



HAL
open science

Mesure des émissions radiatives par spectroscopie infrarouge rapide du CO₂ à 4,17 μm - 4,19 μm et du CO à 4,50 μm - 4,60 μm lors d'une déflagration d'un mélange H₂ /O₂ /CO₂ /N₂

Marie Dabos, Khanh-Hung Tran, Gerard Baudin, Marc Genetier, Isabelle Ranc-Darbord, Bruno Serio, Antoine Osmont

► To cite this version:

Marie Dabos, Khanh-Hung Tran, Gerard Baudin, Marc Genetier, Isabelle Ranc-Darbord, et al.. Mesure des émissions radiatives par spectroscopie infrarouge rapide du CO₂ à 4,17 μm - 4,19 μm et du CO à 4,50 μm - 4,60 μm lors d'une déflagration d'un mélange H₂ /O₂ /CO₂ /N₂. Congrès annuel de la société française de thermique SFT, Société française de thermique, Jun 2019, Nantes, France. <hal-03174463>

HAL Id: hal-03174463

<https://hal.parisnanterre.fr/hal-03174463v1>

Submitted on 19 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Mesure des émissions radiatives par spectroscopie infrarouge rapide du CO₂ à 4,17 μm – 4,19 μm et du CO à 4,50 μm – 4,60 μm lors d'une déflagration d'un mélange H₂/O₂/CO₂/N₂

Marie DABOS^{1,2*}, Khanh-Hung TRAN², Gérard BAUDIN¹, Marc GENETIER¹, Isabelle RANC-DARBORD², Bruno SERIO², Antoine OSMONT¹

¹CEA, DAM, GRAMAT, BP 80200 - 46500 Gramat

²Laboratoire Energétique Mécanique Electromagnétisme, Université Paris Nanterre, 50 rue de Sèvres - 92410 Ville d'Avray

* (auteur correspondant : marie.dabos@parisnanterre.fr)

Résumé - Dans cette étude, l'objectif est de déterminer l'émissivité du CO autour de sa raie d'émission à 4,70 μm au cours de la déflagration d'un mélange H₂/O₂/N₂/CO₂ dont les quantités molaires ont été calculées pour atteindre des températures de 3000 K et les pressions 8 bar et 17 bar. Le temps caractéristique de la propagation de la déflagration est de quelques dizaines de millisecondes. Cette contrainte oblige à utiliser un système de détection infrarouge rapide, qui est ici constitué d'un spectroscope résolu en longueur d'onde et d'une caméra infrarouge rapide (1,5 kHz). Une méthode de calibration est décrite ainsi que la méthode de mesure de la température de fin de déflagration à partir du rayonnement du CO₂ entre 4,17 μm et 4,19 μm. Les spectres obtenus pour le CO entre 4,50 μm et 4,60 μm et l'émissivité intégrée sur cette plage ont été comparés à ceux calculés par le modèle décrit dans [1]. Ces spectres sembleraient mettre en évidence la chimiluminescence de la réaction CO-CO₂.

Nomenclature

K_{λ_i}	Coefficient d'absorption du gaz i	X_i	Fraction molaire du gaz i
L_{λ}^0	Luminance monochromatique du corps noir, W.μm ⁻¹ .m ⁻² .sr ⁻¹	<i>Symboles grecs</i>	
T	Température, K	$\varepsilon_{\lambda}(T)$	Emissivité spectrale
P	Pression, bar	λ	Longueur d'onde, μm

1. Introduction

L'évolution spectrale du rayonnement émis par un mélange gazeux peut être modélisée et déterminée à partir des bases de données spectroscopiques telles que HITRAN (2012) [2] ou HITEMP (2010) [3]. Des modèles thermophysiques permettent de calculer l'émission radiative des gaz chauds en fonction de la température et de la pression [1, 4, 5]. La connaissance des propriétés radiatives du CO est importante pour déterminer la qualité d'une combustion ou celle des processus de gazéification ou de méthanation dans l'industrie [6]. Dans cette étude, nous proposons de mesurer et d'analyser le rayonnement infrarouge du CO issu d'une déflagration d'un mélange composé de H₂/O₂/N₂/CO₂ sur les gammes de température comprise entre 2500 K et 3000 K et de pression comprise entre 8 bar et 17 bar. L'étendue spectrale est choisie entre 4,50 μm et 4,60 μm où le rayonnement du CO est prépondérant et les autres molécules présentes H₂O et CO₂, émettent peu. Le photo-détecteur de la caméra infra-rouge, dont la coupure est 5 μm, présente un maximum de réponse dans cette zone. En revanche, c'est une partie du spectre difficile à explorer car il n'existe pas de source étalon permettant de calibrer en position spectrale et en intensité. Un banc d'essais composé d'une chambre de combustion, d'un spectromètre infrarouge rapide associé à une caméra infrarouge (1,5 kHz) sera décrit. Ce

montage permet de suivre l'évolution du spectre d'émission des gaz de combustion produits lors de la déflagration en temps réel et en fonction de la pression lors de la propagation de la déflagration. La résolution spectrale est inférieure au nanomètre.

Le temps caractéristique d'observation de la déflagration et de la détente des gaz est de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes, dépendant de la composition du mélange gazeux initial. Au cours d'un essai de déflagration, la température est déterminée à partir du spectre de la tête de bande du CO_2 très bien marquée dans la région s'étendant entre $4,17 \mu\text{m}$ et $4,19 \mu\text{m}$ [7]. La pression est mesurée par un capteur piézoélectrique avec une résolution temporelle d'une milliseconde. Les spectres mesurés permettront de calculer une émissivité sur l'étendue $4,50 \mu\text{m}$ à $4,60 \mu\text{m}$ qui sera comparée à la valeur calculée à partir du modèle décrit dans [1]. L'étude de l'émission des gaz lors d'une réaction de déflagration reste néanmoins complexe, car la chimiluminescence produite par le passage à l'état excité de certaines molécules, lors de la réaction $\text{CO}-\text{CO}_2$, peut également intervenir dans l'infrarouge [8] et dans le proche UV [9].

2. Principe de la méthode expérimentale

2.1. Présentation du banc d'essais de déflagration contrôlée

Le système est composé de trois éléments principaux : une cellule cylindrique de déflagration, un spectromètre à réseau et une caméra IR rapide. Le rayonnement émis par les produits de déflagration est transmis au travers d'un hublot en saphir suivant une ligne de visée axiale. Un miroir parabolique monté sur 3 axes est utilisé pour la collimation du faisceau sur la fente d'entrée du spectroscope. Une lentille en fluorine de 100 mm de focale est utilisée pour produire l'image du spectre issue de la fente de sortie du spectromètre dans le plan du détecteur IR de la caméra. L'ensemble du système d'allumage et d'acquisition est synchronisé (Figure 1).

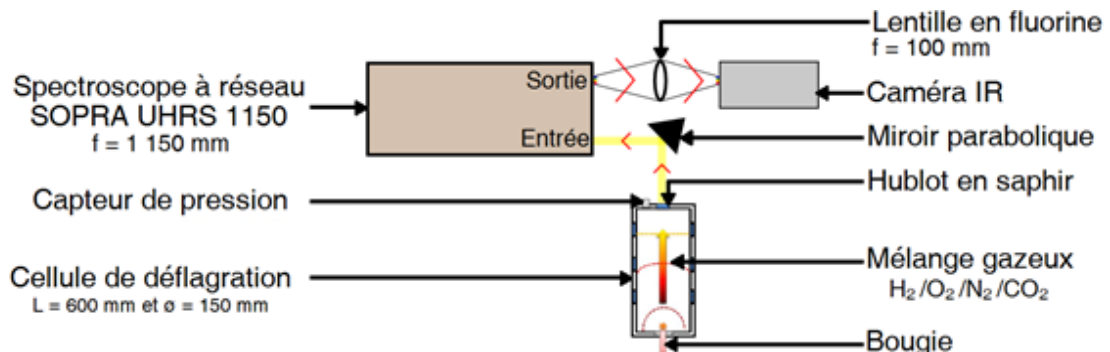


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

La cellule de déflagration, d'un diamètre intérieur de 150 mm et d'une longueur de 600 mm est munie d'accès optiques latéraux et frontal [10]. Une bougie d'allumage disposée axialement à l'extrémité du cylindre, déclenche l'explosion du mélange ; l'extrémité opposée dispose d'un hublot en saphir de 20 mm de diamètre et 5 mm d'épaisseur. La chambre a été conçue pour résister à des variations brutales de température de 300 K à 3000 K et à des pressions jusqu'à 100 bar. Le capteur piézoélectrique de mesure de la pression est placé à proximité du hublot de sortie. Les signaux de synchronisation ainsi que l'acquisition numérique de la pression sont réalisés par l'emploi d'une carte d'acquisition National Instruments. Un spectroscope à réseau de marque SOPRA UHRS F1150, vient compléter le montage expérimental. Le rayonnement collimaté sur la fente d'entrée est dispersé par un réseau est blasé à $1,6 \mu\text{m}$, comportant 600 traits/mm. Ces caractéristiques et sa disposition optique de type Ebert-Fastie offrent une résolution spectrale inférieure au nanomètre. Le faisceau incident est alors décomposé en différentes raies en fonction de leur longueur d'onde : l'image du spectre est formée sur la fente de sortie. La longueur d'onde centrale à la sortie du spectroscope peut être sélectionnée en

réglant la rotation du réseau. Celle dernière est collimatée par une lentille sur la matrice de détecteurs d'une caméra infrarouge.

L'image du spectre est enregistrée à grande cadence par la caméra commerciale JADE III MWIR de marque CEDIP. Elle comporte une matrice plan focal de détecteurs HgCdTe sensibles de $3,7\ \mu\text{m}$ jusqu'à $4,9\ \mu\text{m}$. Pour augmenter la fréquence d'acquisition, l'image capturée par la caméra est fenêtrée dans une région autour du spectre. Dans cette étude, les spectres sont enregistrés avec une fréquence de $1,5\ \text{kHz}$, un temps d'intégration de $300\ \mu\text{s}$ et une fenêtre de 284 pixels de largeur sur une dizaine de lignes. La résolution spectrale obtenue est de $0,40\ \text{nm/pixel}$, les images des spectres obtenus ont une centaine de nanomètres de largeur. Le spectromètre est placé sous atmosphère d'azote pour s'affranchir de l'absorption du CO_2 ambiant sur le trajet optique. Cette précaution améliore la précision des spectres du CO_2 mesurés dans la bande s'étendant de $4,17\ \mu\text{m}$ à $4,19\ \mu\text{m}$.

Dans la partie du spectre difficile à explorer, il n'existe pas de source étalon permettant de calibrer en position spectrale et en intensité. Une méthode de calibrage a été développée sur les bandes d'études $4,17\ \mu\text{m}$ à $4,19\ \mu\text{m}$ (détermination de la température) et $4,50\ \mu\text{m}$ à $4,60\ \mu\text{m}$ (détermination de l'émissivité du CO) :

- la correspondance des pixels aux longueurs d'onde est déterminée en enregistrant le spectre d'une flamme produite par la combustion d'un alcane. En effet, l'image du spectre enregistrée par la caméra permet, pour chaque ligne de la matrice de détecteurs, de tracer l'intensité mesurée en fonction de la position en pixel. Les spectres des différentes espèces produites par cette combustion étant connus à pression ambiante, la correspondance entre la position en pixel et la longueur d'onde est ainsi rendue possible (Figure 2) ;
- le niveau d'intensité lumineuse mesuré par la caméra fait l'objet d'un étalonnage au moyen d'un corps noir de température maximale 1500°C ;
- le bruit de fond est soustrait au signal ;
- l'inhomogénéité de réponse des pixels est prise en compte ;
- pour augmenter le rapport signal sur bruit, le spectre est donné par la moyenne des lignes de l'image ;
- la distorsion spatiale liée aux aberrations de l'optique est corrigée lors du traitement des spectres, présenté dans la partie 2.2.

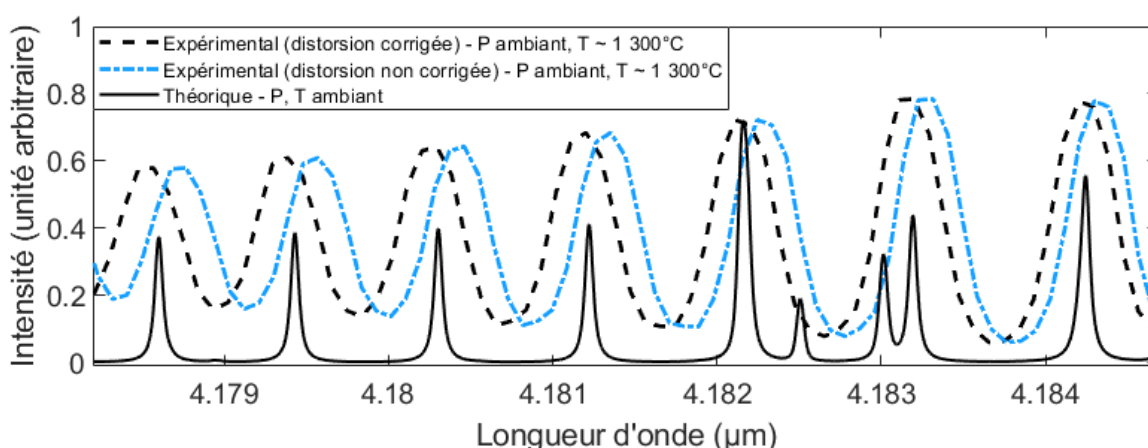


Figure 2 : Comparaison du spectre en émission du CO_2 théorique et expérimental

Les traitements pour prendre en compte les imperfections du capteur infrarouge ainsi que la distorsion spatiale liée à l'optique sont également présentés dans la partie 2.2.

2.2. Traitement pour la correction des spectres mesurés

A la suite de chaque acquisition, une vidéo du signal de fond est enregistrée dans l'obscurité, sans combustion, avec les mêmes paramètres d'acquisition que pour l'essai. Le signal issu de la combustion est ensuite soustrait à celui de l'image du bruit de fond. Cette opération corrige le bruit électronique de la caméra et le bruit thermique. La relation entre la longueur d'onde et la position en pixel d'une raie n'est pas linéaire en raison des différents éléments présents sur le chemin optique, la fonction de transfert optique du miroir parabolique, du spectromètre et de la lentille qui entraînent une distorsion de l'image du spectre dans le plan focal de la caméra. Cette distorsion est corrigée en recherchant la correspondance entre la position spatiale du pixel et la valeur réelle de la longueur d'onde mesurée, en utilisant un polynôme du 3^e ordre (1).

$$\lambda_{réelle} = \lambda_0 + Ap + Bp^2 + Cp^3 \quad (1)$$

où λ_0 est la longueur d'onde correspondant au pixel 0, situé au centre de l'image, p la position du pixel et $\lambda_{réelle}$ la longueur d'onde réelle du pixel p .

Les spectres obtenus sont ceux de molécules dont les positions des raies sont connues à pression atmosphérique. Pour déterminer les coefficients A , B et C , une régression polynomiale du 3^e ordre a été appliquée au spectre expérimental en comparant les positions des raies à celle du spectre théorique. Un exemple de spectre corrigé par cette méthode est présenté Figure 2.

2.3. Principe de la mesure en température

Les gaz chauds absorbent et émettent un rayonnement électromagnétique dépendant de leur température. Dans l'infrarouge, le rayonnement est dû aux rotations et aux vibrations des atomes composant les molécules des gaz. Lorsqu'un rayonnement interagit avec la matière, son émission, dite luminance, suit la loi de Planck, rappelée par l'équation (2). C_1 et C_2 étant les constantes de la loi de Planck respectivement égales à $1,191 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ et $14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.

$$L_{\lambda,T}^0 = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \frac{1}{\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1} \quad (2)$$

Dans ces travaux, la température est déterminée par analyse du spectre d'émission infrarouge du CO_2 . Nous nous plaçons sur la bande ν_3 du CO_2 , centrée à $4,2553 \mu\text{m}$. La structure fine de cette bande, dues aux transitions rotationnelles, nous permet de choisir une région à une extrémité de la bande ν_3 , dont la particularité est de présenter deux raies de la structure fine dites « têtes de bandes ». La région choisie pour l'étude est donc située entre les têtes de bande à $\lambda_1 = 4,1717 \mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 4,1928 \mu\text{m}$ [7]. Cette bande a été choisie pour l'effet thermométrique important des têtes de bande présentes, c'est-à-dire pour la variation importante d'intensité de raie avec la température [7]. Cette sensibilité à la température résulte de l'accumulation de raies très proches en longueur d'onde. L'augmentation de la température entraîne la croissance de la population des niveaux d'énergie les plus élevés et de la diminution de l'intensité des raies des niveaux faiblement excités. À haute température, pour une concentration suffisante, le CO_2 se comporte comme un corps noir suivant la loi de Planck [10].

3. Résultats expérimentaux

Pour obtenir des points thermodynamiques du CO à $4,50 \mu\text{m} - 4,60 \mu\text{m}$, la déflagration de mélanges gazeux $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ est étudiée. Deux mélanges sont considérés, l'un à une pression finale de 8 bar (mélange 1), l'autre à une pression finale de 16 bar (mélange 2) dont les compositions initiales sont détaillées dans les paragraphes ci-après. Pour chaque mélange, deux expérimentations sont effectuées dans les mêmes conditions : un premier avec le spectre centré à $\lambda = 4,180 \mu\text{m}$ pour déterminer la température des gaz et un second centré à $\lambda = 4,567 \mu\text{m}$ pour

obtenir le spectre du CO. Lorsque le front de flamme atteint l'extrémité de la cellule de déflagration, la pression et la température sont maximales. D'après le modèle [1], certaines raies du CO émettent comme un corps noir aux températures et pressions considérées. Une autre méthode d'étalonnage en luminance, exploitant ces parties du spectre où la luminance est celle du corps noir, permet d'étalonner le niveau d'intensité lumineuse mesuré par la caméra. Les spectres présentés sont étalonnés par cette méthode, ainsi que par celle décrite dans la partie 2.1. Après le traitement des résultats, les spectres obtenus sont recalés spatialement et corrigés en distorsion. La correspondance entre le numéro de pixel de la matrice de la caméra et la longueur d'onde est donc assurée. Les vibrations mécaniques induites par l'environnement de travail sont fortement atténuées par une table optique composée par la superposition de couches de fibres de bois de moyenne densité et de polystyrène expansé.

3.1. Mélange 1

Le Tableau 1 donne les fractions molaires initiales du mélange et la température et pression finales déterminées. Le temps $t = 0$ ms correspond au début de la déflagration. Sa durée est de $14,74 \text{ ms} \pm 0,67 \text{ ms}$, ce qui a permis d'enregistrer 22 images avant le refroidissement des gaz brûlés issus de la déflagration complète. Lors de la propagation de la déflagration, la pression augmente jusqu'à sa valeur maximale atteinte lorsqu'elle parvient à la fenêtre d'observation en saphir. Les spectres enregistrés correspondent donc à plusieurs pressions (Figure 3).

Numéro de Tir	Fractions molaires initiales				$\lambda_{centrale}$	P_i	P_f	T_i	T_f
	Sans unité								
	$X(N_2)$	$X(CO_2)$	$X(O_2)$	$X(H_2)$	μm	bar	bar	K	K
1	0,192	0,181	0,214	0,413	4,180	1,069	8,002	295	2 747
2	0,193	0,189	0,211	0,407	4,567	1,063	8,710	294	-

Tableau 1 : Mélange 1 - mélange initial et pressions et températures initiales et finales des gaz

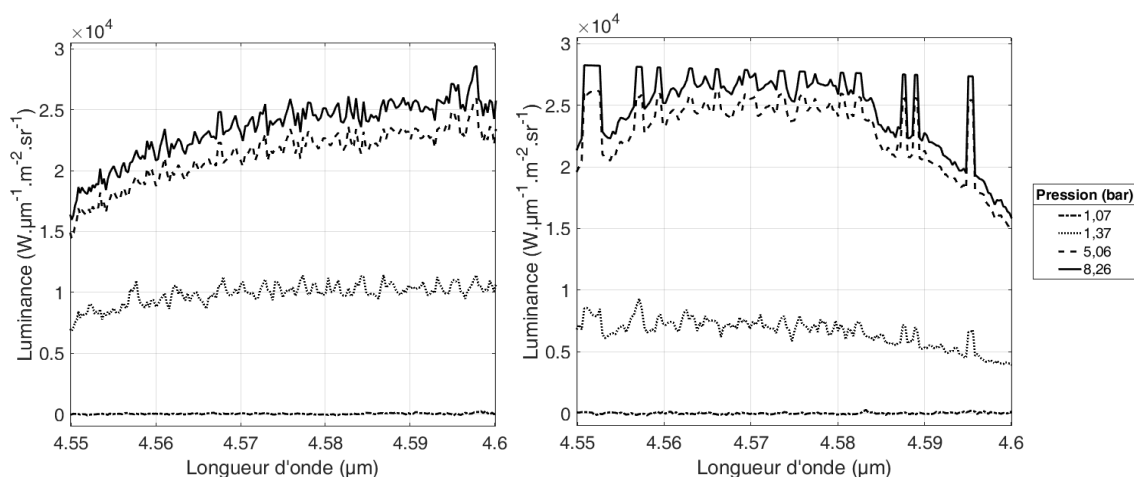


Figure 3 : Evolution du spectre du CO centré à $4,567 \mu\text{m}$ pour le mélange 1. A gauche, étalonnage au moyen d'un corps noir, à droite étalonnage au moyen de la luminance simulée.

La comparaison des spectres traités avec deux étalonnages différents montre que celui étalonné avec le corps noir n'est pas satisfaisant. En effet, aux températures mesurées, la loi de Planck indique que les luminances devraient avoir une tendance décroissante avec l'augmentation de la longueur d'onde, alors que l'effet inverse est observé. Cet écart peut être dû aux différentes incertitudes qui interviennent en manipulation. Il est aussi possible que le corps noir utilisé soit adapté pour des mesures dans le visible et le proche IR, mais pas dans les gammes spectrales de l'étude. Cette analyse appuie la difficulté généralement rencontrée dans le calibrage en infrarouge [8]. Un étalonnage faisant correspondre en certains points l'intensité

mesurée à celle calculée pour un corps noir aux longueurs d'ondes appropriées se révèle meilleure. Il faut noter que les distorsions optiques ne sont pas complètement corrigées sur les spectres, d'où les variations importantes d'intensité observées aux extrémités des spectres. Enfin, il faut noter un fond continu qui se superpose au spectre de raies du CO.

3.2. Mélange 2

Le Tableau 2 donne les fractions molaires initiales du mélange 2 et la température et la pression de fin de déflagration. Le temps $t = 0$ ms correspond au début de la déflagration. La durée de la déflagration est de 4,02 ms à $\pm 0,67$ ms. Quatre spectres sont présentés sur la Figure 4. Les observations concernant les spectres sont les mêmes que pour le mélange 1.

Numéro de tir	Fractions molaires initiales				$\lambda_{centrale}$ μm	P_i bar	P_f bar	T_i K	T_f K
	Sans unité								
	$X(N_2)$	$X(CO_2)$	$X(O_2)$	$X(H_2)$					
1	0,105	0,103	0,254	0,538	4,180	1,960	16,900	293	2 832
2	0,106	0,105	0,260	0,529	4,567	1,916	16,220	294	-

Tableau 2 : Mélange 2 - mélange initial et pressions et températures initiales et finales des gaz

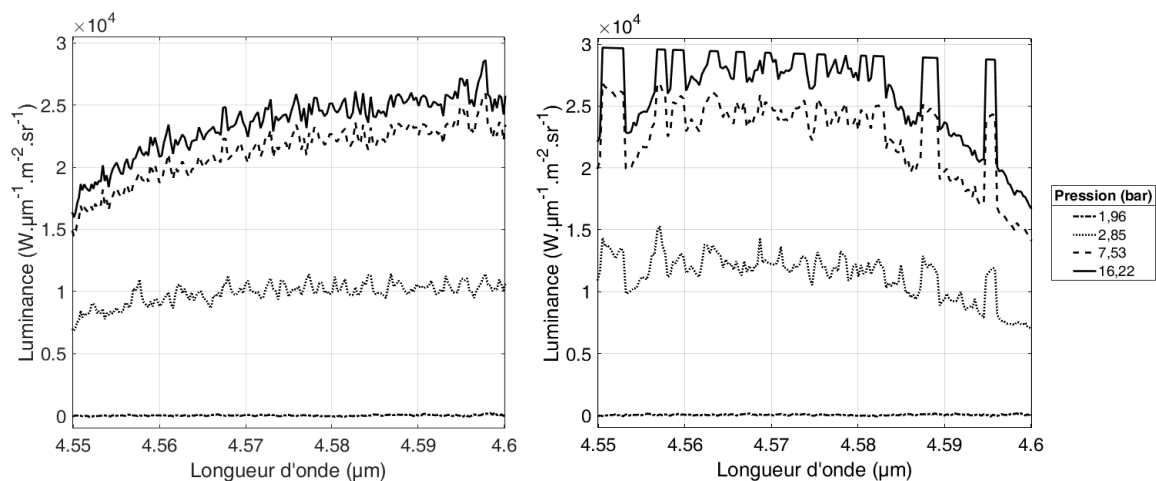


Figure 4 : Evolution du spectre du CO centré à 4,567 μm pour le mélange 2. A gauche, étalonnage au moyen d'un corps noir, à droite étalonnage au moyen de la luminance simulée.

4. Détermination de l'émissivité spectrale et comparaison avec le modèle

L'émissivité spectrale d'une colonne de gaz d'une espèce i , homogène, isotherme et d'épaisseur ℓ , s'exprime selon la relation $\varepsilon_\lambda = L_{\lambda mesurée}(T)/L_\lambda^0(T)$. Pour chaque mélange, l'émissivité spectrale du gaz, ainsi calculée au point de température maximale à partir du spectre correspondant, est présentée Figure 5. Les courbes d'émissivité obtenues sont comparées à celle du modèle [1] sur la plage spectrale 4,56 μm-4,58 μm sur la Figure 6. L'émissivité est de 0,88 pour le mélange 1 et de 0,89 pour le mélange 2. Avec le modèle décrit dans [1], l'émissivité est de 0,67 pour le mélange 1 et de 0,93 pour le mélange 2. Les spectres mesurés et calculés par le modèle [1] sont concordants en termes de positions des raies, comme le montre la Figure 7. Les droites verticales en pointillés permettent d'identifier les correspondances avec quelques pics, et les droites verticales en tirets les concordances avec quelques creux.

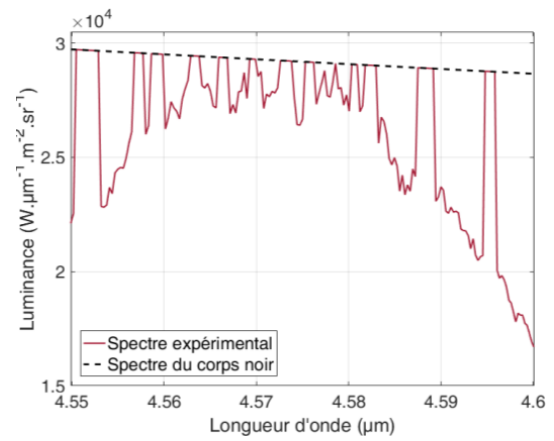
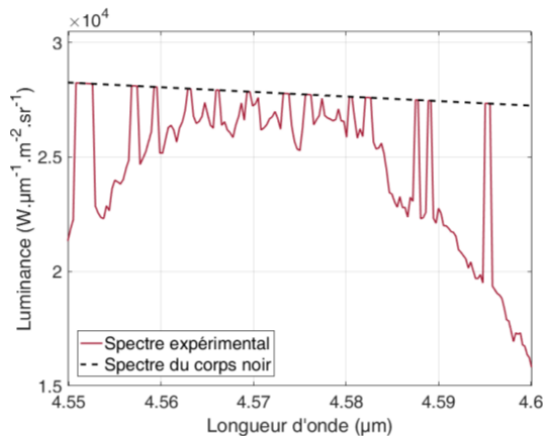


Figure 5 : Luminance spectrale mesurée des mélanges 1 (à gauche) et 2 (à droite), à T_{max} , P_{max}

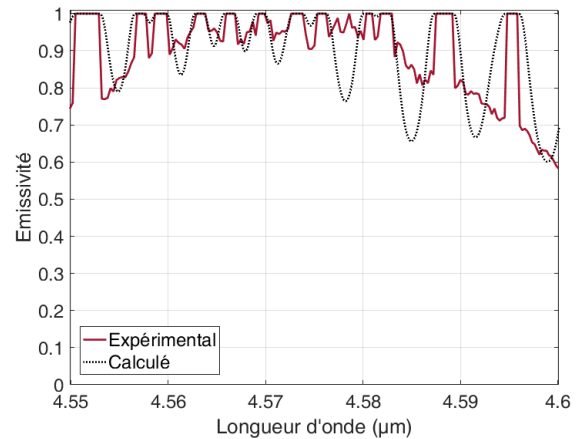
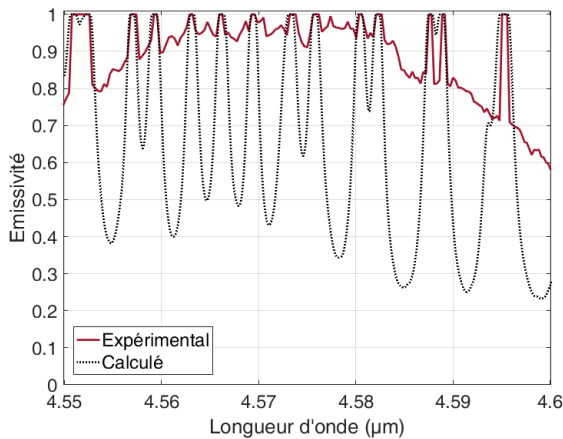


Figure 6 : Émissivité spectrale calculée des mélanges 1 (à gauche) et 2 (à droite), à T_{max} , P_{max}

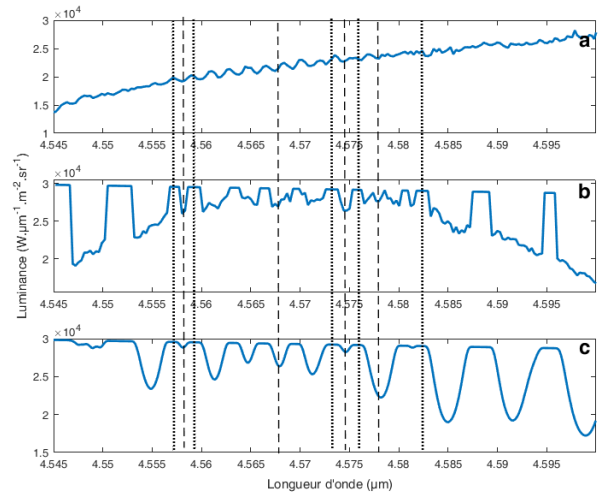
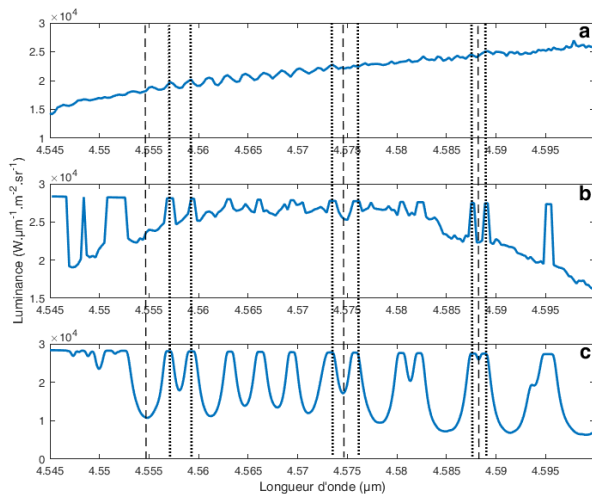


Figure 7 : Comparaison des spectres d'émission expérimentaux étalonnés au corps noir (a), au corps noir calculé (b), et modélisé (c) - mélange 1 (à gauche) et 2 (à droite), à T_{max} , P_{max}

Cependant, les émissivités déterminées expérimentalement sont plus élevées à certaines longueurs d'onde que les émissivités calculées (Figure 7). Le fond continu observé semble être d'origine non thermique. Une explication possible est la chimiluminescence se produisant lors de la réaction $\text{CO}-\text{CO}_2$ dans les gaz de déflagration. C'est un phénomène très étudié dans le visible et le proche UV [9], mais peu dans l'infrarouge [8]. Ceci expliquerait la surestimation de l'émissivité intégrée sur $4,50\ \mu\text{m}-4,60\ \mu\text{m}$ pour le mélange 1.

5. Conclusion

L'acquisition de spectres expérimentaux dans le domaine infrarouge lors d'un phénomène rapide (~ms) nécessite l'utilisation d'une caméra infrarouge de fréquence élevée (supérieure au kilohertz), qui nécessite de revoir les méthodes habituelles de calibrage. Une méthode de calibrage est présentée dans cette communication. Le calcul de la température utilisant le CO₂ comme traceur permet d'estimer la température de fin de combustion. La méthode a permis d'obtenir les spectres de luminance du CO dans l'infrarouge en fonction de la pression, avec une bonne résolution spatiale et temporelle pour l'étude d'une déflagration en milieu gazeux. L'émissivité spectrale du mélange a été déterminée. Les valeurs de l'émissivité intégrée sur la plage 4,50µm-4,60µm à partir du modèle [1] et de l'expérience sont en assez bon accord. Il semblerait qu'une émission d'origine non thermique, la chimiluminescence au cours de la réaction CO-CO₂, soit observée en infrarouge dans la zone d'étude de 4,50µm-4,60µm. Des travaux plus approfondis seraient à mener sur ce sujet, connu dans le visible [9] mais peu étudié dans l'infrarouge [8]. L'accès à ces données expérimentales contribue à la validation de calculs thermo-chimiques et thermocinétiques des états de déflagration.

Références

- [1] I. Ranc-Darbord, B. Serio, G. Baudin, Khanh-Hung Tran, Eloi Neuville, Jérémy Lebedinsky, Modélisation de l'émission totale de produits gazeux issus de détonations, *Congrès Français de Thermique*, Toulouse, SFT 2016.
- [2] L.S. Rothman *et al*, The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database, *J. Quant. Spectrosc. and Rad. Transfer*, vol. 130, p. 4-50, 2013.
- [3] L.S. Rothman, I.E. Gordon, R.J. Barber, H. Dothe, R.R. Gamache, A. Goldman, V. Perevalov, S.A. Tashkun, and J. Tennyson, HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database, *J. Quant. Spectrosc. and Rad. Transfer*, vol.111, p.2139-2150, 2010.
- [4] M. Alberti, R. Weber, M. Mancini, Absorption of infrared radiation by carbon monoxide at elevated temperatures and pressures: Part B. Total emissivity charts and correlations, *J. Quant. Spectrosc. and Rad. Transfer*, 2017.
- [5] J. Pearson, B. Webb, V. Solovjov et J. Ma, Efficient representation of the absorption line blackbody distribution function for H₂O, CO₂ and CO at variable temperature, mole fraction, and total pressure, *J. Quant. Spectrosc. and Rad. Transfer*, vol.138, pp. 82-96, 2014.
- [6] A.-C. Roger, Optimisation de Catalyseurs structurés à base de Mousses cellulaires pour l'intensification de la valorisation du CO₂ en méthane, *Défi Transition Energétique – Projet Exploratoire Emergence CO₂*, Paris, 2015.
- [7] D. Fournet, *Etude des propriétés thermo-optiques des milieux poly-phasiques : application aux jets propulseurs*, Thèse de l'Université Paris X, 1997.
- [8] A. Pettersson, *Investigations of infrared chemiluminescence emission from laboratory flames*, Rapport de Master de l'Université de Lund, 2004.
- [9] M. Kopp, *Rate determination of the CO₂* chemiluminescence reaction CO + O + M = CO₂* + M*, Rapport de Master de l'Université A&M du Texas, 2012.
- [10] P. Chelin, *Étude des propriétés radiatives de la vapeur d'eau à haute température et haute pression par diagnostic optique de la combustion H₂/O₂/N₂*, Thèse de l'Université Paris X, 2003.
- [11] I. Ranc-Darbord, G. Baudin, M. Genetier, D. Ramel, P. Vasseur, J. Legrand et V. Pina, Emission of gas and Al₂O₃ smoke in gas-Al particle deflagration : experiments and emission modeling for explosives fireballs, *International Journal of Thermophysics*, Volume 39, Issue 3, 28 pp. 2018.