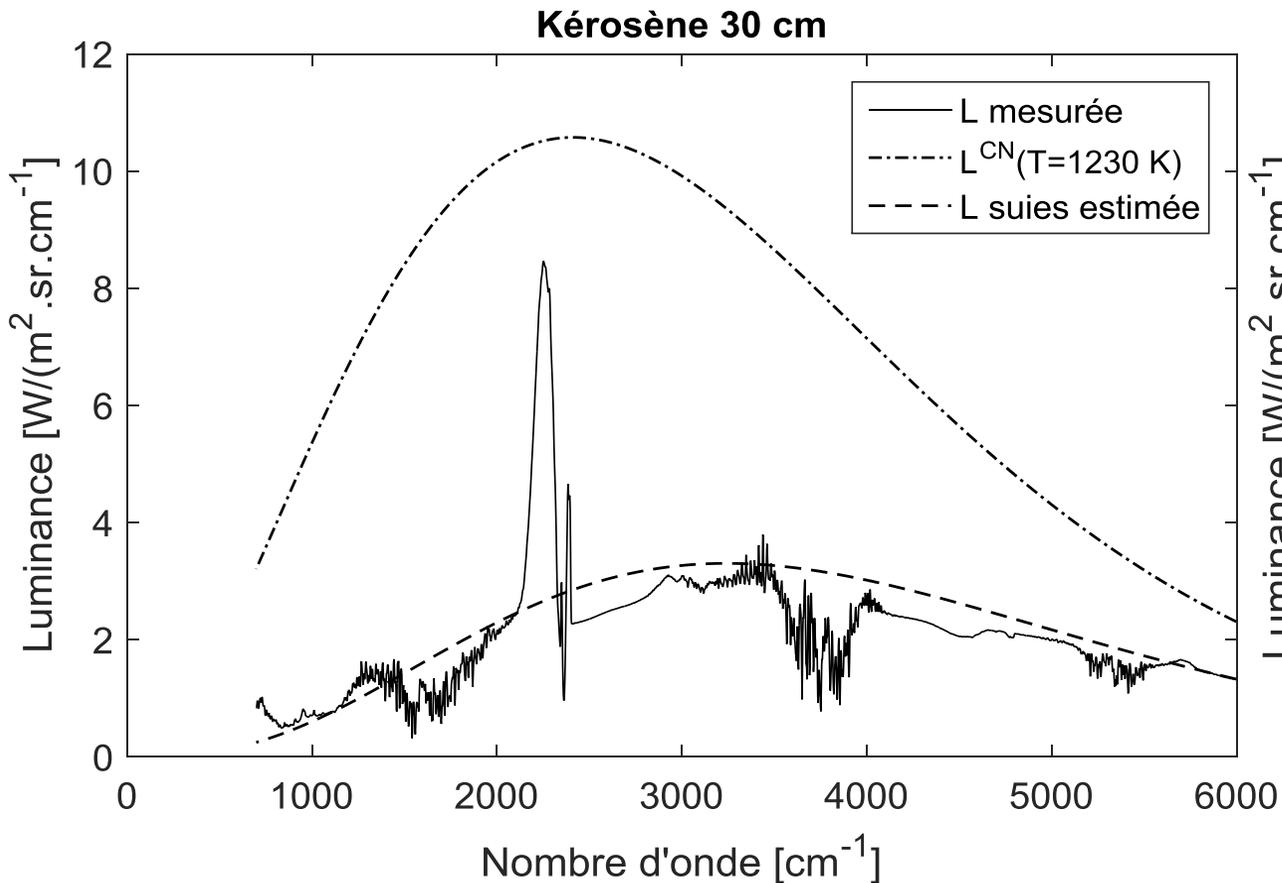
$\beta(\nu) = \kappa(\nu) + \sigma(\nu)$  Coefficient d'extinction

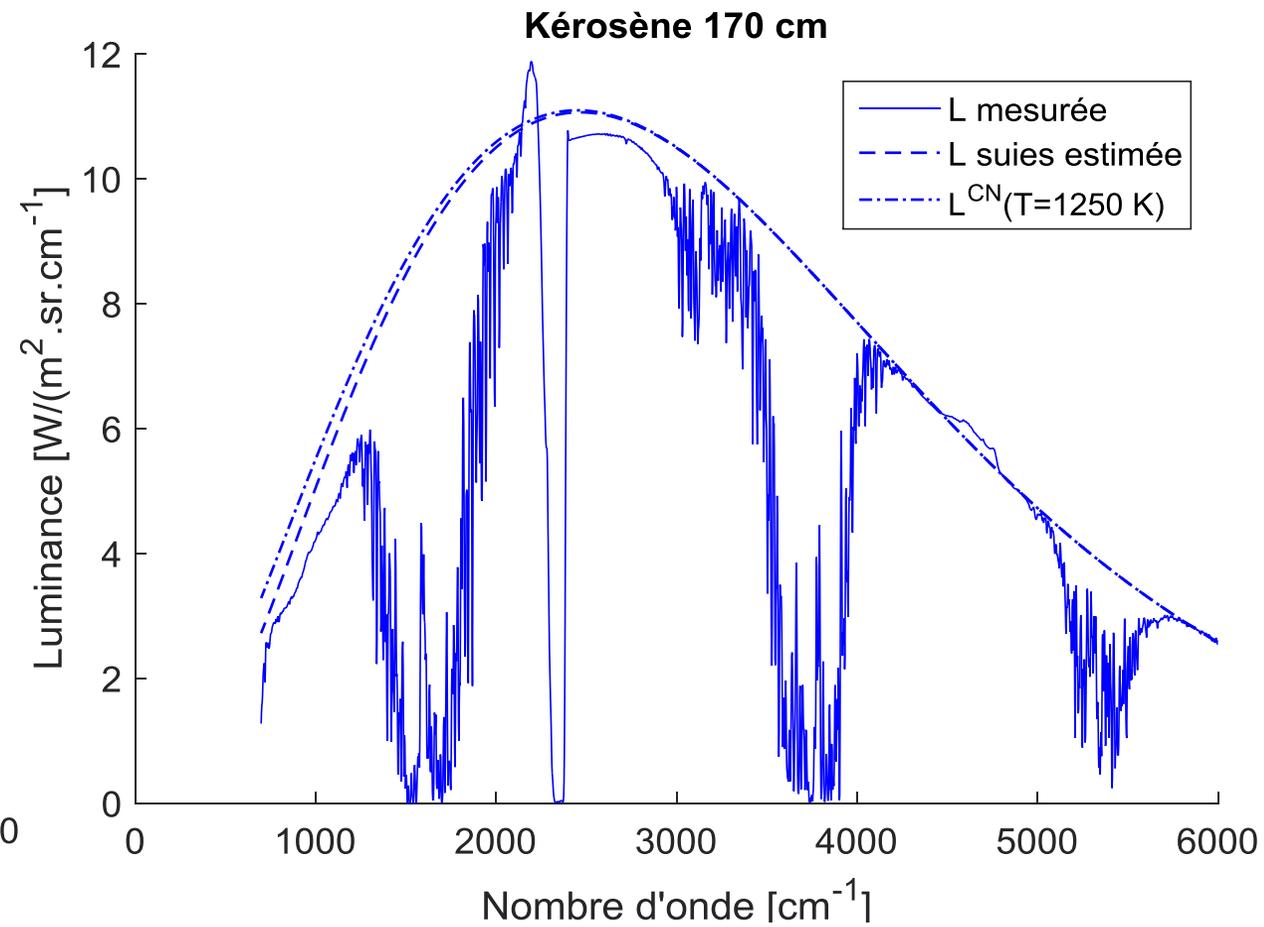
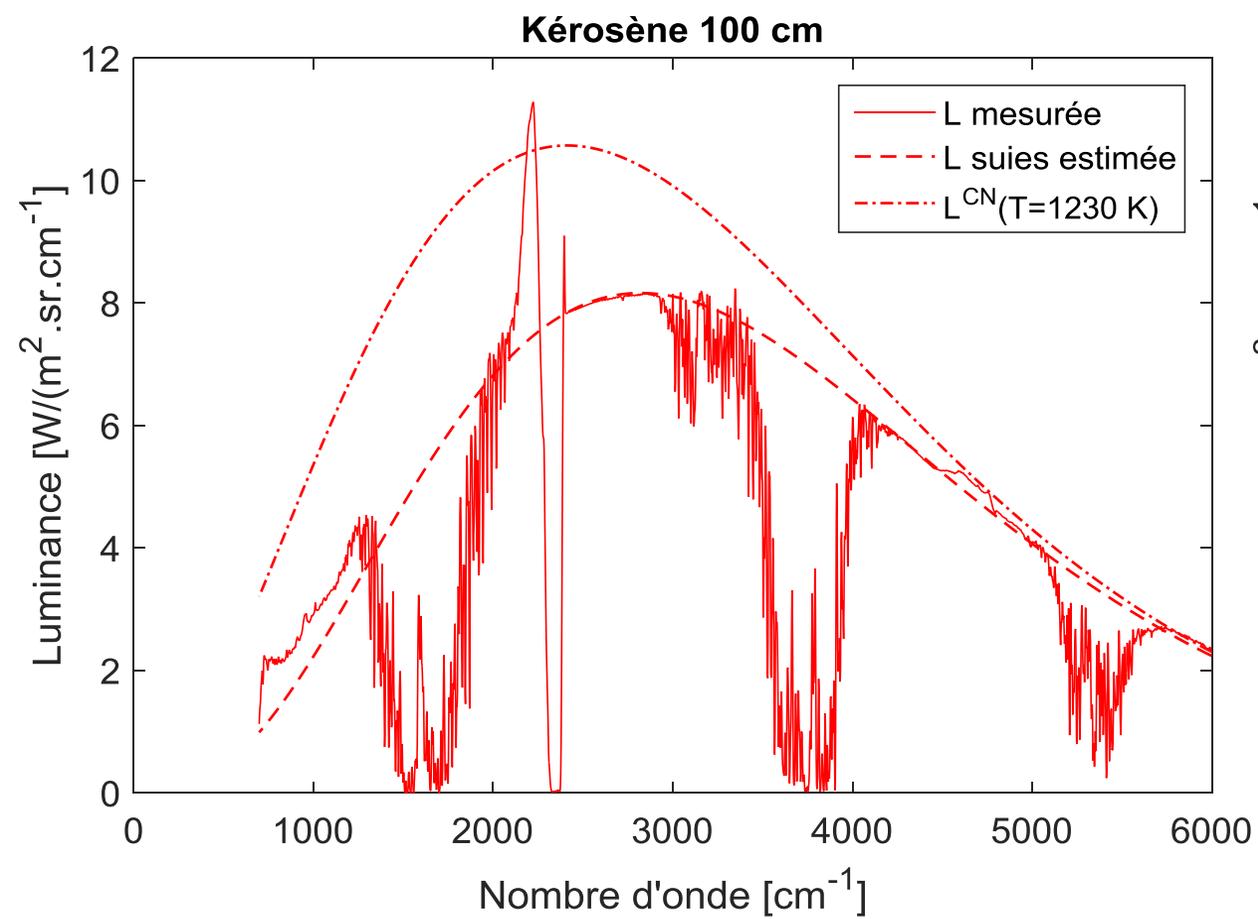
On mesure la transmission à travers la flamme  $\tau(\nu) = \exp(-\beta(\nu) \times e)$

Kirchhoff : Emissivité = absorptivité  $\varepsilon(\nu) = \alpha(\nu) = 1 - \exp(-\kappa(\nu) \times e) \approx 1 - \exp(-\beta(\nu) \times e)$

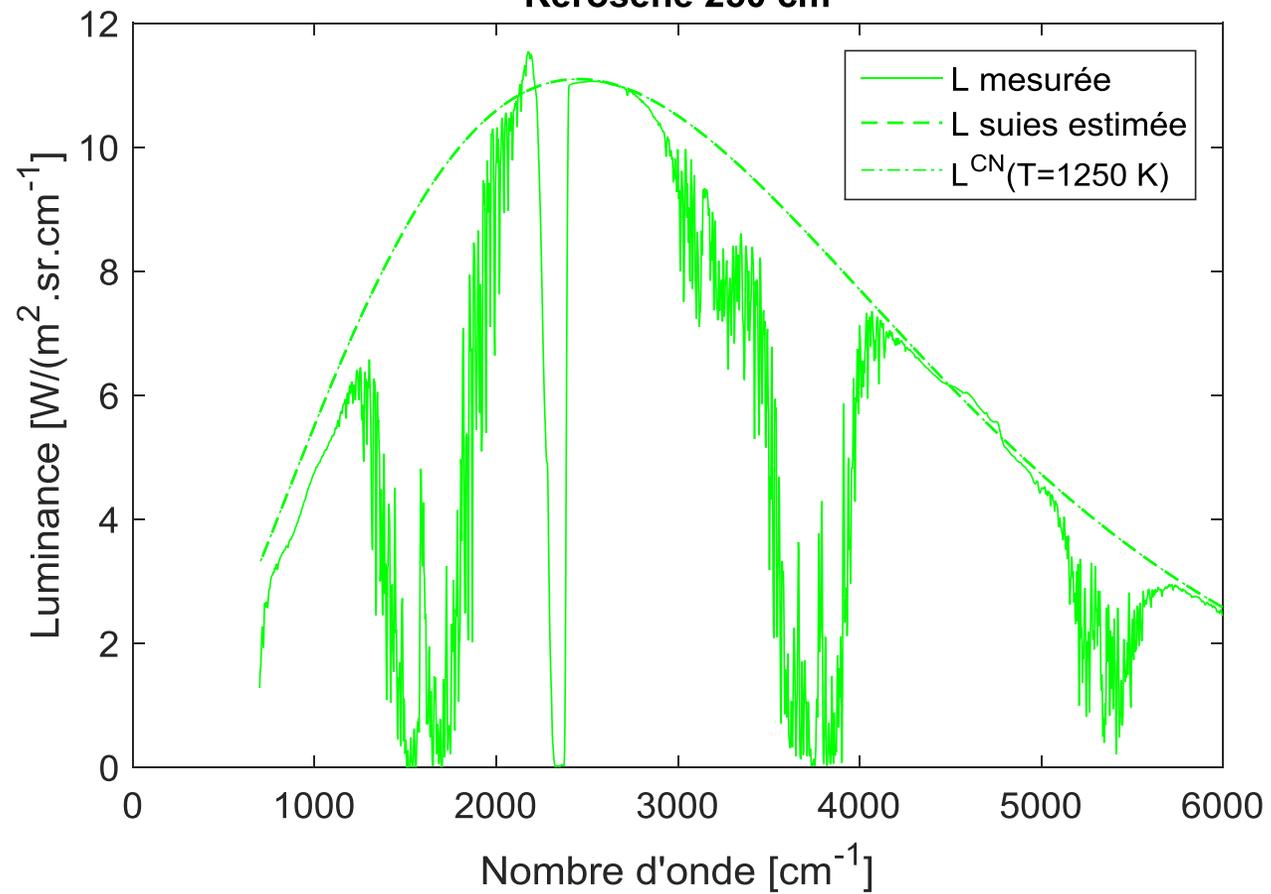
On suppose  $\kappa(\nu) \approx \beta(\nu)$  (diffusion négligeable aux grandes longueurs d'onde (paramètre de taille petit))

$$L_\nu = \varepsilon(\nu) L_\nu^{CN}(T)$$

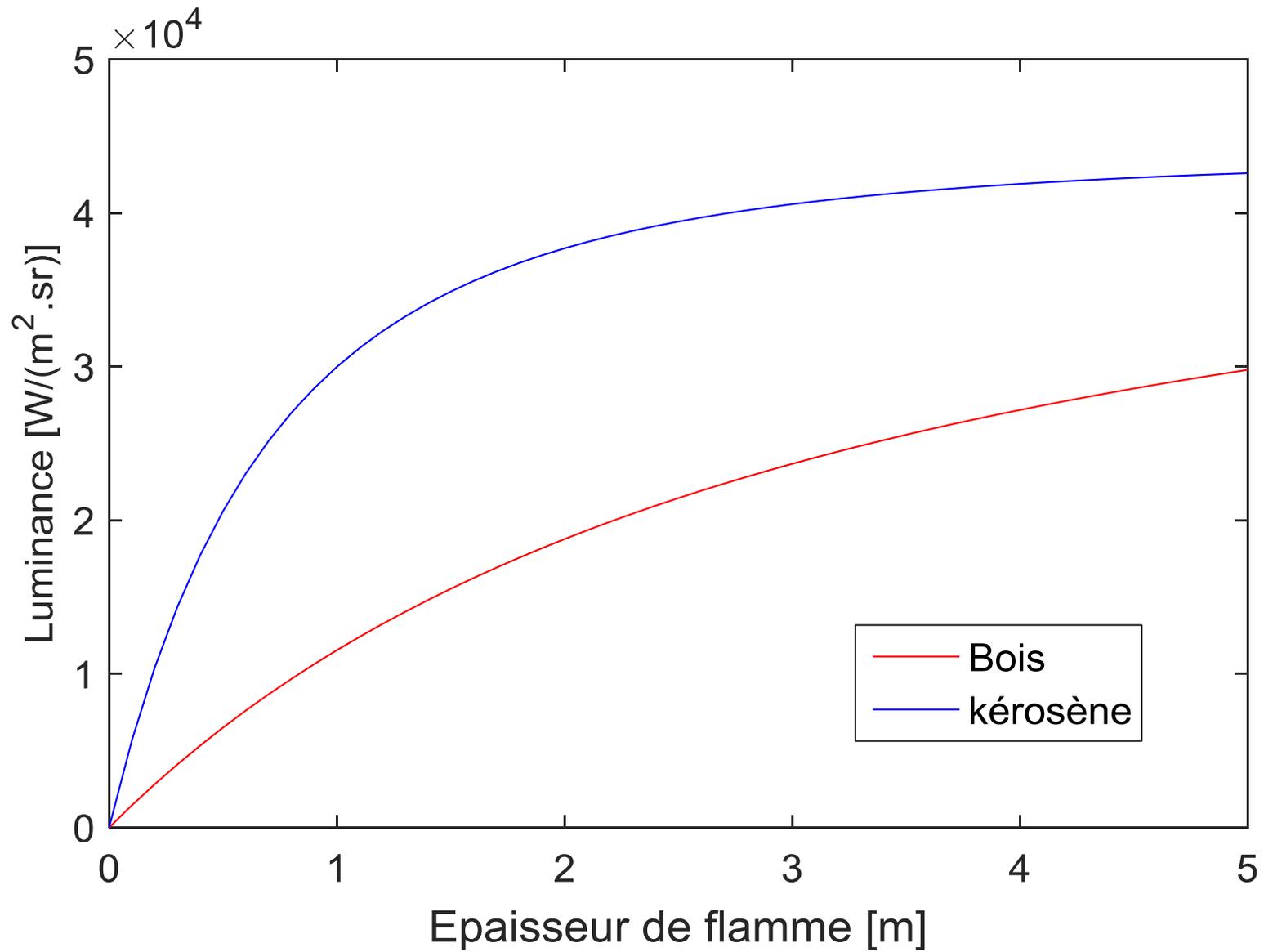




### Kérosène 250 cm



## Luminance totale (contribution des suies)



## Conclusion

- Une métrologie innovante de détermination de l'opacité des flammes a été développée et mise en œuvre
- La loi  $\beta = \text{cte}/\lambda^\alpha$  est bien vérifiée
- Le coefficient  $\alpha$  dépend du combustible :  $\alpha \sim 1,1$  pour le kérosène,  $\alpha \sim 1,6$  pour le bois
- Le coefficient d'extinction  $\beta$  dépend peu de l'épaisseur de la flamme, avec cependant une tendance à augmenter pour les plus grandes épaisseurs de flamme (sous-oxygénation ?)
- La connaissance de la variation spectrale de  $\beta$  permet de relativement bien modéliser le rayonnement émis par les suies dans la flamme

## Perspectives

- Répétition des essais à petite échelle
- Autres combustibles à petite échelle : heptane, mousse PU, autres
- Mousse PU à grande échelle : essais sur site Orly premier trimestre 2018