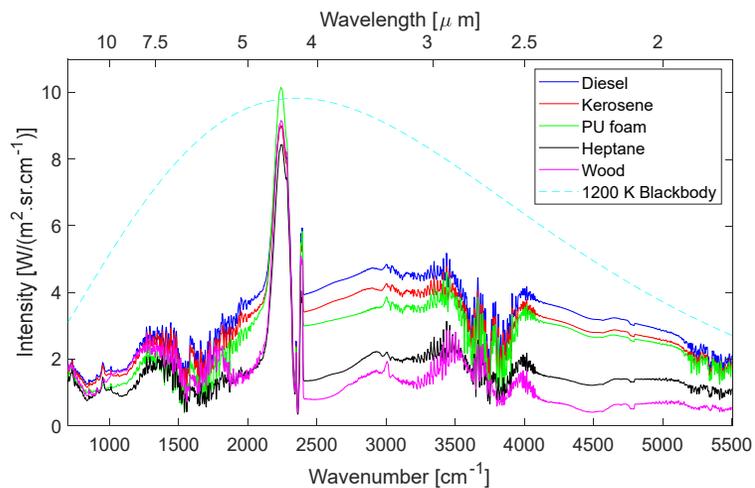




Spectres de flammes de différents combustibles

Gilles Parent^a, Giacomo Erez^b, Zoubir Acem^a, Pascal Boulet^a



a) LEMTA, UMR CNRS 7563, université de Lorraine

b) LCPP, Préfecture de Police de Paris

gilles.parent@univ-lorraine.fr

Résofeux, Vernon, 12 - 13 septembre 2024

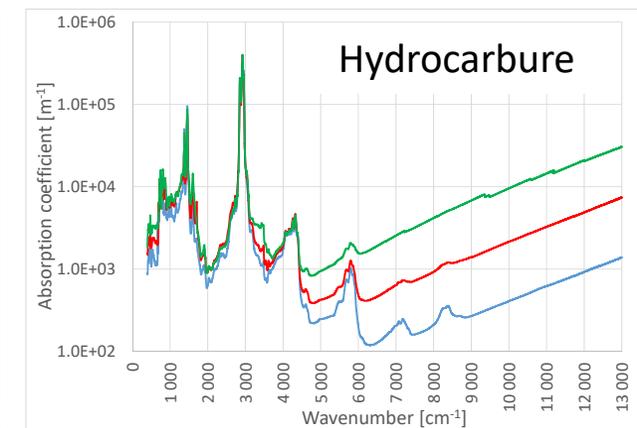
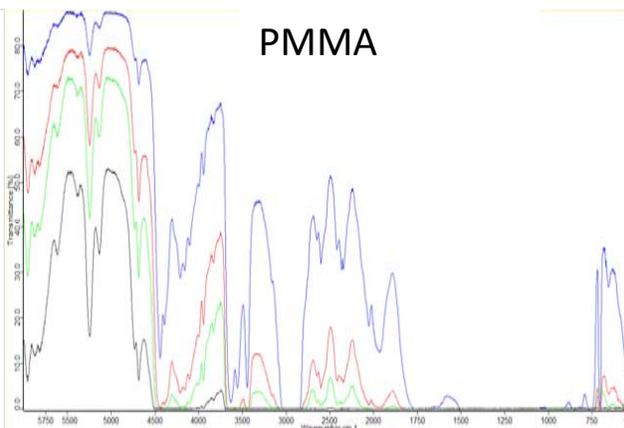
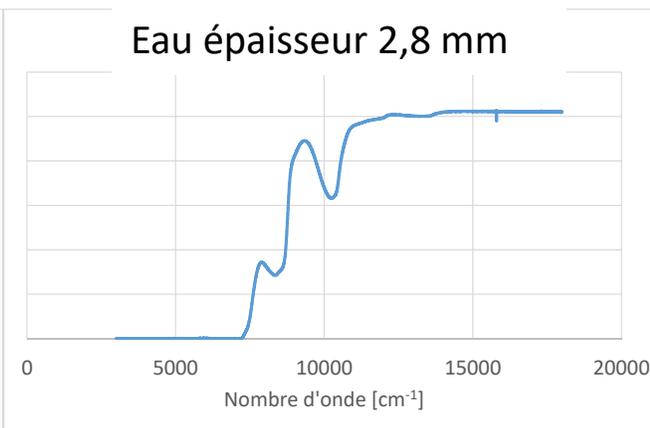
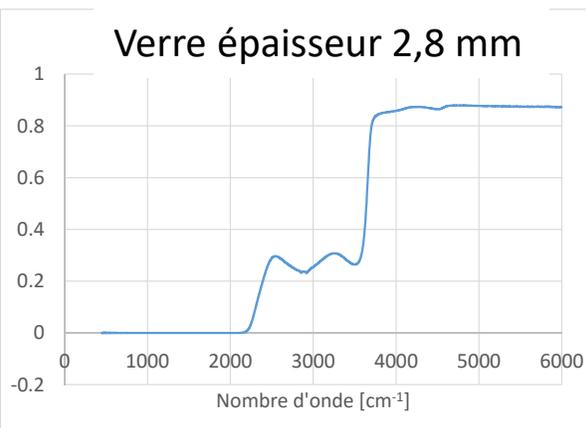
Contexte

Le rayonnement joue un rôle important : Flux de chaleur pour

- l'évaporation ou la pyrolyse du combustible
- la propagation du feu de proche en proche ou à plus grande distance



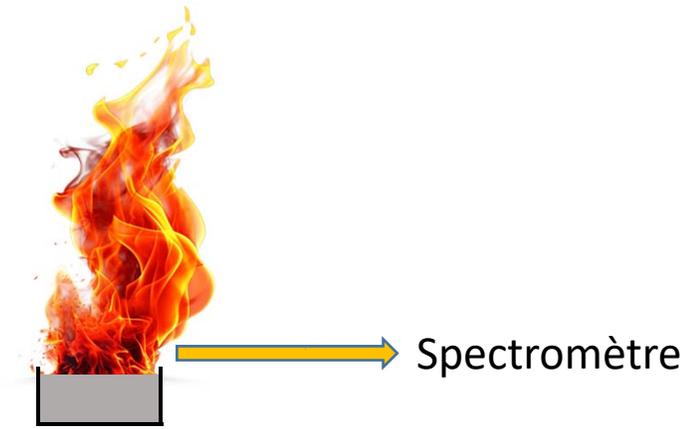
- Flux de chaleur **absorbé** : $\phi_{abs} = \int \phi_{\lambda,inc}(\lambda) \times A(\lambda) d\lambda$
- Si corps gris $A(\lambda) = A = cte$ $\Rightarrow \phi_{abs} = A \times \int \phi_{\lambda,inc}(\lambda) d\lambda = A \times \phi_{inc}$
- Cas général : ϕ_{abs} dépend à la fois du spectre d'émission $\phi_{\lambda,inc}(\lambda)$ en provenance de la flamme et du spectre d'absorption $A(\lambda)$ du matériau



\Rightarrow **Importance de caractériser le rayonnement émis par les flammes**

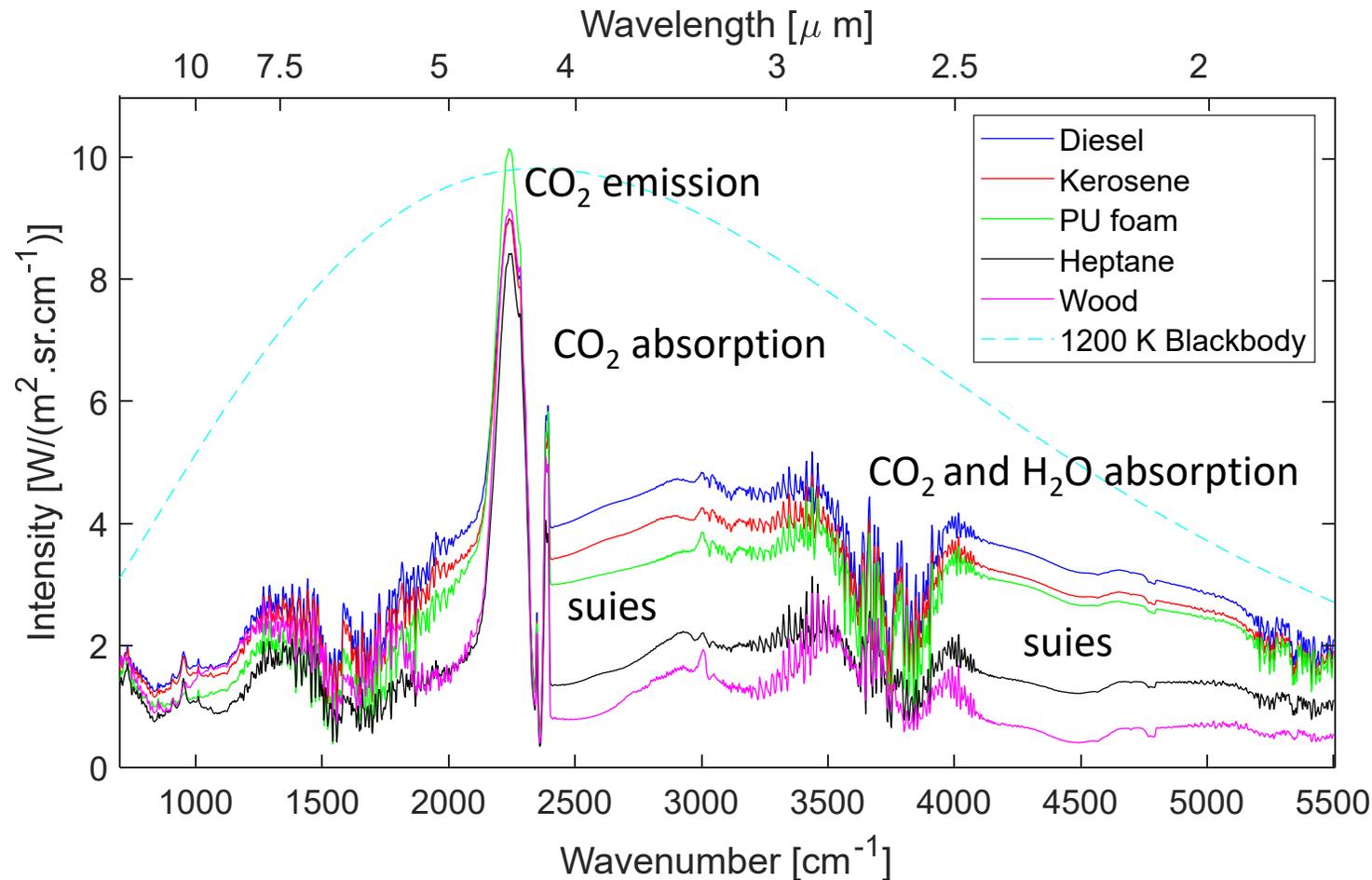
Spectre d'émission de flammes

- Spectromètre à transformée de Fourier, gamme 800 – 5500 cm^{-1} (λ 1,8 – 12,5 μm), résolution spectrale 4 cm^{-1}
- Combustibles : Gasoil, kérosène, mousse polyuréthane, heptane, bois
- Combustibles liquides : bac carré dimension 50 cm, bois : bûcher 50 cm x 50 cm
- Mesure réalisée juste au-dessus du bac



Observations principales :

- Emission fortement non noire / grise
- Absorption / émission par les gaz
- Emission par les suies
- La flamme est plus « noire » dans les courtes λ que dans les grandes λ



Modélisation de l'émission: Emission volumique par un milieu homogène, isotherme équivalent

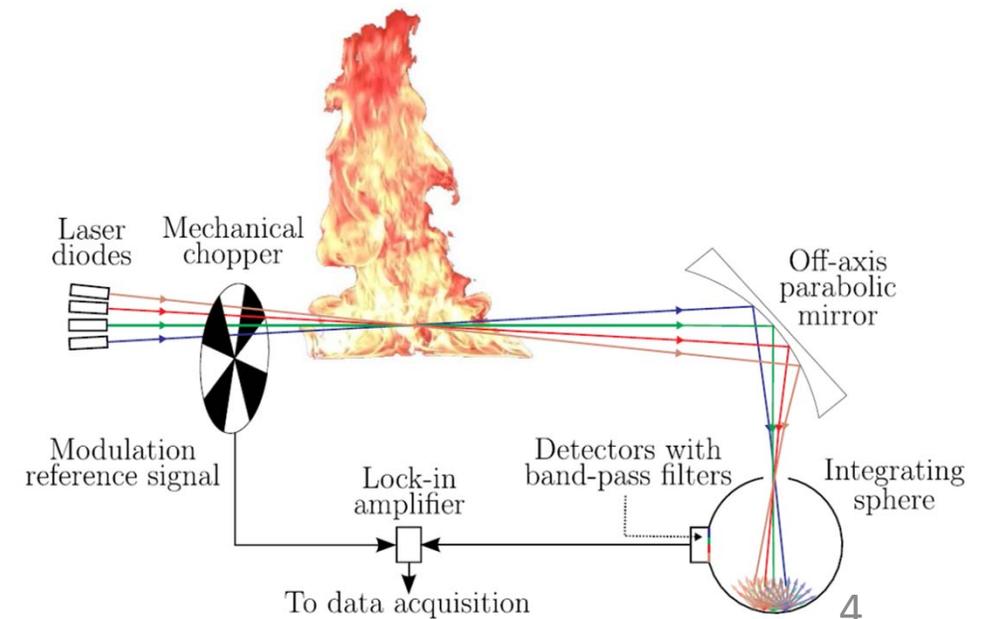
$$\begin{aligned}L_\nu &= \epsilon(\nu) L_\nu^{CN}(T) \\ &= (1 - \tau(\nu)) L_\nu^{CN}(T) \\ &= (1 - \exp(-\kappa(\nu) \times e)) L_\nu^{CN}(T) \\ &= (1 - \exp(-EO(\nu))) L_\nu^{CN}(T)\end{aligned}$$

$\nu = 1/\lambda$	Nombre d'onde
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
e	Epaisseur de la flamme
$EO(\nu)$	Epaisseur optique $EO(\nu) = \kappa(\nu) \times e$

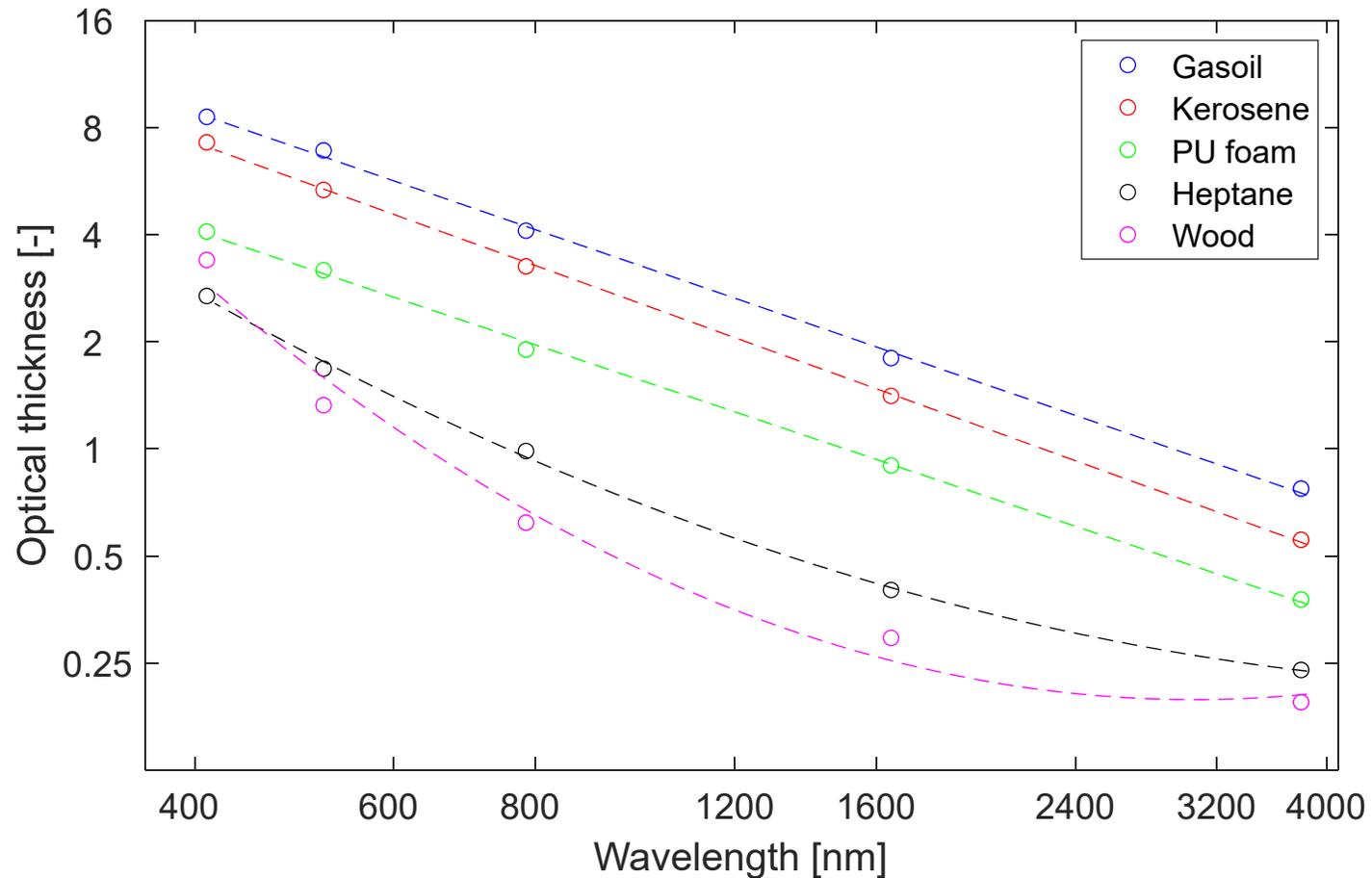
➔ La mesure de la transmission de la flamme $\tau(\nu)$ permet d'identifier une température d'un milieu homogène isotherme émettant de la même façon que la flamme

Principe de la mesure

- 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



Epaisseur optique de la flamme



Observations principales :

- La flamme est plus absorbante dans les courtes λ que dans les grandes λ
- Classement par ordre décroissant d'absorption de la flamme :

Gasoil – Kerosene – Mousse PU Heptane – Bois

- L'épaisseur optique varie linéairement en échelle log-log pour le gasoil, le kérosène et la mousse PU

➡ L'épaisseur optique varie selon une loi de puissance avec λ : $EO(\lambda) = cte / \lambda^\alpha$
(avec $\alpha \approx 1$)

- L'épaisseur optique ne varie pas linéairement en échelle log-log pour l'heptane et le bois (assez bon fit par un polynôme d'ordre 2)

Ajustement des spectres

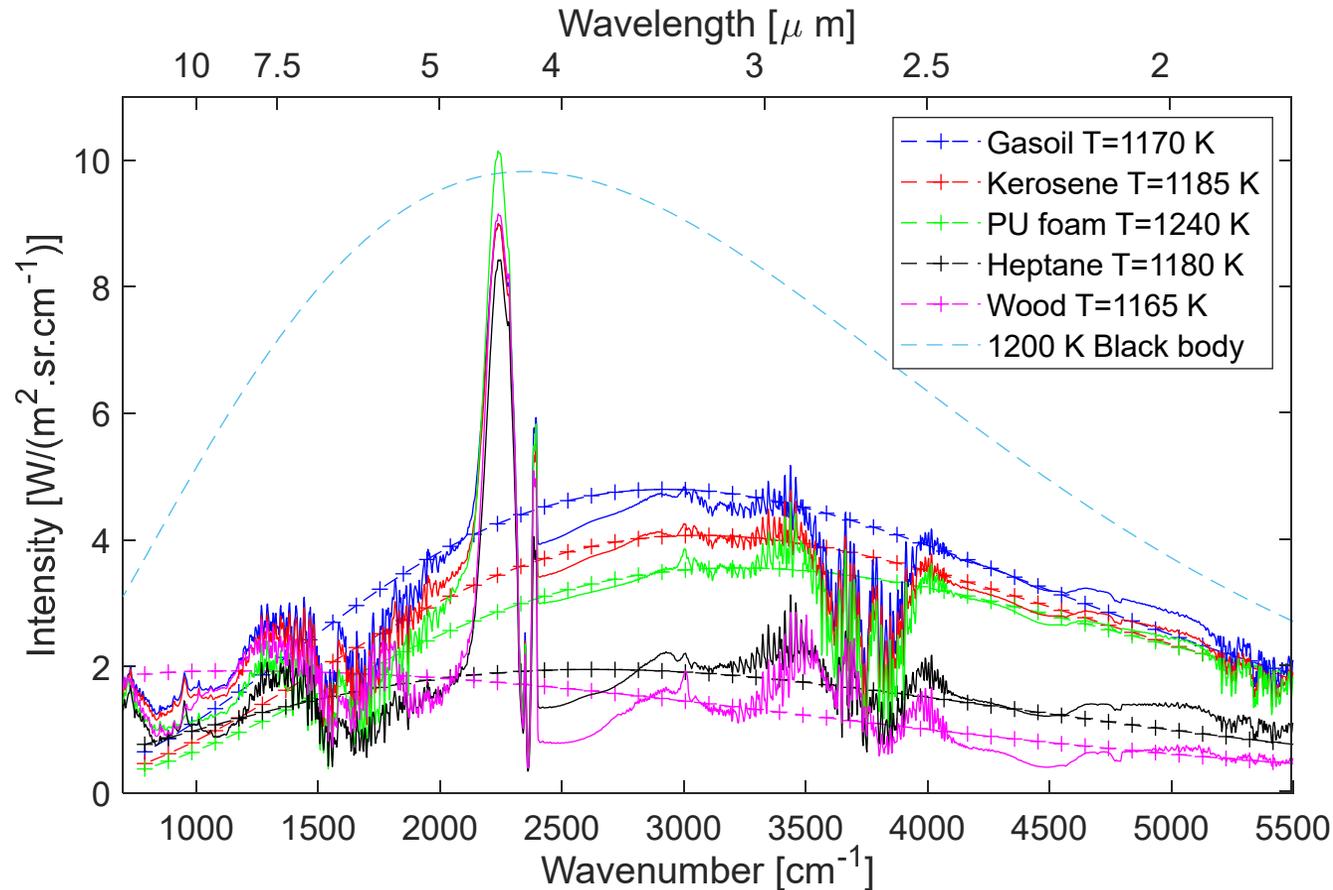
$$L_\nu^{\text{mod}} = (1 - \exp(-EO(\nu))) L_\nu^{\text{CN}}(T)$$

L_ν^{mod} : spectre modélisé

$EO(\nu)$ mesure + ajustement par une loi simple

(valable hors zones d'émission / absorption par les gaz)

T : obtenue par méthode inverse (minimisation de $\|L_\nu^{\text{mod}} - L_\nu^{\text{exp}}\|^2$)

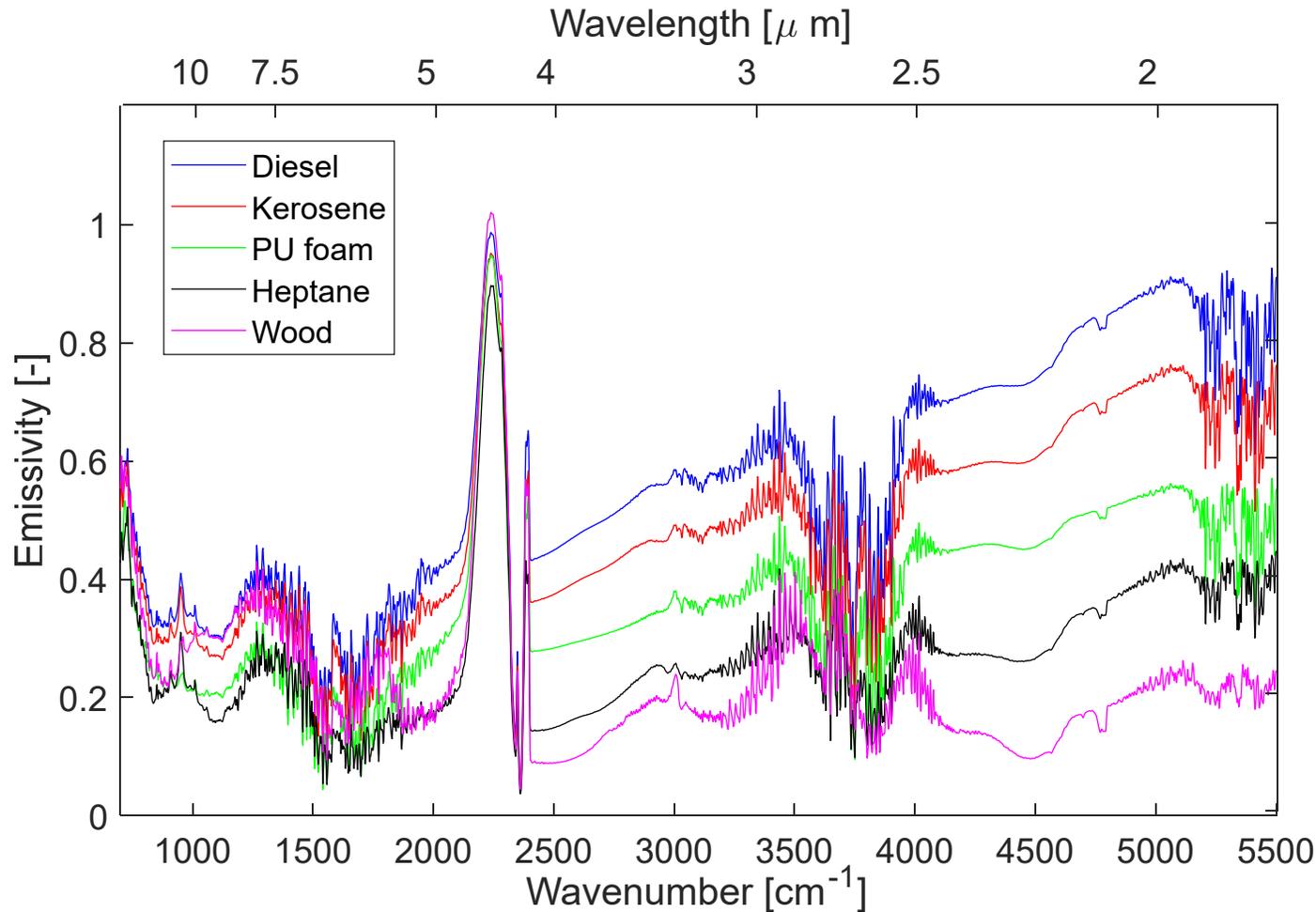


Observations principales :

- Un assez bon accord est obtenu hors zones d'émission / absorption par les gaz
- Une température T proche de 1200 K est identifiée pour tous les combustibles
- L'émission est significativement éloignée de celle du corps noir à la température T

Emissivité apparente de la flamme

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



Observations principales :

- Hors zones d'émission / absorption par les gaz, la flamme est significativement non grise
- L'émissivité est plus grande dans les courtes λ que dans les grandes λ
- $\epsilon_{\text{diesel}} > \epsilon_{\text{kérosène}} > \epsilon_{\text{mousse PU}} > \epsilon_{\text{heptane}} > \epsilon_{\text{bois}}$
- L'émissivité de la flamme de bois rejoint presque celle de la flamme de gasoil dans les grandes λ alors qu'elle est significativement plus faible dans les courtes λ

Imagerie hyperspectrale

Telops hypercam® MWE-FAST:

jusqu'à 320 x 256 pixels, domaine spectral [1800 – 6500 cm⁻¹], résolution spectrale maximale 0.25 cm⁻¹

Spectromètre à transformée de Fourier imageur : Spectromètre à transformée de Fourier avec un détecteur matriciel (Focal Plane Array - FPA)

Un interférogramme est obtenu pour chaque pixel du détecteur. Une transformée de Fourier est réalisée pour chaque interférogramme pour obtenir le spectre correspondant.

Calibration 4-points

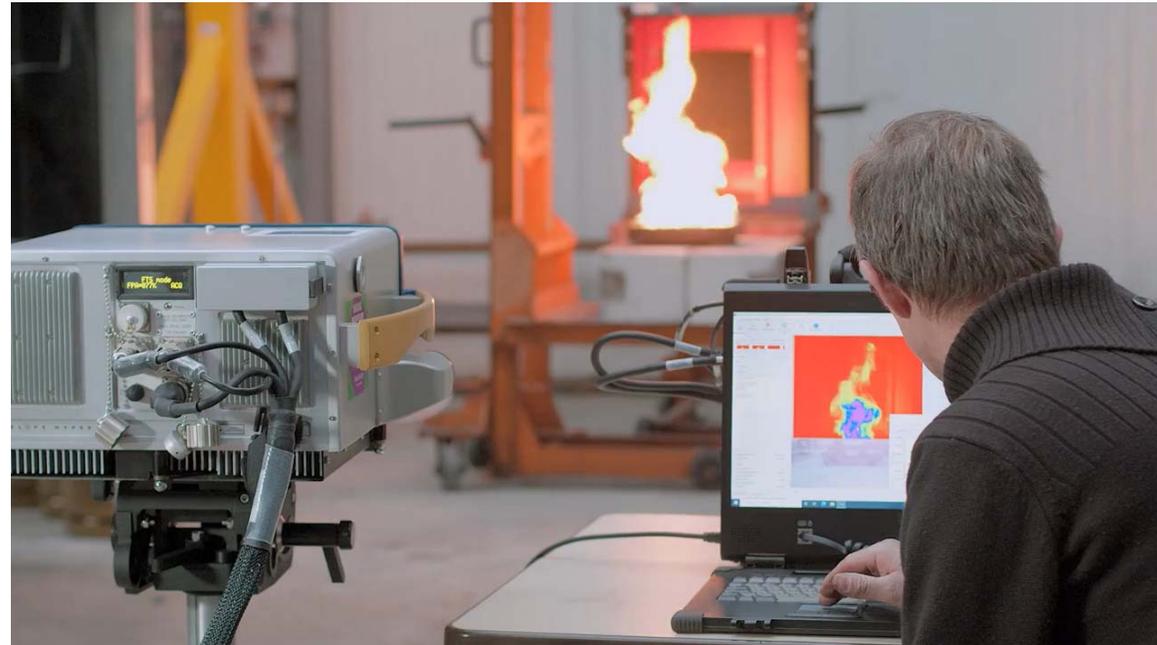
- Calibration 2-points réalisée en usine pour les grands nombres d'ondes (courtes longueurs d'onde) peu sensibles au rayonnement ambiant.
- Calibration 2-points pour les petits nombres d'ondes (grandes longueurs d'onde) sensibles au rayonnement ambiant.
2 corps noirs (20°C and 100°C) sont utilisés pour cette calibration



Application à des flammes de pool fires

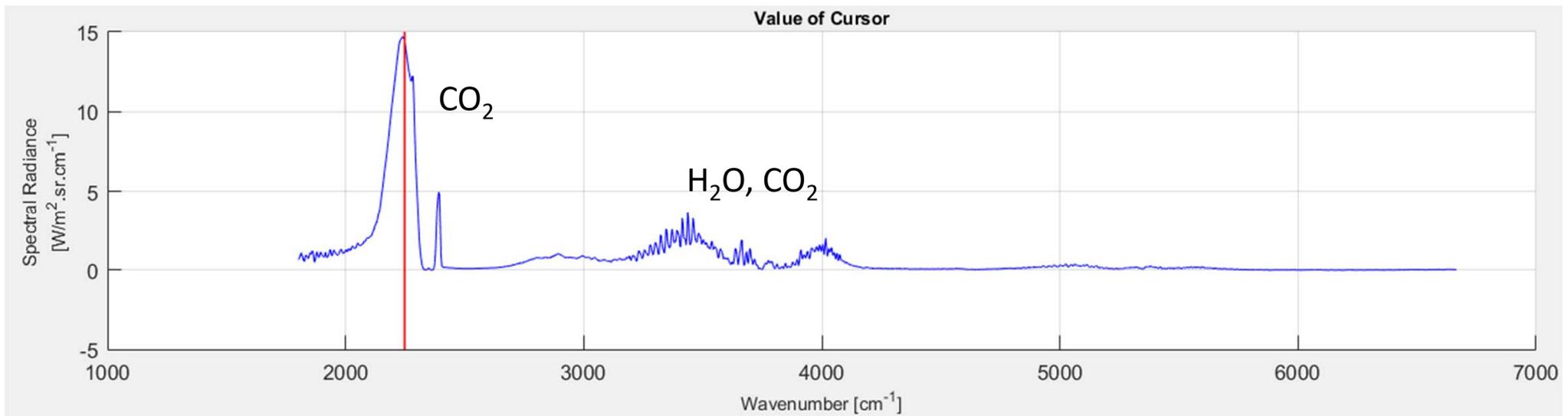
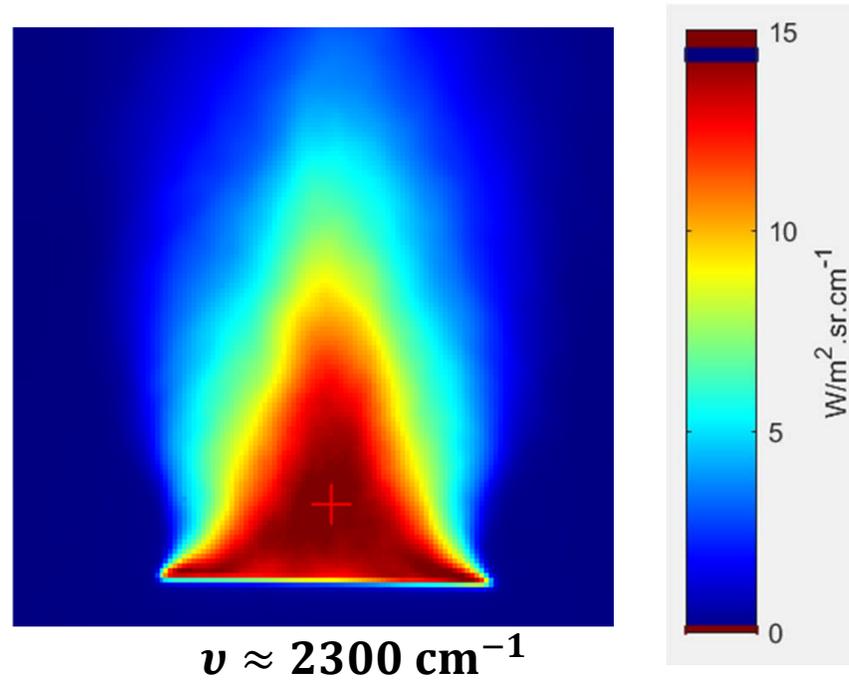
Combustibles : Méthanol - Ethanol – Heptane – Diesel – Taille de bac 30 cm

- Sous-fenêtrage 128 x 128 pixels
- Fréquence d'acquisition de l'interférogramme : 7232 Hz – Durée d'acquisition d'un datacube $\sim 0,5$ s
- Résolution spectrale : 4 cm^{-1}



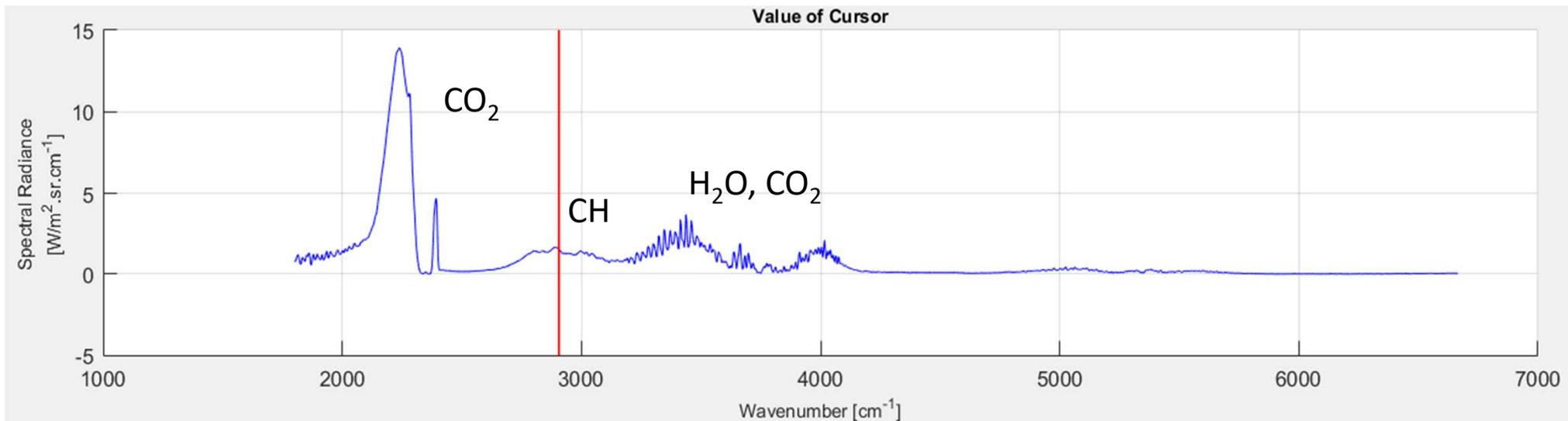
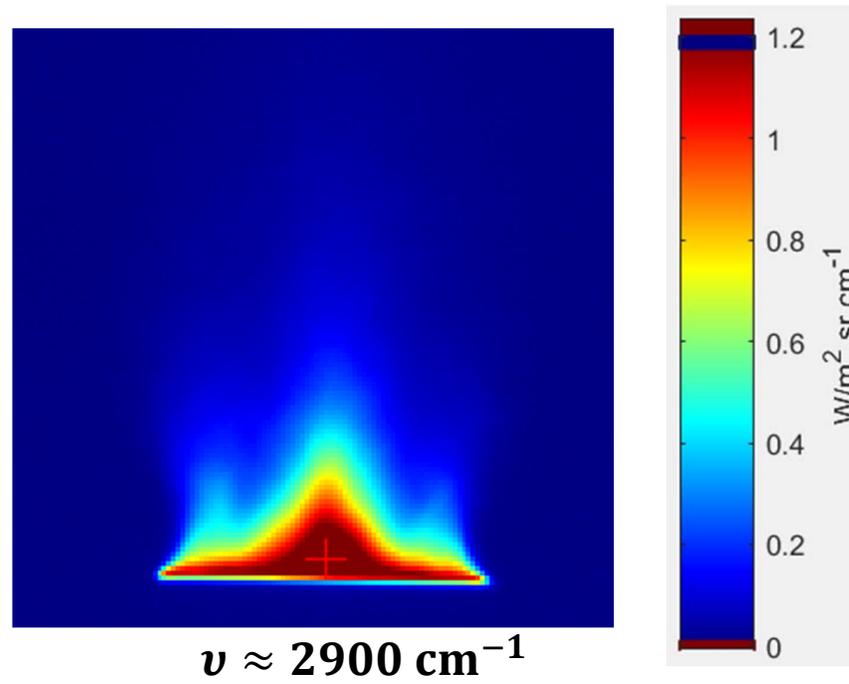
Méthanol pool fire

Moyenne de 307
datacubes



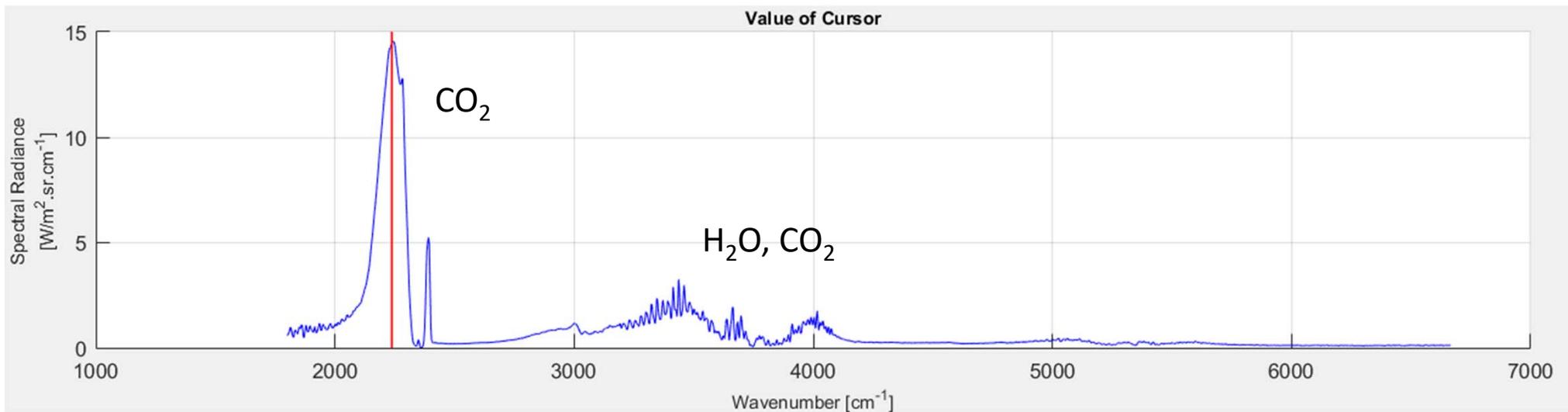
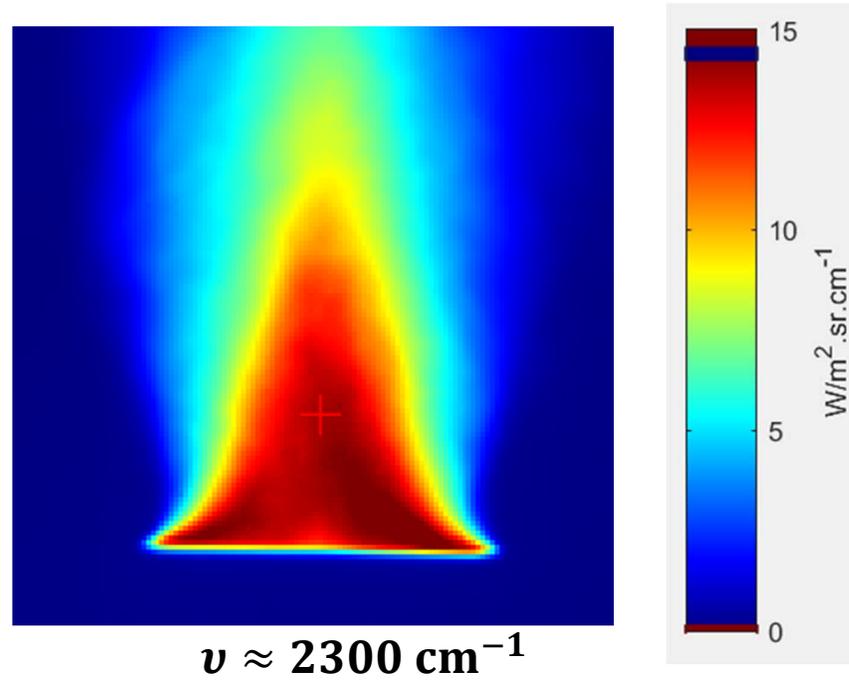
Méthanol pool fire

Moyenne de 307
datacubes



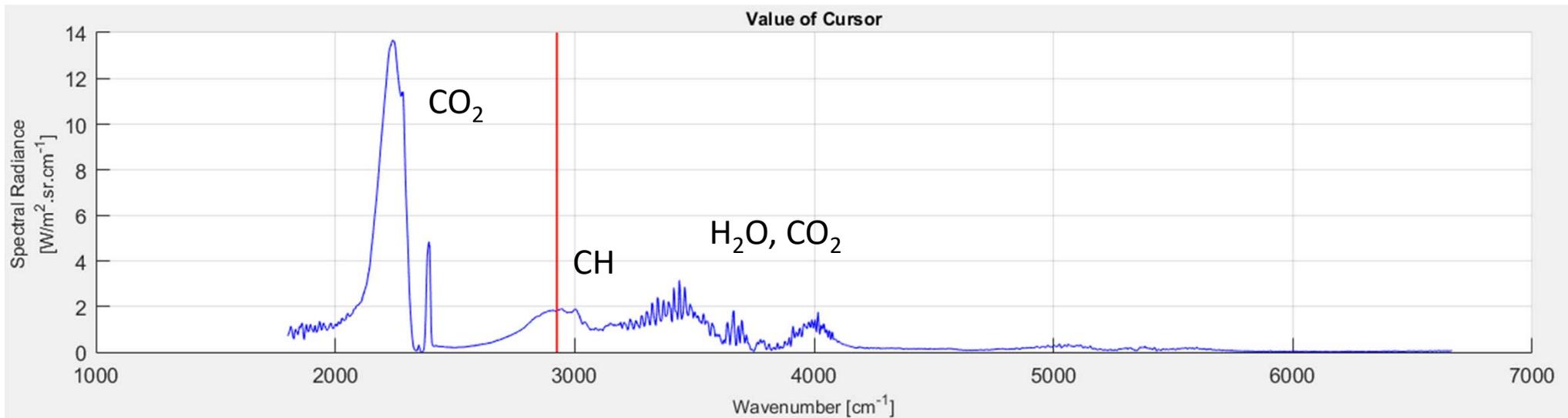
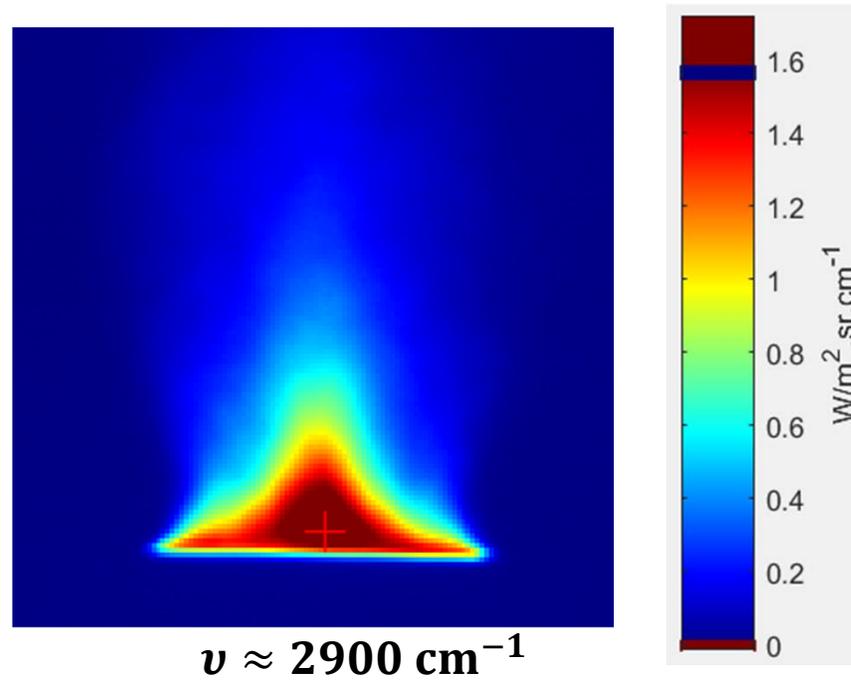
Ethanol pool fire

Moyenne de 265
datacubes



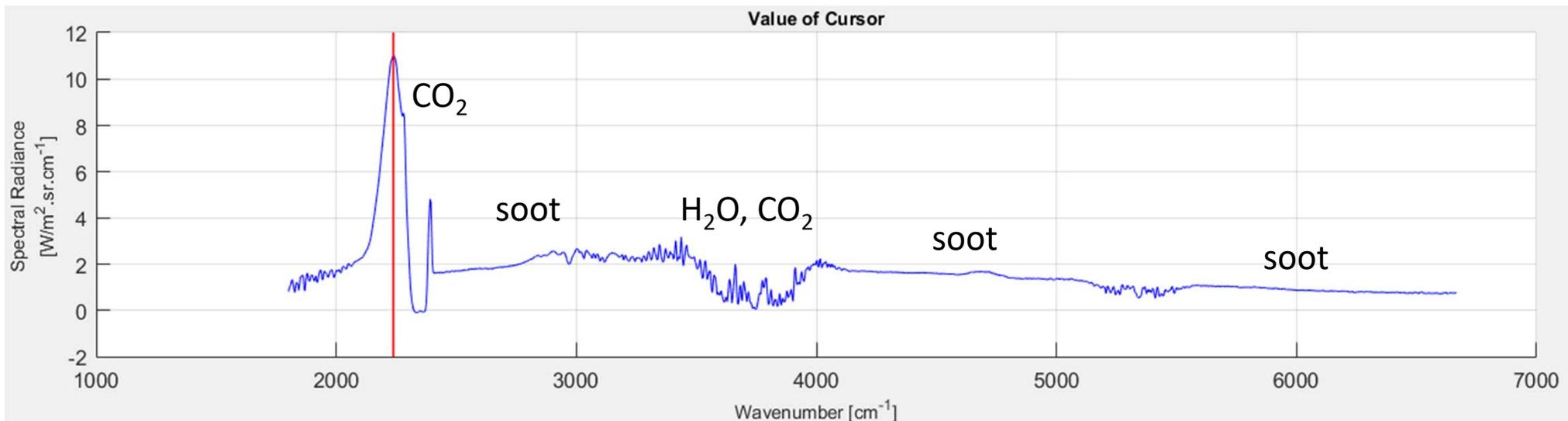
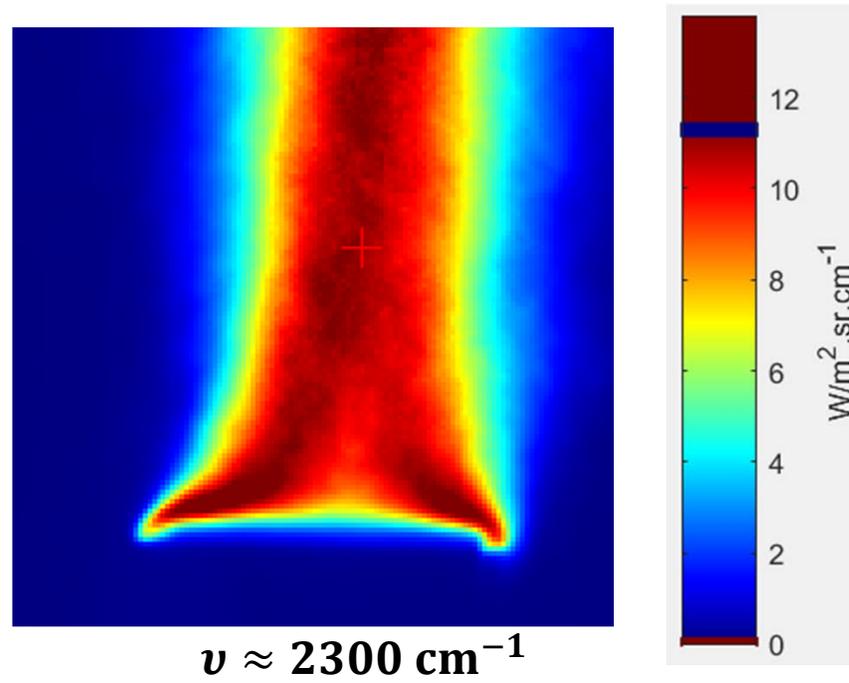
Ethanol pool fire

Moyenne de 265 datacubes



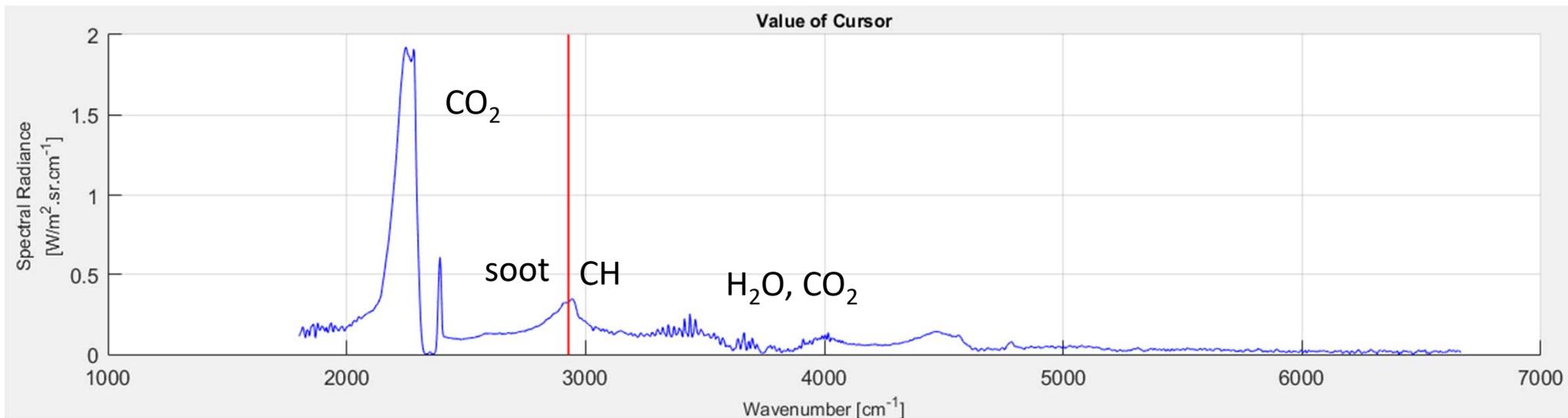
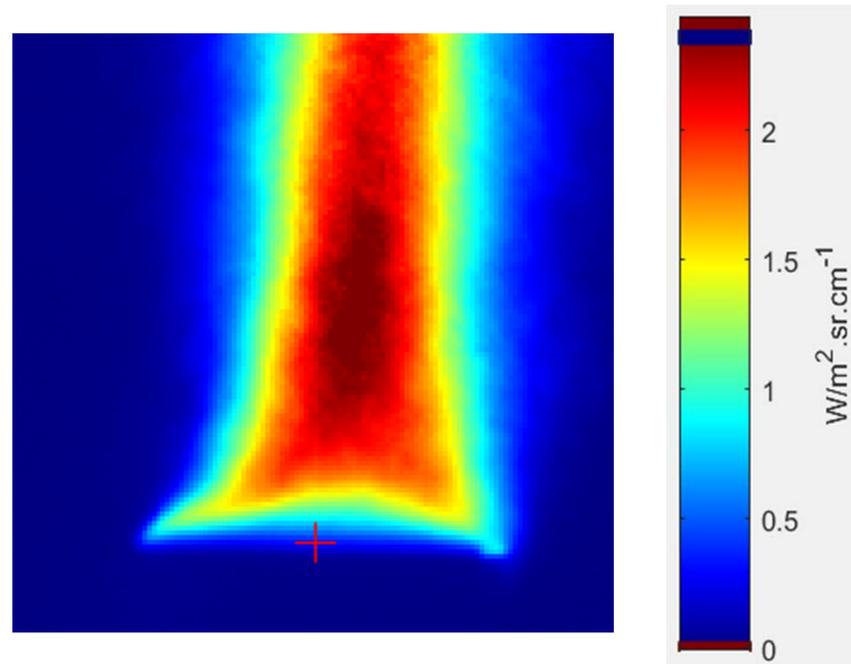
Heptane pool fire

Moyenne de 210 datacubes



Heptane pool fire

Moyenne de 210 datacubes



Conclusion

- L'épaisseur optique suit une loi $OT(\lambda) = \frac{A}{\lambda^\alpha}$ avec α proche de 1 pour le gasoil, le kérosène, et la mousse PU
- L'épaisseur optique ne varie pas linéairement en échelle log-log pour l'heptane et le bois
- Un modèle de flamme homogène isotherme permet un bon ajustement des spectres de rayonnement émis par les suies dans une flamme de feu
- Une température de l'ordre de 1200 K est identifiée pour tous les combustibles étudiés
- L'émission par une flamme est non grise même en dehors des zones d'absorption / émission par les gaz
- L'émissivité de la flamme est significativement plus grande dans les petites longueurs d'onde que dans les grandes

- L'imagerie hyperspectrale ouvre de nouvelles perspectives

Perspectives

- Modélisation de l'émission par les gaz
- Exploitation et analyse des données obtenues par imagerie hyperspectrale