HAL
open science

Etude du transfert de chaleur entre deux sprays anisothermes par mesures couplées de LIF et phase Doppler

Alexandre Labergue, Alain Delconte, Fabrice Lemoine

To cite this version:

Alexandre Labergue, Alain Delconte, Fabrice Lemoine. Etude du transfert de chaleur entre deux sprays anisothermes par mesures couplées de LIF et phase Doppler. Congrès Français de Thermique SFT, Société Française Thermique, May 2013, Gérardmer, France. hal-01446744

HAL Id: hal-01446744

https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01446744v1

Submitted on 26 Jan 2017

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.

Etude du transfert de chaleur entre deux sprays anisothermes par mesures couplées de LIF et phase Doppler

Alexandre LABERGUE[1*], Alain DELCONTE[1], Fabrice LEMOINE[1]

[1]Laboratoire d'Energétique et Mécanique Théorique et Appliqué
2 avenue de la Forêt de Haye – TSA 60604
54518 VANDOEUVRE CEDEX
[*](auteur correspondant : alexandre.labergue@univ-lorraine.fr)

Résumé - Ce travail expérimental étudie le transfert de chaleur entre les gouttes d'eau issues de deux sprays se mélangeant. Un spray est injecté à température ambiante alors que l'eau du second spray est préchauffée avant injection. Des mesures couplées de fluorescence induite par laser (LIF) et d'analyse phase Doppler (PDA) sont entreprises afin d'obtenir une température par classe de taille de gouttes. L'influence du débit injecté est étudiée et afin de mettre en évidence le transfert de chaleur, un seul des deux sprays est ensemencé en traceur fluorescent. Ainsi, seules les gouttes ensemencées sont détectées et il est donc possible de déterminer leur variation en température.

Nomenclature

I_f	Intensité de fluorescence, *u.a.*
K_{opt}	constante optique,
K_{opt}	constante spectroscopique,
C	concentration du traceur fluorescent, $mol.L^{-1}$
V_c	volume de collection, μm^3
I_o	intensité incidente du laser, *u.a.*
T	température des gouttes, K
D	diamètre des gouttes, μm^3
a et b	constante de sensibilité en température, K^2 *et* K
Symbole grec	
λ	longueur d'onde du laser, $m^2.s^{-1}$
Indices et exposants	
i	indexe de la bande spectrale
p	indexe de la classe de taille
inj	condition à l'injection

1. Introduction

Dans le contexte actuel, la caractérisation des échanges de chaleur et de masse dans les sprays polydisperses reste un challenge dans les applications industrielles comme les moteurs à combustion [1-2] ou le refroidissement de surfaces chaudes dans l'industrie sidérurgique [3-4]. En particulier, cette caractérisation nécessite de mesurer la température, la concentration et la taille des gouttes. Seules les mesures optiques permettent de remonter de manière non-intrusive à ces paramètres. La détermination de concentration ou du flux des gouttes est désormais précisément accessible à partir des mesures de phase Doppler [6] alors que la mesure de la température reste encore un défi expérimental. La thermométrie par réfractométrie d'arc-en-ciel global (GRT), qui est une extension de la thermométrie d'arc-en-ciel standard, permet d'obtenir à la fois la température et la distribution en gouttes mais de manière décorrélée [7-9]. Il existe également toute une série de techniques basée sur la fluorescence induite par laser [10-12] et qui fait l'objet de cette étude.

Ce papier traite donc de la fluorescence induite par laser multicouleur pour la mesure de température de gouttes dans les sprays. La fluorescence induite par laser à deux couleurs (2cLIF) est basée sur la mesure simultanée du signal de fluorescence sur deux bandes spectrales afin d'obtenir un rapport de fluorescence ne dépendant en théorie que de la température. Cette technique a été testée et validée dans le cas de gouttes monodisperses en combustions ou évaporations [13-14]. Toutefois, il a été montré que l'application direct de la

2cLIF aux sprays n'est pas envisageable [15]. Un effet, lié à la polydispersion en taille des gouttes et couplé à la profondeur de champ de l'optique employée pour la collection de la fluorescence, induit un biai dans la mesure du rapport. Une modification de la 2cLIF a donc été proposée conduisant à la fluorescence à trois couleurs (3cLIF).

2. Principe de la fluorescence induite par laser à trois couleurs

Les grandes lignes du principe de mesure de la température de gouttes est ici donnée. Une présentation complète se trouve dans des études antérieures [13;14]. Un traceur fluorescent et sensible à la température est préalablement dilué dans le liquide étudié. La solution ici est de l'eau ensemencée de sulforhodamine B à faible concentration ($C = 5.10^{-6}$ mo.L^{-1}). Ensuite, la fluorescence est générée par la raie verte d'un laser à argon ($\lambda = 514.5$ nm). Le spectre de la fluorescence se présente sous la forme d'une large bande spectrale et la fluorescence collectée sur une bande spectrale i peut s'écrire [13] :

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

avec K_{opt} et K_{spec} des constantes caractérisant respectivement la chaîne optique et les propriétés spectroscopiques du traceur, I_o l'intensité d'excitation du laser, V_c le volume de mesure et T la température absolue. La fonction $f_i(T)$ caractérise la dépendance en température de la fluorescence. Elle dépend de la bande spectrale choisie et peut se mettre sous la forme [14]:

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

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, d'intensité I_1 et I_2 dont les sensibilités en température sont différentes, on peut alors calculer un rapport des deux intensités :

$$R_{12} = \frac{I_{f1}}{I_{f2}} = \frac{K_{opt,1} K_{spec,1} f_1(T)}{K_{opt,2} K_{spec,2} f_2(T)} = \frac{K_{opt,1} K_{spec,1}}{K_{opt,2} K_{spec,2}} e^{\frac{a_{12}}{T^2}+\frac{b_{12}}{T}} \quad (3)$$

où a_{12} et b_{12} correspond respectivement à $a_1 - a_2$ et $b_1 - b_2$. Ce rapport dépend donc en théorie que de la température. Ici, les bandes spectrales de détection utilisées sont :

Band 1: [535 nm; 545 nm]

Band 2: [615 nm; 750 nm]

Une calibration en température, conduite avec le même protocol que dans [17], donne une sensibilité en température du rapport de l'ordre de 0.9%/°C. Enfin, la mesure d'un rapport de référence R_{120} réalisée dans une cuve à température connue T_0, permet d'éliminer les constantes K_{opt} et K_{spec} et d'obtenir ainsi un rapport de fluorescence normalisé :

$$\frac{R_{12}}{R_{12o}} = \frac{f_{12}(T)}{f_{12}(T_0)} \quad (4)$$

Cependant, des travaux récents ont mis en évidence l'influence de la taille des gouttes [15]. Plus précisément, le rapport normalisé a tendance à augmenter fortement pour les petites gouttes même pour des conditions isothermes. Cet effet non tenu en compte dans l'équation (1) a mené à introduire une fonction empirique $g_{12}(D)$ décrivant l'effet de la taille de la goutte. Le nouveau rapport normalisé devient donc [15]:

$$\frac{R_{12}}{R_{12o}} = \frac{f_{12}(T)}{f_{12}(T0)} g_{12}(D) \quad (5)$$

Pour déterminer cette nouvelle inconnue, $g_{12}(D)$, une troisième bande de détection est introduite ainsi qu'un second rapport de fluorescence normalisé:

$$\frac{R_{32}}{R_{32o}} = \frac{f_{32}(T)}{f_{32}(T_o)} g_{32}(D) \quad (6)$$

Ces deux rapports ayant une sensibilité en taille différente, il est alors possible de

déterminer empiriquement une relation liant les fonctions $g_{12}(D)$ et $g_{32}(D)$ en mesurant, à température constante, les deux rapports normalisés pour plusieurs taille de gouttes. L'évolution des deux rapports peuvent s'écrire sous la forme d'un polynôme du second ordre:

$$g_{12} = \alpha {g_{32}}^2 + \beta g_{32} + \gamma \quad (7)$$

Enfin, en combinant les équations (5), (6) et (7), une équation du second ordre dépendant uniquement de la température est obtenue:

$$\frac{R_{12}}{R_{12o}} \frac{f_{12}(T)}{f_{12}(T_o)} = \alpha \left[\frac{f_{32}(T_o)}{f_{32}(T)} \frac{R_{32}}{R_{32o}}\right]^2 + \beta \left[\frac{f_{32}(T_o)}{f_{32}(T)} \frac{R_{32}}{R_{32o}}\right] + \gamma \quad (8)$$

Cette équation peut alors être résolue pour déterminer la température à partir de la mesure des deux rapports de fluorescence R_{12} et R_{32}.

3. Applications au mélange de deux sprays anisothermes

3.1 Dispositif expérimental et caractéristiques des sprays

L'étude porte sur l'utilisation de deux sprays pleins coniques générés par des injecteurs (Danfoss®) utilisés usuellement comme bruleurs dans les chaudières à fioul. Le liquide employé ici est de l'eau. Les deux sprays différents par leurs débits de fonctionnement mais aussi par la nature de la granulométrie pour une même pression d'injection. Par ailleurs, l'eau d'un des deux sprays, noté spray (1), peut être préchauffée alors que l'eau du second, noté spray (2), est maintenue à température ambiante. Les deux sprays sont injectés vers le bas avec un angle de 10° par rapport à la verticale, axe *Z* de la *Fig. 1*. L'origine du repère *X-Y-Z* est prise au point de rencontres des côtés internent des deux sprays.

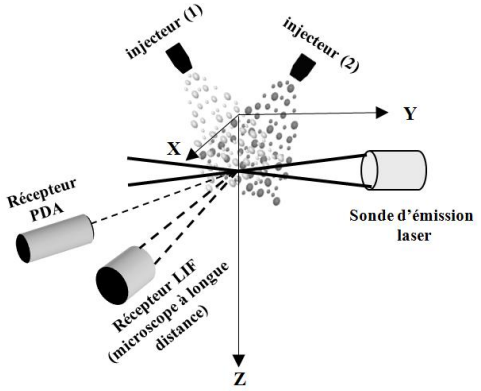

Figure 1 : *Configuration expérimental des sprays et des dispositifs de mesure par LIF et PDA.*

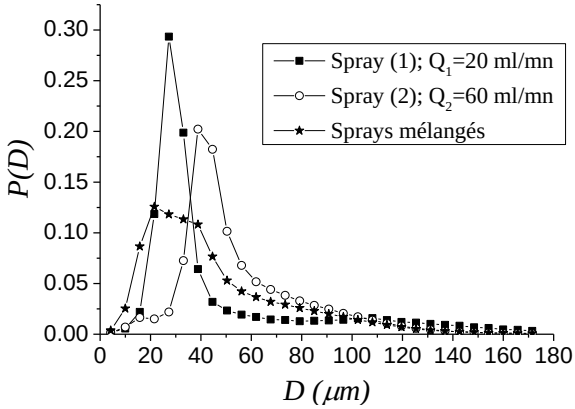

Figure 2 : *distribution en taille des sprays seuls ou mélangés.*

La vitesse verticale (selon *Z*) et le diamètre des gouttes sont obtenus avec un anémomètre à phase Doppler (PDA) commercialisé par la société Dantec Dynamic®. Le volume de détection est généré par une sonde de transmission de type LDA (Dantec Dynamic Fiber-Flow® probe) équipée d'une lentille frontale de focal 310 mm. La source laser est un laser à argon (λ = 514.5 nm). Le système comprend une optique de réception classique (lentille frontale de 500 mm) et un processeur de signaux P80. L'optique de réception fait un angle de 45° avec la direction des faisceaux pour des mesures en diffraction. Cette configuration du PDA permet des mesures de diamètres maximum jusque 175 µm. *La Fig. 2* donne des exemples de distribution quand le spray (1) est injecté seul avec Q_1 = 20 ml/min, quand le spray (2) est injecté seul avec Q_2 = 60 ml/min et quand les deux sprays sont injectés en même temps. Les distributions individuelles des deux sprays sont bien différentes puisque les pics se

détachent nettement. D'autre part, le diamètre moyen D_{10} pour le spray (1) seul, le spray (2) seul et les deux sprays mélangés sont respectivement 60, 39 et 41 µm.

3.2 Couplage des mesures LIF avec celles de phase Doppler

La fluorescence est générée en utilisant le même volume de détection que le PDA et est collectée perpendiculairement aux faisceaux à l'aide d'un microscope à longue distance (QM-100 ; Questar®) à une distance de travail de 300 mm (*Fig. 3*). Ce microscope permet d'atténuer l'effet de la profondeur de champ [16]. La fluorescence est ensuite guidée avec une fibre optique connectée à un filtre passe haut (Chroma®, HQ 522 LP) pour éliminer la lumière verte du laser incident. Le signal de fluorescence est ensuite réparti sur les trois bandes spectrales (cf section 2.) à l'aide de dichroïques et filtres interférentiels (*Fig. 3*). Enfin, des photomultiplicateurs détectent la fluorescence avant d'être digitalisée par une carte d'acquisition à 5 MHz pour un traitement en temps réel.

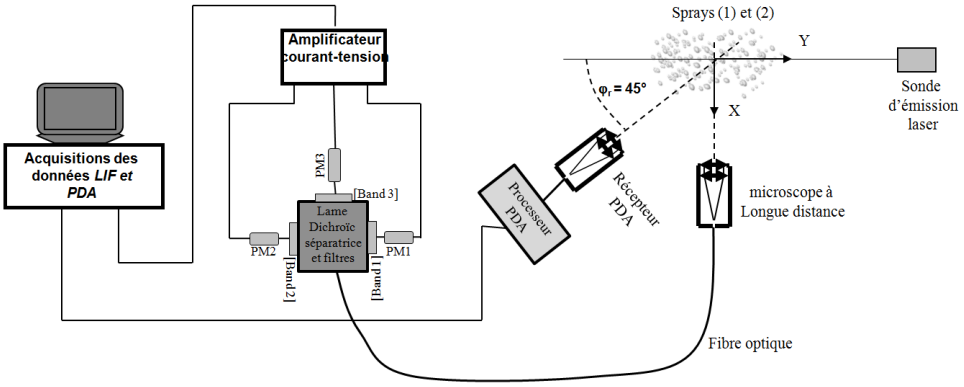

Figure 3 : *Chaines de mesure pour les mesures couplées de LIF et PDA.*

Un seuil de détection de la fluorescence situé juste au-dessus du bruit est employé pour détecter le passage d'une goutte. Une goutte est validée si elle est au moins décrite par 10 points successifs au dessus du seuil. Ainsi, les deux rapports de fluorescence R_{12} et R_{32} sont calculés comme suit:

$$R_{ij} = \frac{I_{fi}}{I_{fj}} = \frac{\sum_{k=1}^{n} I_{fi,k-N_i}}{\sum_{k=1}^{n} I_{fj,k-N_j}} \tag{9}$$

où $I_{fi,k}$ et $I_{fj,k}$ sont respectivement les intensités fluorescentes détectées sur les bandes spectrales i et j et intégrées sur la goutte k traversant le volume de détection. n étant le nombre de gouttes détectées durant l'acquisition puis N_i et N_j les bruits moyens mesurés sur les bandes spectrales correspondantes. La *Fig. 3* présente également la disposition spatiale des deux optiques de réception et les chaines de mesures pour les mesures couplées de LIF et PDA. Le principe complet du couplage est détaillé dans l'étude [3]. Le couplage des deux techniques donne deux fichiers issus de la LIF et du PDA mais enregistrés avec la même base de temps. La détermination de gouttes détectées simultanément par la LIF et le PDA est basée sur leur temps d'arrivé et de transit dans le volume de mesure commun aux deux techniques. Ensuite, le nombre de classe de taille est fixé puis les intensités fluorescentes sur les trois bandes spectrales sont calculées suivant l'*eqn.* (9). Par conséquent, un rapport de fluorescence moyen est obtenu par classe de taille. Toutefois, la détermination de la gamme de taille de gouttes communes et détectables par les deux techniques constitue un point important. En effet, l'amplitude du signal détecté par le PDA au passage d'une goutte dans le volume de mesure est proportionnelle à D^2 alors que dans le cas de la LIF il a été démontré qu'elle était de l'ordre de $D^{2.8}$ [16]. Ainsi, seulement un intervalle [D_{max} ;D_{min}] de la distribution en taille des

sprays peuvent être communément détectée par les deux techniques. En suivant la méthode décrite dans [16] on trouve ici D_{min} = 20 µm et D_{max} = 110 µm.

4. Etude du mélange de deux sprays

4.1 Température moyenne

Les expériences présentées ci-après ont toutes été conduites en fixant le point de fonctionnement du spray (1) à savoir le débit Q_1 = 20 ml/min et la température d'injection de l'eau T_{inj1} = 60 °C. Le second spray est injecté à température à ambiante pour deux débits : Q_2 = 40 ml/min et Q_2 = 60 ml/min. A partir des mesures couplées, il est possible de déterminer une température moyenne T_m pour l'ensemble des classes de diamètre :

$$T_m = \frac{\sum_{p=1}^{N_c} D_p^{2.8} N_p T_p}{\sum_{p=1}^{N} D_p^{2.8} N_p} \tag{10}$$

où p est l'index de la classe de taille, N_c le nombre de classe de taille, N_p le nombre de gouttes par classe de taille et T_p la température des gouttes dans la classe p. La *Fig.* 4 décrit l'évolution de la température moyenne T_m par rapport à la température d'injection T_{inj} le long de l'axe Z lorsque le spray (1) est chauffé et injecté seul, puis lorsque les deux sprays sont injectés en même temps avec Q_2 = 40 ml/min et Q_2 = 60 ml/min. Lorsque le spray (1) est seul on observe bien une décroissance de la température moyenne des gouttes de l'ordre de 5°C. Puis, quand le spray (2) est appliqué, ce refroidissement est plus important et est accentué avec la valeur de Q_2. L'évolution de la température dans les mêmes que conditions que celles de la *Fig. 3* mais selon une direction horizontal (axe Y) à Z = 30 mm est décrite à la *Fig. 4.* La position Y = – 17 mm correspond au bord externe gauche du spray chaud (1) et Y = – 20 mm se situe à l'opposé, c'est-à-dire le bord externe gauche du spray froid (2). Pour le spray (1), il apparait un gradient de 5°C environ entre l'axe central du spray (Y = – 10 mm) et ses bords externes. A noter qu'au-delà de 0 mm il ne peut y avoir de points puisqu'il s'agit du bord externe droit du spray (1) et que peu de gouttes, et donc de fluorescence, passent. Lorsque le spray (2) est injecté avec le spray (1) on retrouve le refroidissement des gouttes principalement entre Y = – 10 et Y = 0 mm. La superposition des points à Y = – 17 mm montre que l'effet du spray (2) ne se ressent pas quelque soit le débit. Similairement, entre Y = 10 et Y = 20 mm les résultats montrent que le spray (1) n'influence pas le spray (2).

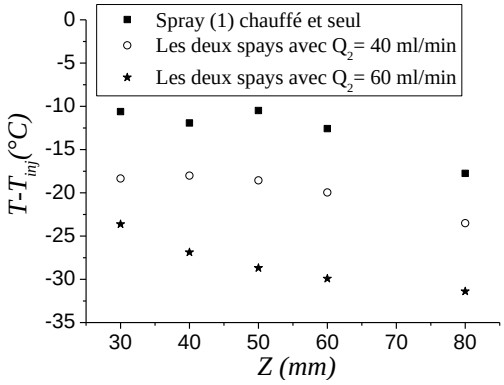

Figure 4 : *Evolution de la température moyenne le long de l'axe Z pour le spray (1) chauffé et injecté seul puis pour les deux sprays mélangés.*

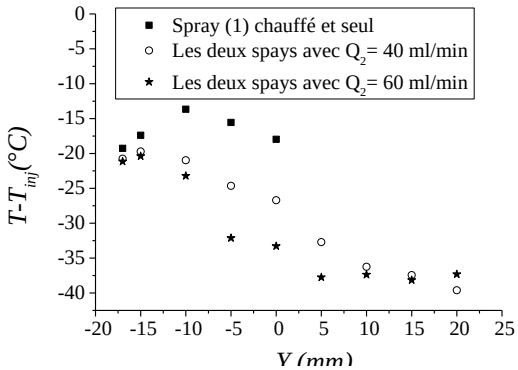

Figure 5 : *Evolution de la température moyenne le long de l'axe Y pour le spray (1) chauffé et injecté seul puis pour les deux sprays mélangés.*

4.2 Température par classe de taille

L'évolution de la température relative ($T_m - T_{inj}$) en fonction du diamètre des gouttes est donnée à Z = 30 mm (*Fig.6*) pour trois cas : le spray (1) seul puis les deux sprays en même temps avec Q_2 = 40 ml/min et Q_2 = 60 ml/min. Comme supposé, les petites gouttes se refroidissent davantage que les grosses. Puis, pour une classe de taille donnée la température des gouttes diminue avec le débit du spray (2). La *Fig. 7* présente les mêmes expériences que celles de la *Fig. 6* mais selon l'axe Y à Z = 30 mm et à Y = – 10 mm. On retrouve le constat précédent : diminution de la température des gouttes avec l'augmentation du débit Q_2.

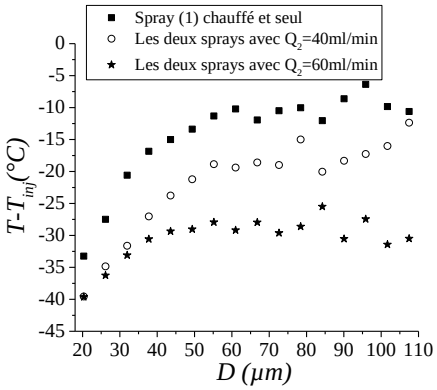

Figure 6 : *Evolution de la température par classe de taille le long de l'axe Z pour le spray (1) chauffé et injecté seul puis pour les deux sprays mélangés.*

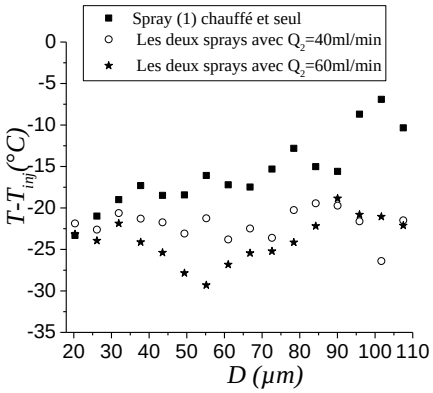

Figure 7 : *Evolution de la température par classe de taille le long de l'axe Y pour le spray (1) chauffé et injecté seul puis pour les deux sprays mélangés.*

4.3 Etude du transfert de chaleur entre les deux sprays

L'analyse des résultats précédents ne permettent pas de conclure sur la nature des transferts de chaleur entre les gouttes issues des deux sprays. Plus précisément, est ce qu'une goutte chaude peut se refroidir au contact d'une froide. Pour relever cette indétermination, des expériences ont été réalisées. L'idée est d'ensemencer en traceur fluorescent (sulforhodamine B) l'eau d'un seul des deux sprays. Ici, il a été choisi d'ensemencer l'eau du spray (1), l'eau du spray (2) étant de l'eau déionisée et seul un débit Q_2 = 40 ml/min a été employé. Toutefois, dans un premier temps il a fallu vérifier que la concentration en traceur fluorescent est restée constante lors de ces mesures. En effet, s'il peut avoir coalescence entre gouttes ensemencées et non ensemencées, il y a alors dilution du traceur et dans ce cas, d'après *l'eqn* (1) sous conditions isothermes, l'intensité fluorescente doit changer. Or l'analyse de l'évolution de l'intensité fluorescente sur une bande spectrale pour le spray (1) seul et pour les deux sprays en même temps a montré que l'intensité est la même dans les deux cas. Cette vérification a été effectuée à Z = 30 mm là où la concentration en gouttes est la plus importante et donc où la probabilité de coalescence est la plus grande. D'autre part, il a été vérifié que dans le cas des deux sprays mélangés la distance moyenne entre deux gouttes (de l'ordre de 300 µm et calculée à partir des données PDA) est bien plus grande que le diamètre moyen D_{10} (de l'ordre de 47 µm). Cela confirme bien la faible probabilité de collisions entre gouttes.

La *Fig. 8* décrit l'évolution de la température des gouttes le long de l'axe Z pour cinq cas différents :

1) Spray (1) ensemencé en sulforhodamine B, chauffé et injecté seul
2) Spray (1) ensemencé en sulforhodamine B, injecté seul à température ambiante sans préchauffage

3) Spray (1) chauffé et spray (2) injecté en même temps et les deux sprays ensemencés en sulforhodamine B
4) Spray (1) chauffé et spray (2) injecté en même temps mais seul le spray (1) est ensemencé en sulforhodamine B ; normalement, seules les gouttes chaudes du spray (1) sont détectées
5) Spray (1) chauffé et spray (2) injecté en même temps mais seul le spray (2) est ensemencé en sulforhodamine B ; normalement, seules les gouttes froides du spray (2) sont détectées

L'analyse de ces mesures conduit à trois remarques. Premièrement, la superposition des courbes des cas 1) et cas 4) prouvent que le spray (2) n'influence pas les gouttes chaudes du spray (1). Deuxièmement, les cas 1) et 2) donnent des résultats similaires à ceux observés à la *Fig. 4* pour Q_2 = 40 ml/min. Et troisièmement, la superposition des courbes des cas 4) et 5) démontre que le spray (1) n'influence pas non plus le spray (2). Ainsi, le refroidissement observé s'interpréteraient à partir de la manière dont est calculée T_m. En effet, la température calculée est obtenue à partir d'un ensemble de gouttes froides et chaudes durant une même acquisition. La valeur T_m dépend donc de la proportion de gouttes chaudes ou froides détectées. Par conséquent, quand le débit du spray (2) augmente, la probabilité de détecter des gouttes froides augmente également contribuant alors à diminuer la valeur de T_m.

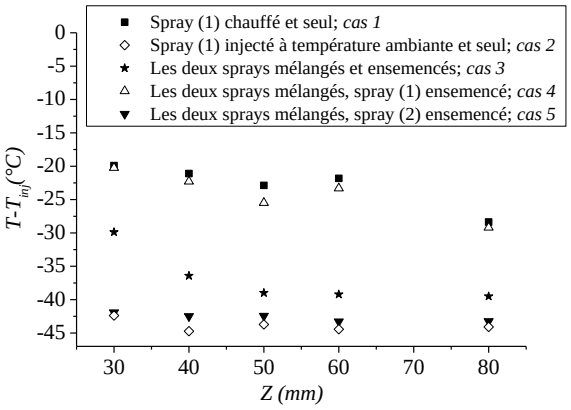

Figure 8 : *Evolution de la température le long de l'axe Z (X= Y =0)*

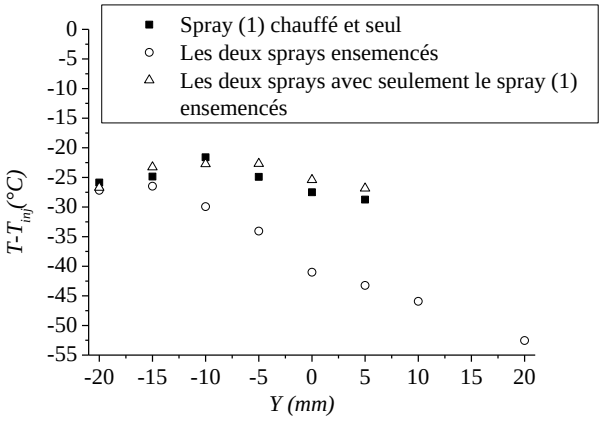

Figure 9 : *Evolution de la température le long de l'axe Y à Z = 30 mm pour le spray (1) seul*

Enfin, la *Fig. 9* décrit l'évolution de la température des gouttes le long de l'axe Y à Z = 30 mm pour trois cas :

1) Spray (1) ensemencé en sulforhodamine B, chauffé et injecté seul
2) Spray (1) chauffé et spray (2) injecté en même temps et les deux sprays ensemencés
3) Spray (1) chauffé et spray (2) injecté en même temps mais seul le spray (1) est ensemencé en sulforhodamine B

Comme précédemment, la quasi-superposition des courbes des cas 1) et 3) montre une nouvelle fois que le spray (1) n'est pas influencé par le spray (2). Les résultats de ces deux figures tendent donc à montrer que le transfert de chaleur entre les deux sprays reste marginal.

5. Conclusion

La mesure de température par fluorescence induite par laser à trois couleurs (3cLIF) couplé à des mesures de phase Doppler (PDA) est appliquée aux cas de sprays polydisperse. Cette technique couplée permet d'obtenir des températures de gouttes par classe de taille de gouttes. Elle a été ici testée dans le cas du mélange de deux sprays non isothermes qui sont injectés sous conditions atmosphérique. Le liquide d'un des deux sprays est préalablement chauffé avant d'être injecté alors que le second est maintenu et injecté à température ambiante.

D'autre part, l'influence du débit du second spray est également analysée. Comme prévu, les gouttes se refroidissent dans le sens de l'écoulement et les gouttes les plus petites se refroidissent davantage que les plus grosses. Des résultats similaires sont observés selon une exploration radiale à une altitude donnée. Enfin, l'augmentation du débit du spray froid contribue bien à augmenter le refroidissement des gouttes.

Ces résultats cohérents permettent donc de valider la technique de coupler la 3cLIF avec le PDA. Par ailleurs, une seconde série d'expériences a clairement démontré que le refroidissement des gouttes observés est principalement du à un processus de moyennage entre des gouttes de températures différentes. Ainsi, l'influence d'un spray sur l'autre n'a pu être mise en évidence démontrant que le transfert de chaleur entre sprays reste probablement marginal.

Références

[1] S. sazhin, Advanced models for fuel droplets heating and evaporation, *Proc. En. Comb. Sci.*, 32 (2006), 162-214.

[2] C. Maqua et al., Monodisperse droplet heating and evaporation: Experimental study and modeling, *Int. J. Heat Mass Trans*., 51 (2008), 3932-3945.

[3] V. Depredurand et al., Exp. Fluids, Combined PDA and LIF applied to size-temperature correlations measurements in heated spray, 50 (2011), 561-571.

[4] G. Castanet et al., Dynamics and temperature of droplets impacting onto a heated wall, *Int. J. Heat Mass Trans*., 52 (2009), 670-679.

[5] J.D. Bernardin et al., Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface, *Int. J. Heat Mass Trans*., 40 (1997), 247-267.

[6] I.V. Rosman et C. Tropea, Flux measurements in sprays using Phase Doppler techniques », *Atom. Sprays*, 11 (2001), 673-705.

[7] J. Van Beek et al., Global rainbow thermometry assessed by airy and Lonrenz-Mie theories and compared with phase Doppler anemometry, *App. Opt.*, 42 (2003), 4016-4022.

[8] M.R. Vetrano et al., Characterization of a non-thermal water spray by global rainbow thermometry, *Exp. Fluids.*, 50 (2006), 15-22.

[9] A. M. Murray et al., Fluorescence methods for determination of temperature in fuel spray, *App. Opt.*, 24 (1985), 2783-2787.

[10] H.E. Gossage et al., Fluorescence thermometers using intermolecular exciplex, *App. Opt.*, 26 (1987), 2256-2259

[11] J. Sakakibara et al., Whole Field Measurement of Temperature in Water Using Two-Color Laser Induced Fluorescence, *Exp. Fluids*, 26 (1999), 7-15

[12] H.J. Kim et al., Examination of a Ratiometric Laser Induced Fluorescence Thermometry for Microscale Spatial Measurement Resolution, *Int. J. Heat Mass Trans*., 46 (2003), 3967-3974.

[13] P. Lavieille et al., Evaporating and combusting droplet temperature measurements using two-color laser-induced fluorescence, *Exp. Fluids*, 31 (2001), 45-55.

[14] G. Castanet et al., Measurement of the temperature distribution within monodisperse combusting droplets in linear streams using two-color laser-induced fluorescence, *Exp. Fluids*, 35 (2003), 563-571.

[15] A.Labergue et al., New insight into two-color LIF thermometry applied to temperature measurements of droplets, *Exp. Fluids*, 49 (2010), 547-556.

[16] A.Labergue et al., Study of the droplet size effect coupled with the laser light scattering in sprays for two-color LIF thermometry, *Exp. Fluids*, 52 (2012), 1121-1132.

[17] V. Depredurand et al., A temperature-sensitive tracer suitable for two-color laser-induced fluorescence thermometry applied to evaporating fuel droplets, *Meas. Sci. Technol.*, 19 (2008), 1-12.