

Mise en évidence des propriétés d'émission des suies produites par un feu de végétation.

Zoubir ACEM^{1*}, Gilles PARENT², Pascal BOULET^{1,2}, Bernard PORTERIE³, Ahmed KAISS³, Yannick PIZZO^{3,4}, Claude PICARD⁴.

¹Nancy Université, LEMTA, CNRS / Equipe Feux de Forêts
ENSEM, 2 avenue de la Forêt de Haye, BP 160, 54504 Vandœuvre cedex.

²Nancy Université, LEMTA, CNRS / Equipe Transfert radiatif
Faculté des Sciences et Techniques, BP 70239, 54506 Vandœuvre cedex.

³IUSTI/UMR CNRS 6595, Université de Provence, 5 rue Enrico Fermi - 13453 Marseille Cedex 13.

⁴CEREN (Centre d'Essais et de Recherche de l'Entente), Domaine de Valabre, 13120 Gardanne.

*(auteur correspondant : zoubir.acem@eeigm.inpl-nancy.fr)

Résumé - Cette communication porte sur la mise en évidence de l'émission des suies formées au cours de la combustion de chêne kermès et de frisure de bois. Les travaux ont été réalisés en collaboration avec le laboratoire IUSTI à Marseille et le centre d'essais CEREN à Gardanne, le but étant d'approfondir les connaissances sur les propriétés radiatives des flammes représentatives des feux de végétation du bassin méditerranéen.

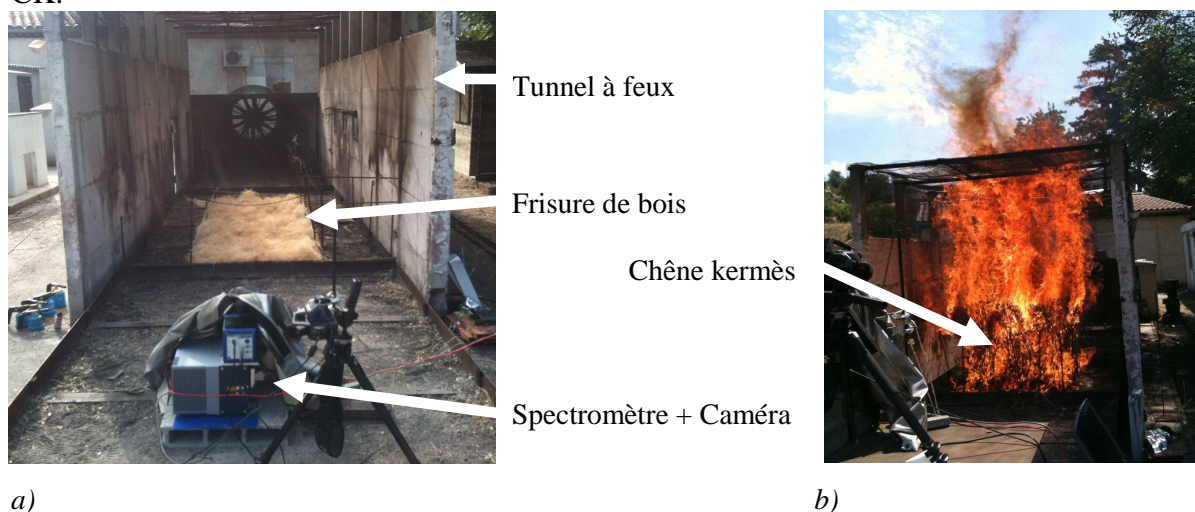
1. Introduction

Dans cette communication, on s'intéresse à l'étude des propriétés d'émission de flammes issues de l'embrasement de frisure de bois, et d'un combustible plus naturel et souvent impliqué dans les feux de végétation du sud de la France, le chêne kermès (CK). Cette étude expérimentale a été entreprise afin de mettre en exergue l'émission des suies lors d'un feu de végétation. Un premier travail [1] mené sur des flammes de végétation de petite taille (bac de 0.25 m²) a montré la faible contribution des suies en dehors des zones spectrales caractéristiques des pics d'émission des gaz de combustion (CO, CO₂ et H₂O). Une des interprétations était la faible teneur en suies des flammes « optiquement minces » obtenues. Par la suite, une étude plus quantitative [2] confirmait ces premiers résultats et montrait alors la nécessité de caractériser des flammes à plus grande échelle et plus chargées en suies. Pour ce faire, ce travail a été réalisé dans un tunnel à feux mis à disposition par le CEREN permettant de générer des flammes optiquement épaisses, avec des surfaces de combustible pouvant atteindre 4 m² pour les besoins de cette étude. Plus précisément, des flammes d'épaisseurs différentes allant de 50 cm à 4 m ont été générées au sein du tunnel. Les propriétés d'émission des flammes ont été caractérisées à l'aide de moyens spectroscopiques, associant un spectromètre FTIR couplé à une caméra IR multi-spectrale. Cette caméra permet la caractérisation simultanée des zones spectrales où l'activité de chacun des produits de combustion (gaz + suies) est intense.

Par la suite, nous décrirons en détail les moyens expérimentaux mis en place, ainsi que les zones échantillons étudiées. Les résultats obtenus lors de cette campagne de caractérisation des propriétés d'émission obtenues pour les différents combustibles seront ensuite présentés et discutés. Dans un premier temps, l'analyse des résultats sera liée à l'évolution de l'activité des suies en fonction de l'épaisseur optique de la flamme étudiée. Une comparaison sera également effectuée entre l'embrasement de parcelles de CK frais et sec. Ensuite, nous verrons comment estimer une température apparente de flamme, permettant de fournir des données d'émissivité et de coefficient d'extinction équivalent de la flamme.

2. Zones échantillons et moyens expérimentaux

La figure 1a) présente un lit de frisure de bois disposé dans le tunnel à feu disponible au CEREN ainsi que les moyens de caractérisation utilisés. Le tunnel, en béton cellulaire, a pour dimensions $8 \times 2.75 \times 2.4 \text{ m}^3$. Il est couvert d'une grille métallique afin d'éviter la projection de brandons. Les outils de caractérisation utilisés sont composés d'un spectromètre FTIR Matrix (BRUKER) transportable doté de deux détecteurs IR (MCT/InSb) permettant de recouvrir la plage comprise entre 1.6 et $10 \text{ }\mu\text{m}$. La résolution du spectromètre a été fixée à 4 cm^{-1} et les résultats présentés correspondent à une moyenne sur 2 scans fixant ainsi la durée d'une acquisition à 2 s. Le spectromètre est couplé à une caméra IR multi-spectrale Orion (FLIR) couvrant la plage comprise 1.5 et $5 \text{ }\mu\text{m}$. Cette caméra est équipée d'un porte filtre rotatif permettant d'obtenir des informations de manière quasi-simultanée (temps de rotation de 40 ms) dans quatre bandes spectrales différentes. Les filtres sélectionnés correspondent à des zones majeures d'émission dans l'IR des produits de la combustion. On dispose ainsi d'un filtre entre 2.8 et $2.9 \text{ }\mu\text{m}$ ($3448\text{-}3571 \text{ cm}^{-1}$) correspondant à une bande d'émission d' H_2O , d'un filtre dans l'intervalle $4.24\text{-}4.26 \text{ }\mu\text{m}$ ($2347\text{-}2358 \text{ cm}^{-1}$) pour les gaz CO/CO_2 , et d'un filtre dans la bande $3.88\text{-}3.92 \text{ }\mu\text{m}$ ($2551\text{-}2577 \text{ cm}^{-1}$), en dehors des zones d'émission des gaz, destiné à l'émission des suies. Un dernier filtre transmet 1% de l'ensemble de la bande spectrale sensible de la caméra ($1.5\text{-}5 \mu\text{m}$). Afin d'améliorer la qualité des résultats, on a effectué un étalonnage et une calibration de la caméra à l'aide d'un corps noir (CN) étendu [2]. On retrouve sur la figure 1b) l'exemple d'un embrasement d'une parcelle composée de CK.



a)

b)

Figure 1: a) Dispositif expérimental; b) Essai avec une parcelle de chêne kermès.

Un des objectifs de cette étude est également d'observer la transition entre le rayonnement de flammes optiquement minces à celui de flammes optiquement épaisses. L'inflammation quasi-instantanée de chaque parcelle a été assurée par des allumages multiples en périphérie du lit de combustible grâce à des brûleurs à gaz. Cette méthode a été préférée à l'utilisation d'un hydrocarbure liquide dont les produits de combustion peuvent engendrer des émissions parasites dans le spectre d'émission des flammes.

Le protocole expérimental est identique pour chaque type de combustible. Il consiste à former des lits de combustible, uniformément répartis, d'une largeur de 1 m et d'une longueur variant de 0.5 à 4 m. Pour la frisure de bois, on constitue une couche uniforme d'environ 10 cm de hauteur, pour une charge de 1 kg/m^2 . Concernant le CK, on dispose uniformément les arbustes de sorte à former une parcelle homogène de 1 m de haut et en respectant une charge de 9 kg/m^2 . Pour garantir l'homogénéité de l'inflammation, on a disposé en partie basse une litière de frisure de bois de 20 cm de haut, présentant une charge de 2 kg/m^2 . La

caractérisation des flammes avec la caméra s'effectue en continu durant toute la période de combustion allant de quelques dizaines de secondes (pour un lit de frisure de 50 cm de long) jusqu'à 2 minutes (pour le lit le plus long de CK). Au cours d'un embrasement, environ 10 acquisitions spectrométriques (variable selon la durée de l'essai) ont également été réalisées dans la flamme, à 20 cm au-dessus du niveau supérieur de la végétation. Le dispositif expérimental mis en place permet d'associer les acquisitions du spectromètre FTIR aux images issues de la caméra.

3. Résultats et discussions

Propriétés d'émission des flammes issues de la combustion de frisure de bois :

La figure 2a) donne l'évolution spectrale des propriétés d'émission de lits de frisure de bois de différentes longueurs allant de 0.5 à 4 m. A titre de comparaison, les courbes d'émission du corps noir, entre 1000 et 1600 K, sont également représentées.

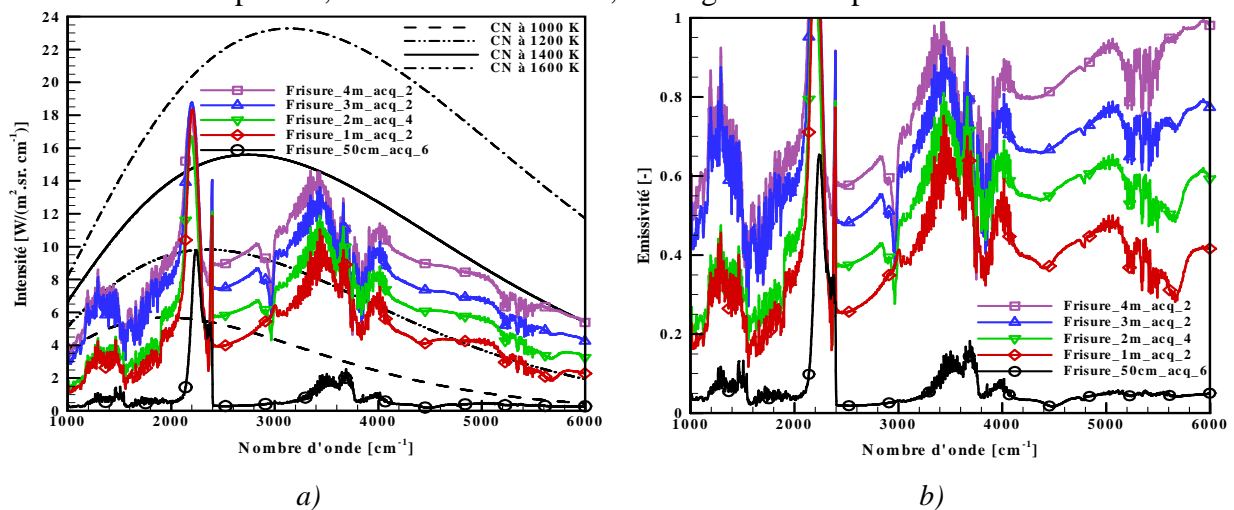


Figure 2 : a) Spectres d'émission de flammes de frisure de bois ; b) Emissivités estimées à partir des spectres précédents en fonction du nombre d'onde dans l'hypothèse d'une température de 1400K.

On retrouve bien le spectre caractéristique de l'émission d'une flamme [1,2] avec un pic intense entre 2200 et 2400 cm⁻¹ attribué au groupe CO/CO₂, ainsi que les deux zones d'émission, entre 1200 et 2000 cm⁻¹ et entre 3200 et 4000 cm⁻¹, correspondant à H₂O. Le rayonnement des suies se manifeste, en dehors de ces pics, en un spectre continu sur toute la plage spectrale étudiée. Ce spectre continu est bien visible pour des lits de 1 à 4 m de long (les flammes devenant « optiquement épaisses ») et est inexistant pour le lit le plus court (flamme « optiquement mince », résultat comparable à ceux obtenus dans [2]). On constate donc une augmentation du niveau d'émission avec la longueur de lit de combustible. Cet effet est nettement visible dans les zones attribuées à H₂O et aux suies, alors qu'on observe plutôt une saturation pour le pic d'émission de CO/CO₂. En complément, les données issues de la caméra IR (figure 3) confirment bien une forte émission due aux gaz et une importante contribution liée aux suies (le cercle blanc sur les images correspond à la zone visée par le spectromètre). Les images révèlent également une forte hétérogénéité dans la structure de la flamme liée à des variations de température et de concentration des espèces.

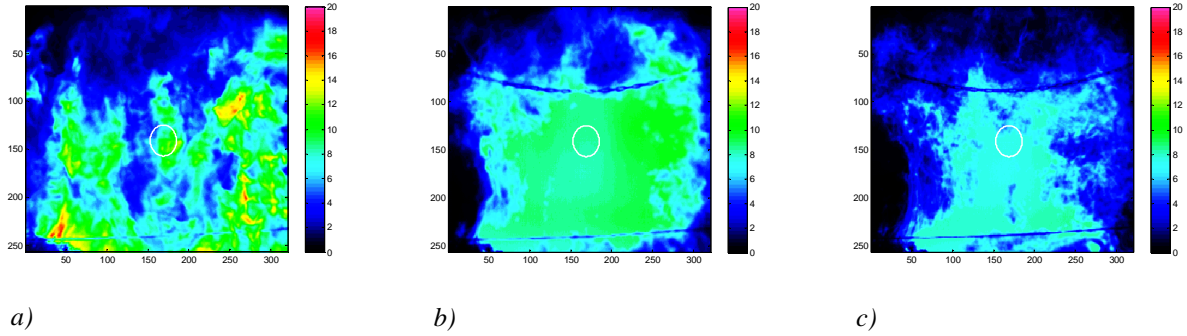


Figure 3 : Images IR correspondant à l'émission : a) de CO_2 ; b) de H_2O et c) des suies provenant de l'embrasement d'un lit de frisure de 2 m de long. L'intensité en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ est représentée avec la même palette de couleurs pour les trois filtres.

La littérature [5] indique une variation de l'absorption des suies avec l'inverse de la longueur d'onde. Ainsi, lorsque la longueur d'onde diminue (*i.e.* le nombre d'onde augmente), les coefficients d'absorption des particules de suies augmentent, rapprochant l'émissivité de la flamme la plus épaisse de celle d'un corps noir. Avec la flamme « la plus épaisse » rayonnant quasiment comme un corps noir à 1400K entre 5000 et 6000 cm^{-1} , on en vient alors à supposer que la température de la flamme est de l'ordre de 1400K. On en déduit aussi la présence de suies à des températures proches de 1400 K. Toutefois, le pic centré autour de 2300 cm^{-1} dépasse largement l'émission d'un corps noir à 1400 K, signalant une émission des gaz CO/CO_2 caractéristique d'une température supérieure à 1400 K (1522 K exactement). On aurait ainsi une flamme hétérogène dont l'émission provient à la fois des produits de combustion gazeux ($\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$) à haute température et des particules de suies à une température plus faible. La coexistence de suies « froides » dans un mélange gazeux chaud rend discutable l'hypothèse d'une température équivalente de flamme. Néanmoins, nous avons poursuivi notre analyse en utilisant une température de référence de 1400 K pour la détermination des propriétés radiatives des flammes.

La luminance spectrale peut alors être définie à partir de celle d'un corps noir:

$$I_\nu = \varepsilon_\nu I_\nu^0 \quad (1)$$

où $I_\nu^0 = \frac{2hc_0^2\nu^3}{n^2} \left[\exp\left(\frac{hc_0\nu}{nkT}\right) - 1 \right]^{-1}$ est la luminance du corps noir [5] à la température T , avec h et k respectivement les constantes de Planck et Boltzmann, n l'indice de réfraction du milieu (ici $n = 1$), c_0 la célérité de la lumière dans le vide et ε_ν l'émissivité spectrale. Le coefficient d'extinction « spectral » κ_ν d'une flamme de longueur L est couramment relié à l'émissivité [5], sous l'hypothèse d'un milieu homogène isotherme, par :

$$\varepsilon_\nu = 1 - e^{-\kappa_\nu L} \quad (2)$$

En supposant donc une température apparente de flamme de 1400 K (selon les explications données dans l'analyse de la figure 2a), une émissivité spectrale peut être calculée à partir des données d'émissivité. Les résultats obtenus sont ceux reportés sur la figure 2b). On observe de fortes variations spectrales traduisant une émission éloignée de celle d'un corps noir, ou même gris. La tendance globale, en dehors des pics dus aux gaz, indique une augmentation de l'émissivité avec le nombre d'onde, en accord avec les propriétés d'absorption des suies évoquées plus haut (à noter que la zone d'émission due au CO/CO_2 autour de 2300 cm^{-1} , qui donnerait une émissivité supérieure à 1, donc non physique, a été supprimée). On obtient

aussi une augmentation logique de l'émissivité en fonction de la longueur du lit. Cette analyse ne doit toutefois pas faire oublier les questions soulevées sur la pertinence de la définition d'une température effective de flamme pour une flamme hétérogène (suies et gaz) et anisotherme.

A partir de ces résultats et grâce à la relation (2), il nous est également possible de remonter au coefficient d'extinction spectral pour chacun des essais. Les résultats sont repris sur la figure 4a) (les pics à 2300 cm^{-1} , non réalistes, ont été volontairement coupés). Une moyenne du coefficient d'extinction calculée sur les essais de 1 à 4 m de longueur est également présentée sur la figure 4b), afin de fournir un coefficient d'extinction indépendant de la longueur du lit. On reprend ici l'idée d'établir une propriété caractéristique du type de combustible, indépendant de la taille de la flamme, tout en distinguant la flamme la plus mince dont la production de suies est atypique (on explique d'ailleurs cela par le fait que cette flamme mince est mieux oxygénée, conduisant à une teneur plus faible en particules de suie).

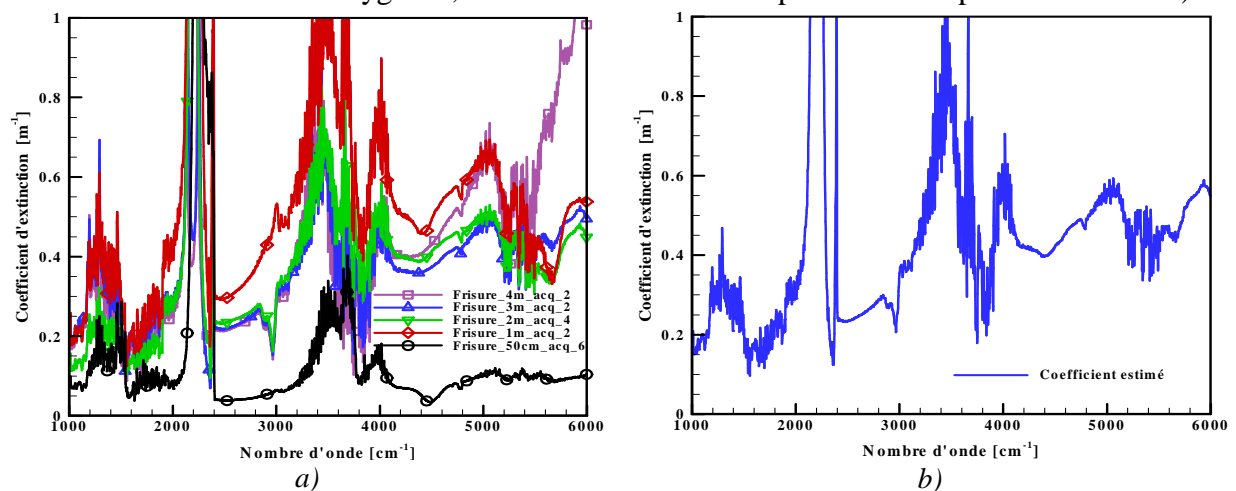


Figure 4 : a) Coefficient d'extinction spectral en fonction du nombre d'onde pour la frisure de bois. b) Coefficient d'extinction moyenné sur tous les essais sur la frisure de bois.

On observe d'une manière générale une augmentation du coefficient d'extinction avec le nombre d'onde avec un ordre de grandeur entre 0.1 et 1 m^{-1} qui se trouve être en accord avec la littérature [3,4]. A noter que les niveaux obtenus dans les bandes d'émission des gaz chauds ($\text{CO}_2/\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$) sont perturbés par l'absorption de ces mêmes gaz présents dans l'atmosphère à une température beaucoup plus faible.

En dépit des fortes dépendances spectrales constatées, il reste possible de fournir des propriétés moyennes en intégrant les données sur toute la bande spectrale étudiée et en pondérant par la luminance du corps noir à 1400 K . Pour les lits de frisure allant de 0.5 à 4 m de long, on obtient une intensité maximale rayonnée variant de 4.2 à $43\text{ kW}/(\text{m}^2.\text{sr})$, une émissivité s'échelonnant de 0.41 à 0.74 et un coefficient d'extinction entre 0.34 et 0.53 m^{-1} avec une moyenne de 0.4 m^{-1} .

Propriétés d'émission des flammes issues de la combustion de chêne kermès (CK) :

Des travaux identiques ont été entrepris sur des parcelles de chêne kermès (CK). La figure 5.a) présente les résultats obtenus pour des parcelles de CK frais. La figure 5b) propose une comparaison des intensités émises entre parcelles de CK frais et sec. On constate que l'émission est moins intense que pour la frisure de bois, avec un rayonnement des suies plus faible, en raison d'une combustion plus complète. On constate toutefois une émission plus élevée des parcelles de CK sec traduisant des différences dans le processus de dégradation thermique. L'identification des propriétés radiatives effectives des flammes de CK sec a

également été effectuée. Les résultats obtenus indiquent une intensité maximale de 27.5 kW/(m².sr), une émissivité de 0.47 et un coefficient d'extinction moyen de 0.4 m⁻¹.

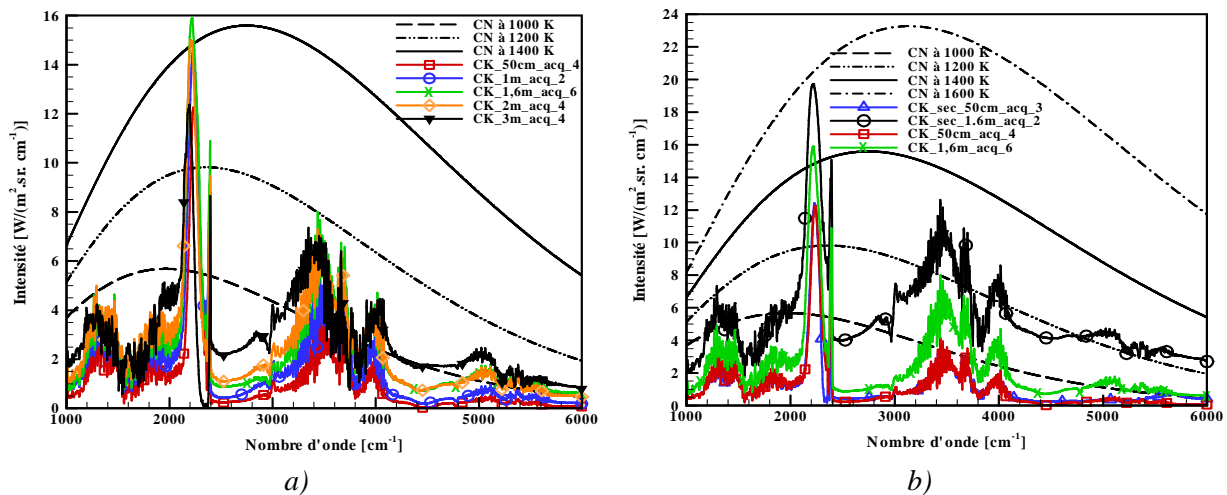


Figure 5 : a) Emission de flammes de CK en fonction du nombre d'onde (épaisseurs de 0,5 à 3m);
b) Comparaison de l'émission entre CK frais et sec.

4. Conclusion

Une série de mesures de l'émission des flammes issues de la combustion de lits de végétation de différentes longueurs a été réalisée. Ce travail a permis de mettre en exergue de fortes variations spectrales avec des bandes d'émission dues au gaz (CO/CO₂/H₂O) mais aussi l'émission continue relative aux suies. D'une manière générale, on a constaté une augmentation de l'émission avec la longueur des lits de combustible et l'épaisseur optique des flammes.

L'analyse des résultats a permis l'évaluation de propriétés radiatives « classiques » des flammes telles que la puissance rayonnée, l'émissivité ou le coefficient d'extinction. Bien que reposant sur l'hypothèse d'une température de référence de flamme de 1400 K, le protocole a permis de remonter à des données réalistes et en accord avec la littérature. A titre d'exemple, le coefficient d'extinction moyen a été estimé à 0.4 m⁻¹.

Ce travail expérimental a permis d'approfondir notre connaissance sur les propriétés radiatives des flammes de végétation dans le but de fournir des informations fines aux modèles de propagation du rayonnement dans les feux. On envisage par la suite d'approfondir cette étude en améliorant le traitement des données et d'exploiter les images de la caméra IR afin de corrélérer l'intensité rayonnée aux fluctuations de la flamme.

Références

- [1] P. Boulet, G. Parent, A. Collin, Z. Acem, B. Porterie, J.P. Clerc, J.L. Consalvi, A. Kaiss. Spectral emission of flames from laboratory-scale vegetation fires. *Int. J. of Wildland Fire*, vol. 18, No. 7 (2009), 875 - 884.
- [2] G. Parent, Z. Acem, S. Lechêne and P. Boulet. Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire. *Int. J. of Thermal Sciences*, Vol. 49, 3 (2010), 555-562.
- [3] K. Chetehouna, O. Séro-Guillaume, A. Degiovanni. Measurement of radiative absorption coefficient for a vegetal medium, *Measurement Science and Technology*, 15, 6 (2004), 43-46.
- [4] A. Agueda, E. Pastor, Y. Pérez, E. Planas. Experimental study of the emissivity of flames resulting from the combustion of forest fuels, *Int. J. of Thermal Science*, 49, 3 (2010), 543-554.
- [5] MF Modest, *Radiative heat transfer*, McGraw-Hill, New York (1993).