

Fluorescence induite par laser à trois couleurs appliquée à la mesure de température de gouttes dans les sprays

Alexandre LABERGUE^{1*}, Alain DELCONTE¹, Fabrice LEMOINE¹

¹LEMETA, Nancy-Université, CNRS

2 Avenue de la Forêt de Haye

BP160

54504 Vandoeuvre les Nancy

* (auteur correspondant : alexandre.labergue@ensem.inpl-nancy.fr)

Résumé - L'objet de ce travail est de présenter les développements récents de la Fluorescence induite par laser (LIF) pour la mesure de températures de gouttes dans les sprays. La technique de LIF deux couleurs a été validée au LEMETA dans le cas de gouttes individuelles monodispersées. Ici, nous proposons d'étendre la technique pour les sprays. Nous allons d'abord montrer comment nous avons du modifier le modèle à deux couleurs en tenant compte de l'environnement spray. Ensuite, ce modèle a été validé et appliqué à des mesures de température en milieu saturé puis à l'atmosphère ambiante.

Nomenclature

I_f	intensité du signal de fluorescence, <i>U.A.</i>	K_{opt}	constante optique
V_c	volume de mesure, m^3	K_{spec}	constante spectroscopique
I_o	intensité du laser incident, <i>U.A.</i>	T	température absolue, °C
C	concentration du traceur, <i>mol/L</i>	T_i	température d'injection, °C
a_i, b_i	coefficient de sensibilité en température, °K	T_o	température de référence, °C
λ	longueur d'onde, <i>nm</i>	D_{10}	diamètre moyen des gouttes, μm

1. Introduction

La connaissance des échanges de masse et de chaleur dans les sprays est fondamentale pour la compréhension des phénomènes de vaporisation de la phase liquide. Ces transferts de chaleur et de masse sont fortement liés à la température de la phase liquide, à la distribution en taille des gouttes et à la densité du spray. Pour accéder à ces paramètres, des méthodes non intrusives sont nécessaires. Les techniques optiques sont donc particulièrement bien adaptées. Des mesures par Anémométrie Phase Doppler (PDA) permettent d'accéder à la vitesse, taille des gouttes mais aussi au flux massique[1-2]. Concernant la température des gouttes, on peut citer la technique de l'arc en ciel global introduite par Van Beeck [3].

L'objet du présent article est de décrire les développements récemment menés au LEMETA pour les mesures de température par Fluorescence Induite par Laser (LIF) dans les sprays. Le principe de la LIF consiste à exciter un traceur, préalablement dilué dans le liquide étudié, afin d'induire un signal de fluorescence. L'intensité de ce signal dépend de la température entre autre, mais également de la concentration du traceur, du volume de mesure ou de l'intensité de l'excitation locale. Afin de ne conserver que l'information en température, un rapport des intensités est calculé en mesurant le signal de fluorescence sur deux bandes spectrales soigneusement sélectionnées. Ce procédé a été utilisé et amplement validé dans le cas de gouttes individuelles monodispersées (LIF deux couleurs). L'idée ici est donc d'utiliser l'expérience acquise avec le jet monodisperse pour l'adapter aux sprays. L'environnement particulier des sprays (grande polydispersion en diamètre et présence de gouttelettes sur le

chemin optique) est en effet susceptible de modifier le signal de fluorescence collecté et donc d'induire un biais dans les températures mesurées.

Dans une première partie, nous allons décrire et rappeler sommairement le principe de la LIF deux couleurs. Puis, nous allons montrer comment le modèle deux couleurs a été modifié afin de l'utiliser pour les mesures dans le spray. La troisième partie est dédiée au dispositif expérimental et dans une dernière partie, quelques résultats validant le nouveau modèle seront présentés.

2. Principe de la mesure de température de gouttes par LIF

2.1. Modélisation de la LIF à deux couleurs

Nous rappelons ici le modèle développé pour les mesures de LIF dans le cas d'un jet monodisperse. Une description plus précise et complète se trouvent dans les papiers [4] et [5]. Le liquide étudié ici est de l'eau dans laquelle est dilué le traceur (Sulforhodamine B) à très faible concentration ($5 \cdot 10^{-6}$ mol/l). La fluorescence est ensuite induite par un laser à argon ($\lambda = 514.5$ nm). Le spectre de la fluorescence se présente sous la forme d'une large bande spectrale et dépend de la température (Figure 1). Ainsi, il a été montré [4] que l'intensité de la fluorescence sur une bande spectrale i peut s'écrire :

$$I_{f_i} = K_{opt,i} K_{spec,i} V_c I_o C g_i f_i(T) \quad (1)$$

avec K_{opt} et K_{spec} des constantes caractérisant respectivement la chaîne optique et les propriétés spectroscopique du traceur, I_o l'intensité d'excitation du laser, V_c le volume de mesure et T la température absolue.

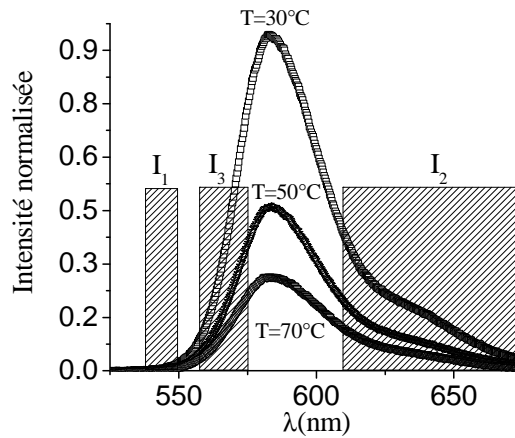


Figure 1 : Spectres de la fluorescence pour trois températures en fonction de la longueur d'onde puis position des bandes spectrales choisies pour les mesures de LIF

$f_i(T)$ est une fonction qui caractérise la dépendance en température de la fluorescence et qui dépend de la bande spectrale choisie. Cette fonction peut se mettre sous la forme [5]:

$$f_i(T) \approx e^{\frac{a_i + b_i}{T^2 + T}} \quad (2)$$

Les constantes a_i et b_i décrivent la sensibilité en température sur la bande spectrale i . En mesurant le signal de fluorescence simultanément sur deux bandes spectrales (I_1 et I_2 dont les sensibilités en température sont différentes), on peut alors calculer un rapport des deux intensités :

$$R_{12} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{K_{opt,1} K_{spec,1} f_1(T)}{K_{opt,2} K_{spec,2} f_2(T)} = \frac{K_{opt,1} K_{spec,1}}{K_{opt,2} K_{spec,2}} \cdot e^{\frac{a_1 - a_2 + b_1 - b_2}{T^2 + T}} \quad (3)$$

Ainsi, la mesure est indépendante des paramètres inconnus tel que C , I_o et V_c . Les bandes 1 et 2 sont optimisées de manière à avoir une différence de sensibilité en température la plus grande possible. La détermination de la valeur des constantes a_i et b_i est réalisée en effectuant un étalonnage en cuve dans laquelle la température est contrôlée. La mesure d'un rapport de référence R_{120} , où la température est connue, permet d'éliminer les constantes K_{opt} et K_{spec} .

2.2. Application au spray

Dans le cas du jet monodisperse, les gouttes en un point du jet ont toutes la même histoire : taille, vitesse et température. Le rapport R_{12} est donc constant. Par contre dans un spray, la concentration, la distribution en taille et vitesse des gouttes varient dans l'espace et dépendent des conditions d'injection du liquide. Par exemple, la Figure 2 décrit l'évolution du rapport R_{12} (moyenné sur 15 000 gouttes) en fonction de la pression d'injection du liquide. Le rapport est mesuré en un point dans des conditions quasi-isothermes. Nous voyons alors que R_{12} varie avec la pression d'injection alors que la température est quasi-constante. D'autre part, ce rapport diffère de celui mesuré en cuve à la même température.

La modification de la pression d'injection revient en fait à modifier la distribution granulométrique des gouttes. Ainsi, nous avons réalisé une série d'expériences où nous avons fait varier le diamètre moyen D_{10} des gouttes dans le spray en utilisant une série d'injecteurs appropriés et relevé simultanément la valeur du rapport R_{12} (Figure 3). Cette courbe montre bien la dépendance de R_{12} en fonction du diamètre moyen D_{10} des gouttes. Par ailleurs, il semblerait que plus les gouttes sont grosses, plus R_{12} tend vers la valeur trouvée en cuve.

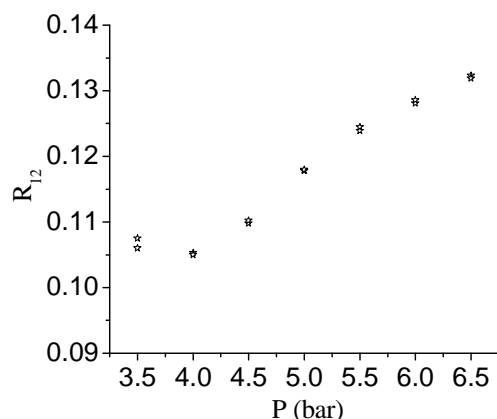


Figure 2 : Evolution des rapports R_{12} en fonction de la pression d'injection

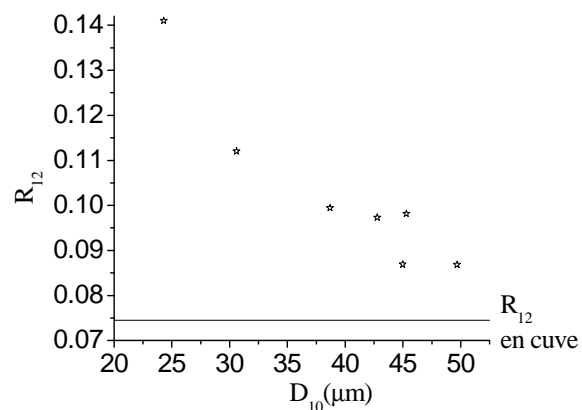


Figure 3 : Evolution des rapports R_{12} en fonction du diamètre moyen des gouttes dans un spray

Enfin, notons que la traversé du nuage de gouttes par le signal de fluorescence doit conduire à une diffusion de cette lumière, phénomène dépendant de la longueur d'onde. Ainsi, le spectre de fluorescence détecté pourrait être différent du spectre émis par les gouttes, ce qui induirait un biais sur la mesure de la température. Un spray a été intercalé entre des gouttes monodispersées et le détecteur. La fluorescence a été induite sur les gouttes monodispersées. La présence du spray ne semble pas modifier le rapport de fluorescence R_{12} ce qui permet de conclure la faible influence du phénomène de diffusion.

Par conséquent, il est évident que la seule information de R_{12} n'est pas suffisante pour déterminer la température. Il est donc nécessaire de modifier la technique deux couleurs pour tenir compte de la polydispersion en taille.

2.3. Adaptation du modèle à deux couleurs pour le spray : LIF à trois couleurs

D'après les résultats précédents, nous devons modifier l'équation (1). Une fonction g_i qui caractérise l'effet de la taille des gouttes sur le signal de fluorescence est introduite. L'équation (1) devient alors :

$$I_{f_i} = K_{opt,i} K_{spec,i} V_c I_o C g_i f_i(T) \quad (4)$$

De la même façon, on peut calculer un rapport R_{ij} :

$$R_{ij} = \frac{K_{opt,i} K_{spec,i} g_i f_i(T)}{K_{opt,j} K_{spec,j} g_j f_j(T)} \quad (5)$$

L'équation (5) fait apparaître une nouvelle inconnue qui est le rapport des fonctions g_i . La stratégie adoptée ici consiste à mesurer l'intensité de la fluorescence sur une troisième bande spectrale (bande 3 sur la Figure 1) et de calculer ainsi deux rapports : R_{12} et R_{32} . Cette troisième bande est choisie de telle façon que R_{32} soit peu sensible à la température mais de sensibilité maximale à l'effet de la taille de gouttes. L'utilisation d'une référence faite en cuve (R_{120} , R_{230} , T_0 et avec $g_0 = 1$) permet de s'affranchir à nouveau des constantes K_{opt} et K_{spec} .

$$\frac{R_{ij}}{R_{ij_0}} = \frac{f_j(T_0) f_i(T)}{f_i(T_0) f_j(T)} g_{ij} = \frac{f_{ij}(T)}{f_{ij}(T_0)} g_{ij} \quad (6)$$

Il est possible de déterminer une fois pour toute l'effet de la distribution en taille des gouttes sur le rapport de fluorescence en déterminant les fonction g_{12} et g_{32} dans des conditions isothermes ($T=T_0$). Pour cela, la pression d'injection est modifiée et les rapports correspondant R_{12} et R_{32} sont mesurés à proximité de l'injecteur en même temps que la température T_0 à l'aide d'un thermocouple placé dans le corps de l'injecteur. On peut écrire :

$$g_{12} = \frac{R_{12}}{R_{12_0}} \text{ et } g_{32} = \frac{R_{32}}{R_{32_0}} \quad (7)$$

En traçant l'évolution de g_{12} en fonction de g_{32} pour chaque valeur de pression, il est possible d'obtenir une équation empirique liant g_{12} et g_{32} (Figure 4):

$$g_{12} = A g_{32}^2 + B g_{32} + C \quad (8)$$

L'équation (8) est réinjectée dans (6) qui devient une équation du quatrième degré en T :

$$\frac{R_{12}}{R_{12_0}} \frac{f_{12}(T_0)}{f_{12}(T)} = A \left[\frac{R_{32}}{R_{32_0}} \frac{f_{32}(T_0)}{f_{32}(T)} \right]^2 + B \frac{R_{32}}{R_{32_0}} \frac{f_{32}(T_0)}{f_{32}(T)} + C \quad (9)$$

Les fonctions f_{12} et f_{32} étant connue par étalonnage. La résolution de (6) pour obtenir T se fait numériquement.

3. Dispositif expérimental

La Figure 5 décrit schématiquement le dispositif expérimental du spray. Le spray est obtenu à l'aide d'un injecteur Danfos®. L'axe Z est orienté verticalement dans le sens de propagation du spray. Les axes X et Y sont les axes transverses et l'origine 0 est prise à la sortie de l'injecteur. La pression à l'injection peut varier jusqu'à 6,5 bars environ ($\pm 0,1$ bar). La fluorescence est induite par deux faisceaux laser (laser à argon, $\lambda = 514.5$ nm) qui se croisent dans le spray pour former le volume de mesure V_c (système LDA). Le volume V_c a une longueur de 2003 μm , un diamètre de 146 μm et une hauteur de 146 μm suivant X, Y et Z respectivement. Le signal est ensuite collecté par un doublet achromatique couplé à une fibre optique. Ce signal est décomposé sur les trois bandes spectrales à l'aide de lames de séparation et filtres interférentiels. Trois photomultiplicateurs équipés d'amplificateurs

convertissent le signal lumineux en signal électrique avant d'être digitalisé (carte 12 bits, 10 MHz). Un logiciel d'acquisition permet de contrôler les paramètres d'acquisition du signal (temps d'acquisition ou nombre d'échantillons) et de post-traiter les données (calculs des rapports et de la température). Typiquement, les mesures sont effectuées sur 15 000 gouttes.

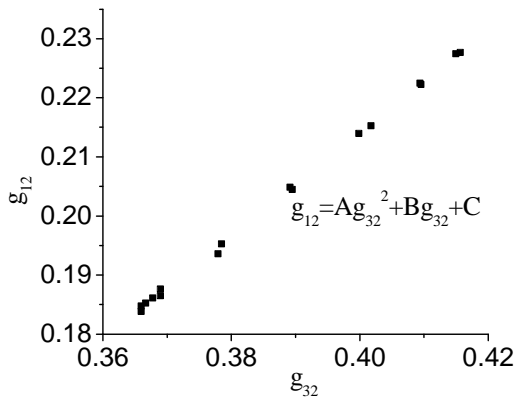


Figure 4 : Calibration dynamique

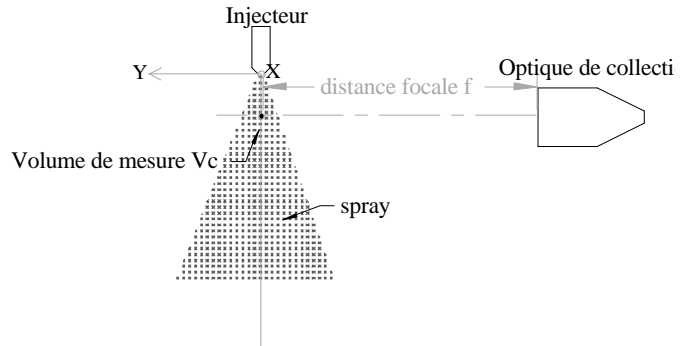


Figure 5 : Configuration expérimentale

4. Validation du modèle

Une première série de tests a consisté à effectuer des mesures en milieu saturé en vapeur d'eau et à température constante. L'injecteur est inséré dans une enceinte équipée de fentes latérales pour laisser passer les faisceaux laser (Figure 6). Au fond se trouve une résistance chauffante baignée d'eau pour créer la vapeur d'eau. La température du liquide à l'injection est contrôlée. Des thermocouples permettent le contrôle de la température de l'air ce qui permet d'avoir une température constante dans l'enceinte. Ainsi, il est possible d'obtenir des conditions de saturation en vapeur d'eau. L'évaporation des gouttes ainsi que les transferts thermique par convection forcée sont alors bloqués. La Figure 7 montre une faible variation de la température le long de l'axe Z, soit une baisse de 2°C sur 90 mm environ (symboles ★) pour une température d'injection $T_{inj} = 50^\circ\text{C}$. Cette baisse est associée à une baisse de T_{inj} pendant la durée de la mesure. En effet, la différence $T - T_{inj}$ varie de $\pm 2^\circ\text{C}$ (Δ). Les mêmes mesures (avec toujours $T_{inj} = 50^\circ\text{C}$) réalisées à l'air libre (\bullet) montrent au contraire une nette décroissance de la température. Ces premiers résultats permettent déjà de valider le modèle.

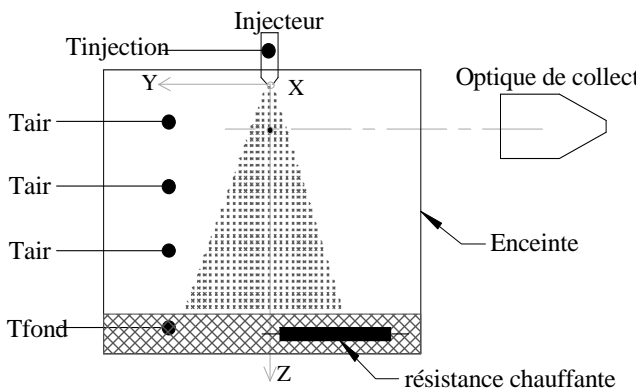


Figure 6 : Configuration expérimental en milieu saturé

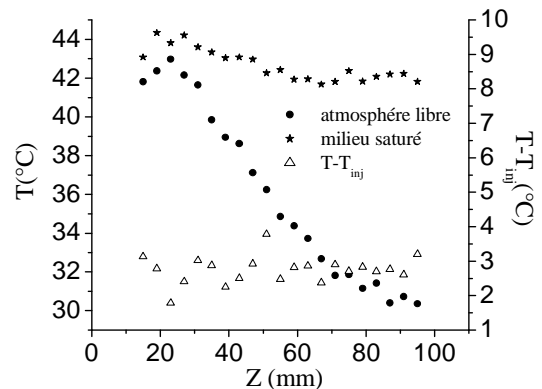


Figure 7: Evolution de la température axiale en milieu saturé et atmosphère libre

D'autres mesures ont été conduites à l'air libre comme précédemment mais à deux autres températures d'injection du liquide ($T_{inj} = 33,2$ et 59°C sur la Figure 8). On observe à une

décroissance de la température du fait maintenant de l'évaporation et du transfert par convection forcée. D'autre part, on peut noter que les gouttes se refroidissent plus lorsque T_{inj} est plus grande. Enfin, la Figure 9 décrivent l'évolution de la température le long des axes X et Y à $Z = 40$ mm pour $T_{inj} = 59^\circ\text{C}$. Les courbes montrent que les gouttes sont plus froides aux bords du spray et une assez bonne symétrie du spray.

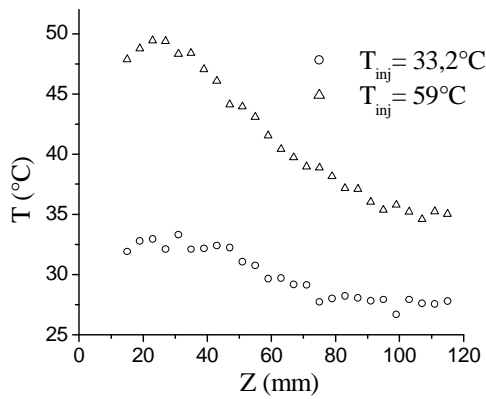


Figure 8 : Evolution de la température le long de l'axe principal Z du spray pour deux températures d'injection

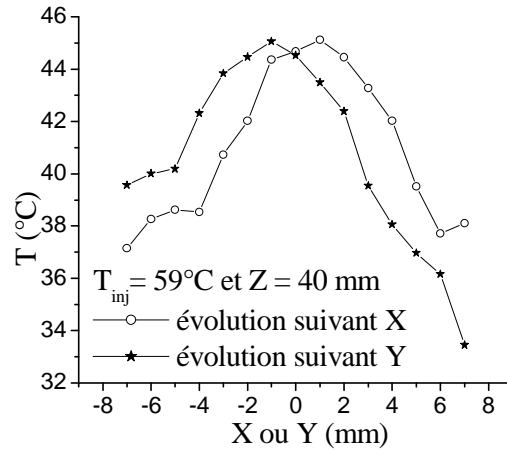


Figure 9 : Evolution radiale de la température à une distance de $Z = 40$ mm de l'injecteur pour une température d'injection de 59°C

5. Conclusion

Ce travail a présenté les derniers développements réalisés au LEMTA pour la mesure de température de gouttes dans les sprays en utilisant la méthode de Fluorescence induite par laser, technique initialement développée pour le cas de gouttes monodisperses. Nous avons d'abord montré les modifications apportées au modèle initial en introduisant une fonction qui prend en compte de la distribution en taille des gouttes. Des mesures élémentaires ont ainsi démontré l'impact de la taille des gouttes. Puis une série de mesures de températures dans le spray pour plusieurs température d'injection, en situation de transferts thermiques contrôlés, ont permis de valider le nouveau modèle. Des calculs numériques actuellement en cours permettront d'expliquer physiquement l'influence de la taille des gouttes. D'autre part, des tests de couplage de mesures LIF/ PDA (Anémométrie Dynamique de Particule) sont en préparation afin de mesurer des corrélations de tailles de particules/températures.

Références

- [1] Damaschke et al., Optical particle sizing in backscatter, *Appl. Opt.*, 41 (2002), 5713-5727.
- [2] Tropea et al., Dual mode Phase Doppler Anemometer, *Part. Syst. Charact.*, 13 (1996) 165-170.
- [3] Van Beeck et al., Global Rainbow thermometry for average temperature measurements of spray droplets, 23-5, *10th Intl. Symp. On the Appl of Laser Techniques to Fluid Mechanic*. Lisbon, Portugal, 2000.
- [4] Castanet et al., Measurement of the temperature distribution within monodisperse combusting droplets in linear stream using two colors laser induced fluorescence, *Exp. In Fluids*, 35 (2003), 563-571.
- [5] Lavielle et al., Evaporating and combusting droplet temperature measurement using two-color laser-induced fluorescence, *Exp. In Fluids*, 31 (2001), 45-55.