



HAL
open science

Optimisation de la mesure de température de paroi par thermographie de luminophore appliquée à la combustion

Arthur Degenève, Paul Jourdain, Clément Mirat, Ronan Vicquelin, Thierry Schuller

► **To cite this version:**

Arthur Degenève, Paul Jourdain, Clément Mirat, Ronan Vicquelin, Thierry Schuller. Optimisation de la mesure de température de paroi par thermographie de luminophore appliquée à la combustion. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, Centrale-Supélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097664

HAL Id: hal-02097664

<https://hal.science/hal-02097664>

Submitted on 12 Apr 2019

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.

Optimisation de la mesure de température de paroi par thermographie de luminophore appliquée à la combustion

Arthur DEGENEVE^{1,2}, Paul JOURDAINE², Clément MIRAT¹, Ronan VICQUELIN¹,
Thierry SCHULLER^{1,3}

¹ Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 8-10, rue Joliot Curie, 91192 Gif-sur-Yvette cedex, France

² Air Liquide, Centre de recherche Paris Saclay, Chemin de la Porte des Loges, B.P. 126, 78354 Les Loges en Josas, France

³ Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

Email auteur correspondant : arthur.degeneve@centralesupelec.fr

Résumé

La mesure de température de parois dans les foyers de combustion est un enjeu majeur à la fois pour étudier l'impact de l'environnement thermique sur l'état de la combustion et pour confronter les expériences aux simulations numériques pour lesquelles on a besoin de fixer des conditions aux limites. Des mesures précises sont aujourd'hui possibles grâce aux récents développements de diagnostics laser utilisant des matériaux luminophores. Ces matériaux sont stimulés par un signal lumineux monochromatique incident dans le visible ou l'UV et émettent en retour un signal de luminescence dont le temps caractéristique de décroissance τ dépend de la température de la surface du matériau. De nombreux luminophores sont disponibles pour mesurer différentes gammes de température. La température est alors déduite d'une courbe d'étalonnage à l'aide du temps τ mesuré. Cette mesure indirecte de la température, appelée "phosphor thermometry" ou "Laser Induced Phosphorescence", nécessite un calibrage précis sur toute la gamme de températures étudiée. L'objectif de cette étude est de présenter des améliorations de l'étalonnage, de la chaîne de détection, d'acquisition et du traitement du signal de luminescence qui permettent d'augmenter la gamme de mesure et la précision d'un système de thermographie par luminophores. En optimisant l'électronique de détection pour les hautes fréquences et l'échantillonnage des signaux, des temps de décroissance répartis sur 5 décades ont pu être déterminés avec précision, ce qui donne accès à la fois aux basses et aux hautes températures des parois au sein d'une chambre de combustion. Une optimisation de l'algorithme d'interpolation du signal de luminescence proposé par Brübach *et al.* est ensuite présentée grâce à un post-traitement des données permettant de réduire la dispersion du signal. En couplant ces méthodes, la précision des mesures chute en dessous du Kelvin sur la quasi-totalité de la gamme de température de $T = 300$ à 1050 K.

Introduction

Accéder à la température des parois est fondamental dans une chambre de combustion. Elle permet d'abord d'évaluer les contraintes thermiques auxquelles les matériaux sont soumis. Du fait des pertes thermiques, la température aux parois a également une forte influence sur la topologie de la flamme [1, 2, 3] et les émissions de polluants [4]. Mesurer la température de part et d'autre d'un élément solide permet également d'estimer le flux conductif et d'analyser les transferts de chaleur au sein d'une chambre de combustion [5]. Une meilleure connaissance de la température au niveau des parois est indispensable pour imposer les bonnes conditions aux limites thermiques dans les simulations des écoulements qui soient le plus représentatives possibles du fonctionnement réel du système [6, 7].

Les développements de matériaux luminophores facilitent aujourd'hui les mesures des températures aux parois grâce aux diagnostics laser [8, 9]. Les propriétés spectrales de fluorescence d'un matériau dépendent de sa température. Lorsqu'un phosphore thermographique, élément principalement consti-

tué de terre rare, subit une excitation dans l’ultra-violet, il émet un signal de phosphorescence. Le principe de la thermographie de luminophore consiste à utiliser ce signal pour en déduire la température du phosphore. Du phosphore est déposé en fines couches sur une paroi, l’excitation laser, puis l’acquisition du signal de phosphorescence permet alors de caractériser avec précision la température de la paroi en considérant qu’elle est à l’équilibre thermique avec le dépôt de phosphore. Davantage d’informations sur les phénomènes physiques de phosphorescence sont fournis dans la revue de Allison et Gillies [8]. L’utilisation des phosphores pour la thermographie remonte aux années 1950, comme le montre les travaux pionniers de Bradley [10]. Elle s’est ensuite élargie avec la découverte de nouveaux luminophores et le développement de lasers ultra-violet performants comme nouvelles sources d’excitation. Les revues réalisées par Allison et Gillies [8], ou plus récemment par Brübach *et al.* [9] offrent aujourd’hui un large aperçu des techniques et applications des peintures thermographiques.

La mesure de température par thermographie de phosphore présente également de nombreux avantages par rapport aux autres diagnostics permettant de déterminer des températures de surface. Les mesures par thermocouple sont intrusives et ponctuelles, et l’accès au volume de mesure peut être limité si l’emplacement du thermocouple n’a pas été prévu initialement. La mesure par pyrométrie, qui utilise le rayonnement de corps noir, repose également sur les propriétés radiatives des matériaux qui sont souvent mal connues. Enfin, l’utilisation de peintures thermochromiques permet de cartographier les températures aux parois dans de nombreuses configurations, y compris industrielles [11], mais le caractère irréversible du diagnostic ne donne qu’une information sur la température maximale ayant été atteinte. La thermographie par luminophore affiche aujourd’hui une précision inférieure à 1% sur de larges gammes de température [5, 8, 9]. Utilisée à haute cadence, elle donne également des informations sur les fluctuations de température auxquelles sont soumises les parois [12].

Cette étude fait suite aux travaux de Guiberti *et al.* [13], dans lesquels un dispositif de thermographie par phosphore est exploité pour déterminer les températures des parois d’un foyer jusqu’à 800 K où la combustion prend place relativement loin des parois. Dans une chambre de combustion, les températures aux parois excèdent souvent 800 K et le développement du dispositif pour atteindre des températures plus élevées constitue la motivation principale de cette étude. Les améliorations réalisées dans ce contexte ont permis de caractériser de manière exhaustive le comportement thermique d’un foyer opéré avec des mélanges $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ et $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$ développant la même puissance $\mathcal{P} = 13$ kW et possédant la même température adiabatique de fin de combustion $T_{ad} = 2200$ K lorsque les flammes sont stabilisées par un injecteur équipé d’une vrille [5]. Cette étude porte sur la réalisation des courbes de calibrage qui permettent d’évaluer et d’améliorer la performance et la précision du diagnostic. Dans une première partie, le dispositif expérimental de mesure de température par luminophore est présenté. Du fait des hautes températures liées à la combustion, on montre que la chaîne d’acquisition du signal de phosphorescence doit supporter des hautes fréquences de mesures et deux solutions sont proposées pour répondre à ce besoin. Enfin, une analyse de sensibilité est réalisée pour montrer comment la précision du diagnostic peut-être sensiblement améliorée grâce à un post-traitement adéquat.

1 Description du dispositif expérimental

Un dispositif de thermographie de luminophore est utilisé pour déterminer la température des parois d’une chambre de combustion. Parmi les différentes stratégies de mesure de température reposant sur les phosphores, la méthode résolue en temps est choisie dans cette étude [2, 9]. Elle offre une meilleure précision et est moins sensible aux réglages optiques par exemple que la méthode utilisant un rapport d’intensité du signal entre deux bandes spectrales différentes [9]. La poudre luminophore $\text{Mg}_{3.5}\text{FGeO}_5:\text{Mn}$ (Phosphor-Technology, EQD25/N-U1) est mélangée avec un liant industriel (ZYP Coatings, HPC Binder) qui résiste à des températures allant jusqu’à 1773 K. Le mélange est appliqué par couches successives en prenant soin de sécher par chauffage chaque dépôt avant d’appliquer la couche suivante. Les travaux de Knappe *et al.* [14] ont montré qu’une forte épaisseur de phosphore déposée, de l’ordre de plusieurs dizaines de microns, peut se traduire par un délai de la réponse lors de la caractérisation d’effets instationnaires. L’épaisseur du phosphore n’est néanmoins pas mesurée dans cette étude car on s’intéresse uniquement à la valeur moyenne de la température prise en régime permanent. Dans une étude récente, Xavier *et al.* [15] montrent que les propriétés d’un luminophore ne sont pas altérées lorsqu’il est soumis à de hautes températures, et que la présence du dépôt de phosphore a peu d’influence sur la position d’une flamme stabilisée dans le sillage du barreau où a été réalisé le dépôt.

Le dispositif expérimental est présenté à la figure 1. Le luminophore est excité avec un laser Nd:YAG

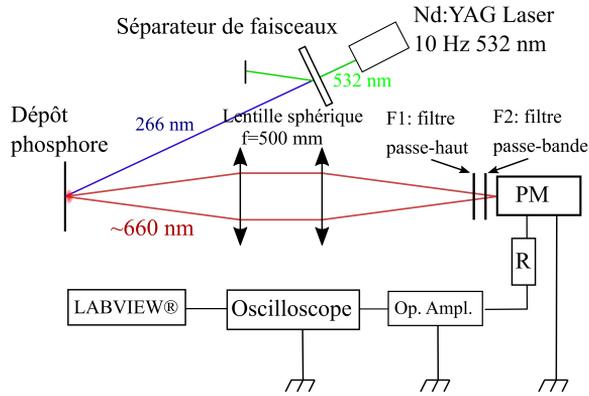


Figure 1: Dispositif expérimental et chaîne d'acquisition pour la mesure de température de parois par thermographie de luminophores.

quadruplé à 266 nm à une fréquence de répétition de 3 Hz (Continuum, Minilite ML II). La désexcitation du phosphore $\text{Mg}_{3.5}\text{FGeO}_5:\text{Mn}$ produit un signal de luminescence dont le pic d'émission est centré autour de 660 nm. La réponse temporelle de ce signal est récoltée avec un multiplicateur de photons (PM) dont le temps de montée est de 5 ns (Hamamatsu, R9880U-20). Le signal électrique est amplifié au moyen d'une résistance R de charge non inductive (Arcol, AP-821), et d'un amplificateur de courant dont le temps de montée est de 10 ns (HCA-40M-100K-C). Le signal est enregistré avec un oscilloscope 350 MHz (Lecroy WaveSurfer 434). Le choix de ces composants a contribué à augmenter la précision et la dynamique de mesure du dispositif expérimental. Ce choix est justifié ultérieurement à la section 2.

Le signal de luminescence suivant l'impulsion laser est modélisé par une courbe exponentielle décroissante $I(t) = I_0 \exp(-t/\tau)$, dont le temps de décroissance τ , ou durée de vie est fonction de la température T du phosphore. Un exemple de désexcitation du luminophore à la température $T = 300$ K est présenté à la figure 2. La détermination de la durée de vie τ à partir du signal $I(t)$ est une tâche délicate car le signal ne présente pas toujours une décroissance exponentielle de la forme $\exp(-t/\tau)$ et est également pollué par du bruit de mesure. Comme le temps de vie τ n'est qu'un intermédiaire de mesure, le modèle exponentiel reste cependant d'un intérêt pratique tant que le même algorithme d'interpolation est appliqué entre la procédure de calibrage et la mesure de température dans le foyer. Brübach *et al.* ont développé une technique de fenêtrage qui permet de déduire sans ambiguïté le temps de vie τ de l'intensité enregistrée par le capteur $I(t)$ [16]. Si t_0 est le temps d'impulsion du laser, le signal est tronqué entre les instants $t_1 = t_0 + c_1\tau$ et $t_2 = t_0 + c_2\tau$, où c_1 et c_2 sont deux constantes positives. C'est cette partie du signal qui est utilisée pour l'interpolation sur une courbe exponentielle décroissante. La procédure est itérative car les temps t_1 et t_2 dépendent de la valeur τ ainsi déterminée.

Une autre approche proposée par Guiberti *et al.* [13] est d'utiliser un fenêtrage sur la tension du signal enregistré par le capteur. Cette méthode ne nécessite pas de procédure itérative. Cet algorithme présente l'intérêt d'être plus rapide, mais est moins précis que la technique de fenêtrage temporel. Dans cette étude, le fenêtrage en tension de Guiberti *et al.* [13] est d'abord utilisé lorsque l'acquisition et le traitement du signal sont réalisés en temps réel tandis que la procédure itérative établie par Brübach *et al.* [16] pour déterminer la meilleure fenêtre temporelle est ensuite appliquée lors du post-traitement est réalisé *a posteriori*. Ce choix est justifié à la section 2. Dans la figure 2, la partie grisée correspond au signal sélectionné pour l'interpolation entre les instants t_1 et t_2 . A la section 3, une étude de sensibilité est réalisée sur les valeurs des seuils c_1 et c_2 permettant de nettement améliorer la précision du diagnostic.

Enfin, la mesure de température par thermographie de phosphore doit être calibrée pour faire correspondre chaque durée de vie τ du phosphore avec sa température. En suivant la méthode développée par Guiberti *et al.* [13], un fin dépôt de phosphore sur un thermocouple permet de connaître simultanément la température du phosphore et sa durée de vie. L'ensemble est porté à une température entre $T = 300$ K et 1050 K au moyen du chauffeur électrique (LEISTER, CH-6056, 2850W) représenté à la figure 3(a). Pour atteindre de plus hautes températures, un four à tube régulé en température avec un accès optique constitue un excellent outil pour le calibrage [17, 12], mais représente malheureusement un coût con-

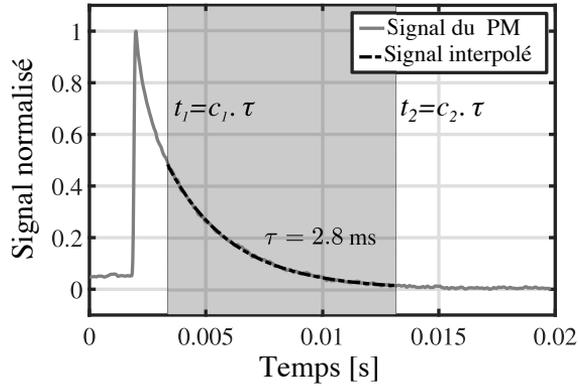


Figure 2: Signal de phosphorescence du luminophore $\text{Mg}_{3.5}\text{FGeO}_5:\text{Mn}$ à la longueur d'onde $\lambda = 660 \text{ nm}$, à la température $T = 300 \text{ K}$. Ligne continue: signal brut enregistré par l'oscilloscope. Aire grisée: fenêtre temporelle où le signal est sélectionné pour déterminer la durée de vie τ . Ligne en pointillés: signal de décroissance exponentielle interpolé.

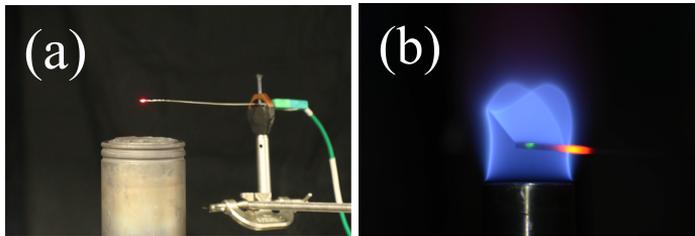


Figure 3: Sources de chaleur pour la calibration du diagnostic de mesure de température par thermographie de luminophore. Gauche: chauffeur électrique. Droite: flamme de prémélange méthane/air.

séquent. Une alternative proposée dans cette étude est d'utiliser une flamme de prémélange méthane/air stabilisées sur un injecteur cylindrique, présentée à la figure 3(b). Un thermocouple est d'abord inséré dans les gaz frais, ce qui fournit une température de référence très stable. En rapprochant le thermocouple du front de flamme, des températures entre $T_{min} = 800 \text{ K}$ à $T_{max} = 1400 \text{ K}$ ont ainsi été mesurées de manière continue avec une fluctuation ne dépassant pas $T_{rms} = 3 \text{ K}$. L'utilisation d'un thermocouple non chemisé est envisagé prochainement pour augmenter la précision de la mesure en réduisant le volume de mesure lors de la phase de calibrage avec la flamme. Cette technique sera testée avec le phosphore Yap:Eu [17] pour mesurer des températures de 800 K à 1400 K . Les mesures présentées dans cette étude sont réalisées avec le phosphore $\text{Mg}_{3.5}\text{FeO}_5:\text{Mn}$ et un chauffeur électrique.

2 Optimisation du système d'acquisition pour la combustion

Au sein d'une chambre de combustion, les températures des parois se répartissent sur une large gamme. Dans la chambre Oxytec [18] de section carrée de côté $a = 150 \text{ mm}$, et pour une flamme CH_4/air de puissance $\mathcal{P} = 13 \text{ kW}$, les parois en contact avec la flamme dépassent la température $T_{max} = 1050 \text{ K}$. Dans ces conditions la durée de vie du signal de phosphorescence vaut $\tau = 100 \text{ ns}$ pour le matériau $\text{Mg}_{3.5}\text{FeO}_5:\text{Mn}$ avec le dispositif utilisé. En revanche, sur le fond de chambre directement en contact avec le système de refroidissement la température n'atteint que $T_{min} = 450 \text{ K}$, correspondant à une durée de vie $\tau = 3 \text{ ms}$. Le temps de décroissance du signal de phosphorescence dépendant exponentiellement de la température, la chaîne de détection et d'acquisition doit présenter une dynamique couvrant 5 décades. Cette forte sensibilité représente un atout pour la précision de la mesure de température, mais rend

l'acquisition du signal plus exigeante. La performance du dispositif expérimental est ainsi fortement liée à la capacité à mesurer des temps de décroissance très courts. Pour des raisons pratiques, il est préférable d'utiliser un seul luminophore pour mesurer les températures sur toute la gamme souhaitée. Dans cette partie, des techniques sont présentées pour considérablement augmenter la dynamique de mesure de la chaîne de détection et d'acquisition. L'acquisition du signal est également automatisée pour limiter le temps d'intervention sur le diagnostic lorsque la chambre de combustion est opérée.

Pour dimensionner la chaîne de détection et d'acquisition, c'est le temps de décroissance correspondant à la température maximale souhaitée qui est déterminante. L'analyse suivante est réalisée avec des mesures de température par "temps de vie" du phosphore. La méthode est générique et peut être appliquée pour la plupart des phosphores utilisés. Le luminophore $\text{Mg}_{3,5}\text{FGeO}_5:\text{Mn}$ est retenu car il permet de déterminer des températures de paroi sur l'ensemble de la gamme de températures d'intérêt pour cette étude et est souvent utilisé pour la combustion. La durée de vie du signal issu du luminophore à la température maximale T_{max} vaut ici $\tau(T_{max}) = 100$ ns. Cette durée correspond au plus faible taux de décroissance que le système doit permettre de déterminer. Pour déduire avec précision la durée de vie τ à partir du signal de phosphorescence, il faut récolter au moins $N_1 = 25$ échantillons du signal issu du PM pendant la durée τ . La fréquence d'échantillonnage maximale $f_{T_{max}}$ requise correspond alors à $f_{T_{max}} = 250$ MHz. Ces quantités sont résumées dans le tableau Tab. 1. Pour détecter des temps de vie aussi courts, il est nécessaire d'optimiser à la fois l'électronique analogique du système de détection et il est utile d'utiliser des techniques d'échantillonnages évoluées. Ces deux aspects sont présentés ci-dessous.

2.1 Optimisation du dispositif électronique

L'ensemble des composants électroniques d'un dispositif de thermographie par luminophore doit être optimisé pour permettre de détecter les basses et les hautes fréquences. C'est particulièrement le cas pour le capteur optique, la chaîne d'amplification et le convertisseur analogique-numérique. Pour échantillonner des signaux à la fréquence $f_{T_{max}} = 250$ MHz, les cartes d'acquisitions standards ne sont en général pas suffisantes. Un oscilloscope (LeCroy WaveSurfer 434, 350MHz) a été retenu dans cette étude. Concernant le capteur optique, l'analyse d'ordre de grandeur précédente montre que la plupart des caméras ne sont pas suffisamment rapides pour détecter ces temps de décroissance. Dans une étude de Kissel *et al.*, une caméra CMOS à 675 kHz a permis de mesurer des temps de décroissance de l'ordre de 50 μs , grâce à une correction pixel par pixel. Les performances des caméras actuelles limitent néanmoins la température maximale pouvant être mesurée pour un phosphore donné avec cette technique. Un multiplicateur de photons avec un temps de montée de 5 ns (Hamamatsu, R9880U-20) est donc sélectionné pour cette étude. Les mesures sont dans ces conditions limitées à un zone d'intérêt grâce à un montage optique adapté et intégrées sur le champ de vision du capteur.

La chaîne d'amplification du signal de phosphorescence doit également être adaptée, les résultats de cette étude montrent qu'elle peut limiter la résolution fréquentielle du système. Comme décrit par Brübach *et al.* [9], les effets capacitifs et inductifs du circuit électronique doivent être pris en compte dans la conception du dispositif expérimental. Un montage pour amplifier le signal du multiplicateur de photons est présenté à la figure 1. Il est constitué d'une résistance de charge R et d'un amplificateur opérationnel pour augmenter le signal du PM. L'effet de la valeur de l'impédance à la sortie du capteur optique est illustrée par Clarke et Gentleman [19] et Guiberti *et al.*[20]. Augmenter la valeur de la résistance R améliore le rapport signal sur bruit et réduit la dispersion du signal. Cependant, une valeur trop élevée de la résistance R réduit la bande passante du circuit qui se comporte comme un

Table 1: Estimation des temps et des fréquences caractéristiques permettant de dimensionner un dispositif de mesure de température par thermographie de luminophore.

Phosphore	Gamme de température	Gamme de temps de décroissance τ	N_1 nombre d'échantillons du signal requis pendant τ	Fréquence d'échantillonnage maximale $f_{T_{max}}$	Temps de collection maximal $\Delta t_{T_{min}}$
$\text{Mg}_{3,5}\text{FGeO}_5:\text{Mn}$	300 K -1050 K	100 ns - 3 ms	25	250 MHz	15 ms

filtre passe-bas. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le rapport signal sur bruit et la fréquence de coupure du système pour détecter les temps de décroissance les plus courts. Guiberti *et al.* [20] ont analysé cet effet sur le temps de montée t_m du signal, défini comme le temps nécessaire pour que l'intensité du signal électrique enregistré passe de 10% à 90% de sa valeur maximale. Dans ces travaux, une résistance $R = 35 \text{ k}\Omega$ induit un temps de montée de $t_m = 140 \mu\text{s}$, ce qui ne permet pas de détecter des temps de décroissance courts. Clarke et Gentlement [19] montrent que l'impédance du capteur altère également la courbe de calibrage $\tau = f(T)$ en induisant un plateau à partir duquel le temps de décroissance ne décroît plus avec la température. Ce biais de mesure est le signe d'une impédance inadaptée de la chaîne de détection et est caractéristique d'une trop forte valeur de la résistance R . La solution retenue dans cette étude est de réduire la valeur de la résistance au détriment du rapport signal sur bruit.

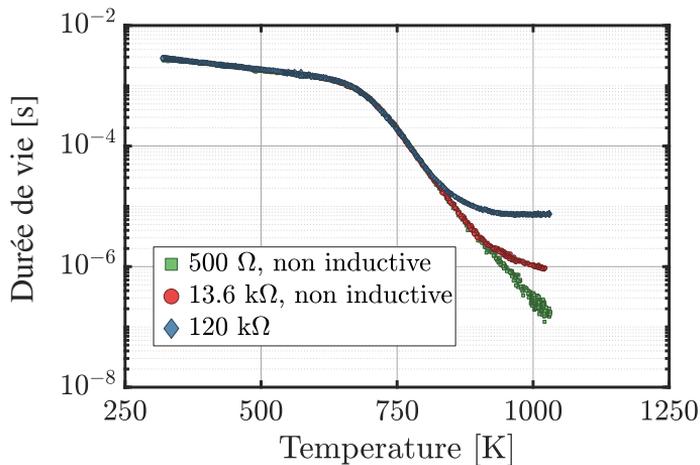


Figure 4: Courbe de calibration: évolution du temps de décroissance τ du luminophore $\text{Mg}_{3.5}\text{FGeO}_5:\text{Mn}$ en fonction de sa température pour trois valeurs de résistance de charge.

Les effets inductifs de la résistance de charge peuvent être atténués en choisissant des résistances non-inductives (Arcol, AP-821) qui sont adaptées aux chaînes d'acquisition à hautes fréquences. L'effet de ce changement de résistance est illustré à la figure 4. Le même luminophore $\text{Mg}_{3.5}\text{FGeO}_5:\text{Mn}$ est porté à la température souhaitée et son temps de décroissance est déterminé avec la même procédure pour trois résistances différentes. Sur la figure 4, chaque durée de vie déduite d'une impulsion laser est représentée par un point. La première résistance est une bobine résistive de résistance $R = 120 \text{ k}\Omega$. Les deux autres sont des résistances non inductives $R = 13.6 \text{ k}\Omega$ et 500Ω . Pour les températures de parois modérées $T < 800 \text{ K}$, les trois courbes de calibration sont superposées sur la figure 4. La valeur de la résistance R n'altère dans ces conditions pas la durée de vie τ mesurée. Pour les températures de parois plus élevées $T > 800 \text{ K}$, la courbe de calibration avec la bobine résistive $R = 120 \text{ k}\Omega$ atteint ensuite un plateau à $7 \mu\text{s}$. La bobine résistive a également été utilisée à une plus faible valeur de résistance $R = 13.6 \text{ k}\Omega$ mais conduit à un mauvais rapport signal sur bruit, sa courbe de calibration n'est par conséquent pas affichée. En revanche, le passage à une résistance non inductive de résistance $R = 13.6 \text{ k}\Omega$ et adaptée à la haute fréquence permet bien de prolonger la pente et de déterminer des durées de vie plus courtes. Le changement de pente est observé dans ces nouvelles conditions pour la température $T = 920 \text{ K}$. Pour détecter des durées de vie encore plus courtes, il est alors nécessaire de réduire davantage la valeur de la résistance à $R = 500 \Omega$. Dans ce cas, aucun changement de pente n'est observé pour des températures $T < 1050 \text{ K}$.

La figure 4 indique également que les courbes de calibrage sont plus dispersées lorsque la valeur de la résistance de charge R chute. Ce constat est particulièrement clair pour les résultats obtenus avec la résistance $R = 500 \Omega$ pour les hautes température $T > 1000 \text{ K}$ ou en effectuant un zoom sur les autres parties de la courbe. Lorsque les courbes sont superposées, la précision de la mesure est donc plus importante pour les hautes valeurs de résistance R car le rapport signal sur bruit est plus grand.

Par conséquent, la stratégie adoptée pour déterminer la température aux parois d'une chambre de combustion dont les températures ne sont *a priori* pas connues est la suivante. Au cours d'une première

série de mesures, le signal est détecté en balayant les parois avec la plus faible valeur de résistance $R = 500 \Omega$. Cette opération permet de garantir que le signal enregistré correspond bien au signal de phosphorescence sans biais de l'électronique de détection. Une première estimation des températures des parois est ainsi réalisée. Au cours d'une seconde série de mesures, l'acquisition est réalisée en adaptant la valeur de la résistance à la température mesurée sur chaque paroi. Cette seconde étape, permet de nettement améliorer la précision des températures déterminées.

Au sein de la chambre Oxytec [5], les températures des parois les plus chaudes sont déterminées avec la résistance $R = 500 \Omega$ sur les fenêtres en quartz proches de la flamme, tandis que la résistance $R = 13.6 \text{ k}\Omega$ a permis d'obtenir une meilleure précision pour les pièces en contact avec le système de refroidissement.

2.2 Méthode d'échantillonnage adaptatif en temps réel (RTAS)

Le deuxième élément permettant d'améliorer les performances du dispositif expérimental est d'adapter l'échantillonnage du signal en temps réel. A l'inverse du taux d'échantillonnage maximal $f_{T_{max}}$, la durée d'acquisition $\Delta t_{T_{min}}$ est contrainte par les basses températures. La durée doit être suffisamment longue pour enregistrer la signal du PM pendant la durée $\Delta t_{T_{min}}$ estimée à environ $N_2 = 5$ temps de décroissance τ du signal issu du luminophore à température ambiante. Ce temps correspond ici à $\Delta t_{T_{min}} = N_2 \tau_{(T=300K)} = 0.01s$. Dans cet exemple où la fréquence d'échantillonnage est fixée à $f_{T_{max}} = 250 \text{ MHz}$, 2.5 millions d'échantillons seraient ainsi collectés à chaque impulsion du laser. En suivant cette méthode, il faut du matériel avec une capacité de stockage important qui ralentirait considérablement l'acquisition de données ainsi que le post-traitement.

Cette illustration montre qu'un dispositif dont la fréquence d'échantillonnage f_s est constante sur toute la gamme de températures mesurées n'est pas la solution la mieux adaptée pour la dynamique souhaitée. Une solution est d'adapter en temps réel à la fois le taux d'échantillonnage f_s du dispositif et la durée d'acquisition Δt_s . A chaque impulsion laser i où le signal est enregistré correspond un temps de décroissance τ^i du signal de phosphorescence supposé connu. L'adaptation RTAS satisfait le système:

$$\begin{cases} f_s^{i+1} = N_1 / \tau^i \\ \Delta t_s^{i+1} = N_2 \tau^i \end{cases} \quad (1)$$

Dans ces expressions N_1 et N_2 sont deux constantes, dont des valeurs sont typiquement $N_1 = 25$ et $N_2 = 5$. La méthode d'échantillonnage adaptatif en temps réel (RTAS) optimise la qualité du signal et la rapidité de la chaîne d'acquisition sur toute la gamme de mesure de température. La plupart des cartes d'acquisition permettent de piloter le taux d'échantillonnage et la durée d'acquisition, certains oscilloscopes également. De plus, pour chaque impulsion laser i , la méthode RTAS nécessite de connaître le taux de décroissance du phosphore τ^i , qui doit donc être déterminé en temps réel à chaque réception du signal de phosphorescence. La détermination de τ^i ne doit pas ralentir l'ensemble de la chaîne d'acquisition et l'ensemble du traitement doit être réalisé sur une durée limitée par le taux de répétition du laser opérant à 3 Hz.

Un programme interfacé avec LabView a été développé suite aux travaux de Guiberti *et al.* [13]. Le principe est représenté à la figure 5. A chaque impulsion laser i , le temps de décroissance τ^i est déterminé en temps réel à partir du signal électrique issu du PM. Si la durée de vie τ^i est suffisamment différente de ses valeurs précédentes, une nouvelle fréquence d'échantillonnage f_s et une nouvelle durée d'acquisition Δt_s sont sélectionnées comme consigne à l'oscilloscope. Pour ne pas induire de délai supplémentaire, la durée de vie τ^i est déterminée à partir de l'algorithme développé par Guiberti *et al.* [13], qui ne nécessite pas de processus itératif. Les valeurs pour le fenêtrage $d_{max} = 90\%$ et $d_{min} = 10\%$ en tension sont retenues dans cette étude pour leur robustesse. Si le convertisseur analogique-numérique est un oscilloscope, le changement de la fréquence d'échantillonnage peut être mécanique et lent, le programme doit alors être stable et limiter la commutation en fréquence.

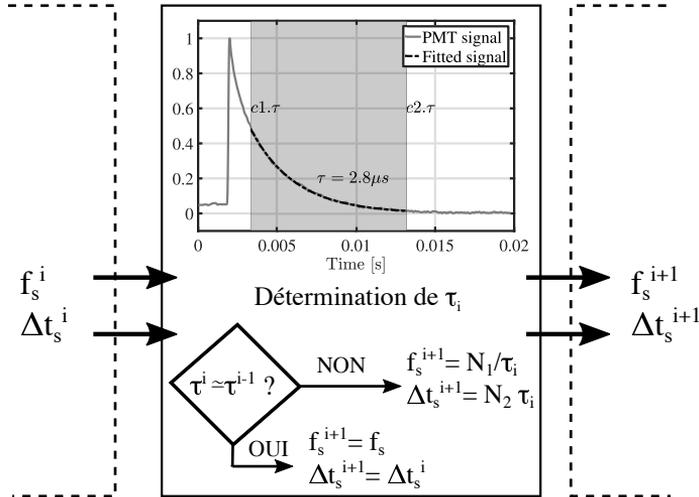


Figure 5: Principe de l'échantillonnage adaptatif en temps réel permettant d'augmenter la dynamique du dispositif de mesure.

3 Optimisation du signal par post-traitement

La détermination des temps de décroissance à partir du signal de phosphorescence peut être considérablement optimisée par post-traitement des données. Pour un même signal enregistré, la durée de vie calculée dépend de l'algorithme et du fenêtrage réalisé pour ajuster le signal [16, 9]. L'algorithme développé par Brübach *et al.* [16] basé sur un fenêtrage temporel entre les instants $t_1 = t_0 + c_1\tau$ et $t_2 = t_0 + c_2\tau$ est choisi pour sa précision. Dans cette partie, une étude de sensibilité est réalisée sur les constantes c_1 et c_2 de la fenêtre temporelle afin de minimiser la dispersion des points de mesure autour de la courbe de calibration.

Pour une température T fixée, $N_s = 100$ signaux de phosphorescence sont enregistrés. Les constantes c_1 et c_2 de l'algorithme parcourent les intervalles $0.1 < c_1 < 1$ et $4 < c_2 < 8$. Pour chaque combinaison (c_1, c_2) , l'ensemble des N_s signaux de phosphorescence sont utilisés pour en déduire les temps de vie correspondants. Les résultats de l'analyse de sensibilité réalisée à la température $T = 700$ K sont présentés à la figure 6. La valeur moyenne $\bar{\tau}$ (en haut) et l'écart type adimensionné $\tau_{rms}/\bar{\tau}$ (en bas) sont déduits des N_s durées de vie calculées à partir du signal pour chaque couple (c_1, c_2) . La valeur moyenne $\bar{\tau}$ et le taux de fluctuation $\tau_{rms}/\bar{\tau}$ dépendent chacun fortement des valeurs retenues pour les constantes c_1 et c_2 de la fenêtre. La dispersion des durées de vie déduites du signal de phosphorescence peut donc être largement réduite en identifiant une combinaison (c_1, c_2) qui minimise le rapport $\tau_{rms}/\bar{\tau}$. La durée de vie n'étant qu'une grandeur intermédiaire entre la phase de calibration et la mesure, sa valeur moyenne $\bar{\tau}$ ne revêt pas d'importance tant que les mêmes constantes de la fenêtre sont retenues pour les mesures et la phase de calibration. Les valeurs recommandées par Brübach *et al.* [16] sont $c_1 = 1$ et $c_2 = 4$, ce qui donne à la figure 6(b) une fluctuation relative de la durée de vie de 6%. Pour le dispositif expérimental

Table 2: Mesure de la fluctuation de la durée de vie τ_{rms} aux températures $T = 300$ K et $T = 700$ K pour différentes valeurs de température et de résistance de charge R . Estimation de la dispersion correspondante en température T_{rms} .

Résistance [Ω]	Température [K]	$\tau_{rms}/\bar{\tau}$	$\alpha = \partial \log(\tau)/\partial T$ [K^{-1}]	T_{rms} [K]
500	700	0.016	$-1.1e^{-2}$	0.63
500	300	0.03	$-2.7e^{-3}$	4.8
13 600	300	0.005	$-2.7e^{-3}$	0.8

utilisé dans cette étude, la combinaison $c_1 = 0.4$ et $c_2 = 8$ retenue permet de réduire les fluctuations relatives de la durée de vie à 1.6% pour la température $T = 700$ K.

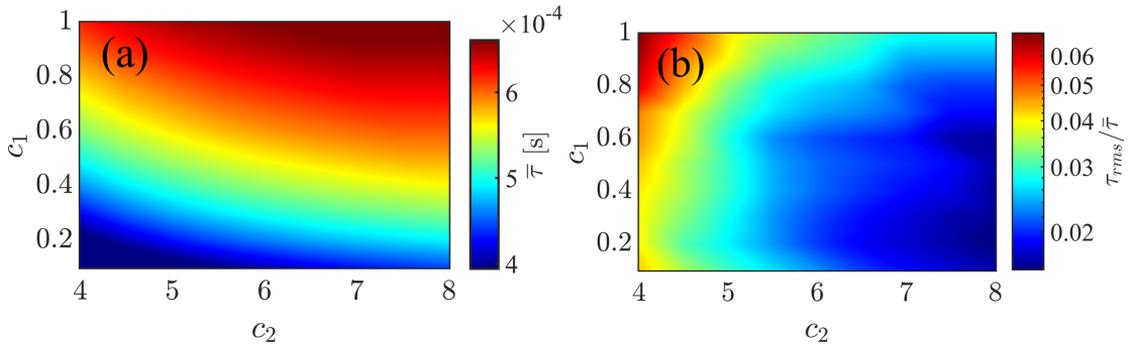


Figure 6: Représentation de la dispersion $\tau_{rms}/\bar{\tau}$ des temps de décroissances τ calculés sur 100 signaux de luminescences mesurés à $T = 300$ K en fonction des paramètres c_1 et c_2 de l’algorithme de Brübach *et al.* [9].

En utilisant la courbe de calibration de la figure 4, la pente de coefficient $\alpha = \partial \log(\tau) / \partial T$ permet de déduire la fluctuation de température T_{rms} associée à la dispersion de la durée de vie mesurée. On trouve $T_{rms} = (\alpha \log(10))^{-1} (\tau_{rms} / \bar{\tau}) = 0.63$ K. Le tableau Tab. 2 reporte les résultats des analyses de sensibilité réalisées pour deux valeurs de températures $T = 300$ K et $T = 700$ K. La très faible dispersion des données obtenues à $T = 700$ K est à la fois due à une faible fluctuation de la durées de vie τ_{rms} du signal, mais également à la forte pente α de la courbe de calibration. A la température $T = 300$ K, la valeur plus faible de la pente α induit une plus grande dispersion de la température $T_{rms} = 4.8$ K. Le gain en précision lorsqu’on augmente la résistance de charge à $R = 13.6$ k Ω pour les plus faibles températures (section 2) est également indiqué dans le tableau Tab. 2. Ces résultats confirment la très faible dispersion des mesures de température $T_{rms} < 1$ K grâce à l’augmentation du rapport du signal sur bruit.

4 Conclusion

La thermographie de luminophore est un diagnostic très performant pour mesurer avec précision les températures de surface sur une très large gamme de mesures. Dans ce travail, des améliorations ont été apportées au dispositif développé par Guiberti *et al.* [13]. La chaîne de détection et d’acquisition a été optimisée pour détecter des signaux très brefs associés à la phosphorescence de luminophores portés à des températures élevées $T > 800$ K. Une méthode d’échantillonnage adaptatif en temps réel a été implémentée et une analyse de sensibilité a permis de considérablement réduire la dispersion des mesures lors du post-traitement des données. L’ensemble de ces améliorations conduit à un dispositif permettant de mesurer des températures de 300 K à 1050 K à coût réduit avec une précision de l’ordre de $T_{rms} = 1$ K. Ces résultats ont été obtenus en n’utilisant qu’un seul type de luminophore, le $Mg_{3,5}FGeO_5:Mn$ et en cherchant à minimiser le temps de manipulation. D’autres luminophores sont en cours de test avec le même dispositif pour accéder à des températures supérieures à $T > 1050$ K.

References

- [1] P. Schmitt, T. Poinso, B. Schuermans, and K. P. Geigle. Large-eddy simulation and experimental study of heat transfer, nitric oxide emissions and combustion instability in a swirled turbulent high-pressure burner. *Journal of Fluid Mechanics*, 570:17–46, 2007.
- [2] Thibault F Guiberti, Daniel Durox, Philippe Scoufflaire, and Thierry Schuller. Impact of heat loss and hydrogen enrichment on the shape of confined swirling flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(2):1385–1392, 2015.

- [3] Luis Tay-Wo-Chong, Mathieu Zellhuber, Thomas Komarek, Hong G Im, and Wolfgang Polifke. Combined influence of strain and heat loss on turbulent premixed flame stabilization. *Flow, Turbulence and Combustion*, 97(1):263–294, 2016.
- [4] Arthur Henry Lefebvre. Fuel effects on gas turbine combustion-liner temperature, pattern factor, and pollutant emissions. *Journal of Aircraft*, 21(11):887–898, 1984.
- [5] A Degeneve, P Jourdain, C Mirat, J Caudal, R Vicquelin, and T Schuller. Analysis of wall temperature and heat flux distributions in a swirled combustor powered by a methane-air and a co2-diluted oxyflame. *Fuel*, in revision, 2018.
- [6] R Mercier, TF Guiberti, A Chatelier, D Durox, O Gicquel, N Darabiha, T Schuller, and B Fiorina. Experimental and numerical investigation of the influence of thermal boundary conditions on premixed swirling flame stabilization. *Combustion and Flame*, 171:42–58, 2016.
- [7] Chai Koren, Ronan Vicquelin, and Olivier Gicquel. High-fidelity multiphysics simulation of a confined premixed swirling flame combining large-eddy simulation, wall heat conduction and radiative energy transfer. In *ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, GT2017-64844*, 2017.
- [8] SW Allison and GT Gillies. Remote thermometry with thermographic phosphors: Instrumentation and applications. *Review of Scientific Instruments*, 68(7):2615–2650, 1997.
- [9] Jan Brübach, Christian Pflitsch, Andreas Dreizler, and Burak Atakan. On surface temperature measurements with thermographic phosphors: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(1):37–60, 2013.
- [10] Lee C Bradley III. A temperature-sensitive phosphor used to measure surface temperatures in aerodynamics. *Review of Scientific Instruments*, 24(3):219–220, 1953.
- [11] C Lempereur, R Andral, and JY Prudhomme. Surface temperature measurement on engine components by means of irreversible thermal coatings. *Measurement Science and Technology*, 19(10):105501, 2008.
- [12] Zhiyao Yin, Patrick Nau, and Wolfgang Meier. Responses of combustor surface temperature to flame shape transitions in a turbulent bi-stable swirl flame. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82:50–57, 2017.
- [13] TF Guiberti, P Scoufflaire, and T Schuller. La phosphorescence induite par laser pour la mesure de température des surfaces d’une chambre de combustion. 14ème Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2014, 15-19 Septembre 2014, Marseille, France.
- [14] Christoph Knappe, Martin Algotsson, Peter Andersson, Mattias Richter, Martin Tunér, Bengt Johansson, and Marcus Aldén. Thickness dependent variations in surface phosphor thermometry during transient combustion in an hcci engine. *Combustion and Flame*, 160(8):1466–1475, 2013.
- [15] Pradip Xavier, Laurent Selle, Gorkem Oztarlik, and Thierry Poinso. Phosphor thermometry on a rotating flame holder for combustion applications. *Experiments in Fluids*, 59(2):33, 2018.
- [16] J Brübach, J Janicka, and A Dreizler. An algorithm for the characterisation of multi-exponential decay curves. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(1):75–79, 2009.
- [17] T Kissel, J Brübach, M Euler, M Frotscher, C Litterscheid, B Albert, and A Dreizler. Phosphor thermometry: On the synthesis and characterisation of y3a15o12: Eu (yag: Eu) and yalo3: Eu (yap: Eu). *Materials Chemistry and Physics*, 140(2-3):435–440, 2013.
- [18] Paul Jourdain, Clément Mirat, Jean Caudal, Amath Lo, and Thierry Schuller. A comparison between the stabilization of premixed swirling co 2-diluted methane oxy-flames and methane/air flames. *Fuel*, 201:156–164, 2017.
- [19] DR Clarke and MM Gentleman. Luminescence sensing of temperatures in thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(4-7):681–687, 2007.
- [20] Thibault Guiberti. *Analysis of the topology of premixed swirl-stabilized confined flames*. PhD thesis, Ecole Centrale Paris, 2015.