



**HAL**  
open science

# Etude expérimentale de l'évaporation de gouttelettes de combustible à haute température par utilisation de techniques optiques combinées. Influence de la volatilité du combustible

Lionel Perrin, Guillaume Castanet, Fabrice Lemoine

## ► To cite this version:

Lionel Perrin, Guillaume Castanet, Fabrice Lemoine. Etude expérimentale de l'évaporation de gouttelettes de combustible à haute température par utilisation de techniques optiques combinées. Influence de la volatilité du combustible. 14ème Congrès Francophone sur les Techniques Laser pour la Mécanique des Fluides, Institut universitaire des systèmes thermiques industriels ; Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre ; Laboratoire de Génie Chimique et Instrumentation Sep 2014, Marseille, France. hal-01447116

**HAL Id: hal-01447116**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01447116>**

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 expérimentale de l'évaporation de gouttelettes de combustible à haute température par utilisation de techniques optiques combinées.

## Influence de la volatilité du combustible.

Lionel Perrin<sup>1,2</sup>, Guillaume Castanet<sup>1,2</sup>, Fabrice Lemoine<sup>1,2\*</sup>

1: Université de Lorraine, LEMTA, UMR 7563, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54500, France

2: CNRS, LEMTA, UMR 7563, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54500, France

\*Correspondant: [fabrice.lemoine@univ-lorraine.fr](mailto:fabrice.lemoine@univ-lorraine.fr)

**Résumé :** La technique de fluorescence induite par laser à deux couleurs (2cLIF) a été utilisée pour caractériser l'évolution de la température de gouttelette injectées dans de l'air à haute température (540°C). Les effets néfastes créés par les résonances morphologiques ont été éliminés et la convolution entre le champ d'excitation laser et le champ de température non uniforme de la goutte a été pris en compte. Enfin, la 2cLIF a été couplée à une technique de mesure du diamètre par ombroscopie quantitative afin de caractériser finement l'évaporation.

## 1 Introduction

L'utilisation de combustibles liquides est très répandue dans les systèmes propulsifs, qu'ils soient aéronautiques, automobiles, ou dédiés à la propulsion spatiale. Ces combustibles, en général composés de plusieurs centaines de molécules, sont atomisés sous la forme d'une dispersion de fines gouttelettes dans la chambre de combustion afin d'accroître les échanges entre le liquide et l'air préchauffé. L'efficacité d'une chambre de combustion et ses émissions de polluants sont fortement influencées par la température des gaz chauds, la turbulence et le temps de séjour des gouttelettes dans la chambre. La nature chimique du combustible a également un impact important. A titre d'exemple, la modélisation de la phase liquide (échauffement, évaporation) est essentielle pour prédire correctement le délai d'auto-inflammation et la durée de vie des gouttes. Cette étude concerne l'évaporation de gouttelettes réalisée dans des conditions idéalisées, puisqu'il s'agit de l'évaporation d'un train de gouttes monodisperse dans une enceinte portée à haute température. La distance entre les gouttelettes est suffisamment faible pour influencer les transferts de chaleur et de masse entre la phase liquide et la phase gazeuse environnante. Deux techniques optiques complémentaires sont mises en œuvre, l'une permettant de mesurer l'évolution dans le temps de la température des gouttes par fluorescence induite par laser à deux couleurs, l'autre le diamètre. En particulier, l'influence du paramètre de distance  $C$ , rapport entre la distance entre gouttes et le diamètre des gouttes, sur les transferts de chaleur et de masse est un paramètre particulièrement important. Pour de faibles valeurs de  $C$ , le taux d'échauffement et d'évaporation sont réduits en comparaisons avec le cas de la goutte isolée, qui peut être décrit par des

modèles usuels [1]. Plus récemment, Deprédurand et al. [2] ont démontrés que cette réduction des transferts diffèrait en fonction du combustible utilisé et de sa volatilité en particulier. Cette communication présente les résultats préliminaires obtenus sur les mesures couplées de température et de concentration. Les travaux seront ensuite étendus aux cas de combustibles multicomposant (mélange d'alcanes et d'alcanes et d'éthanol).

## 2 Dispositif expérimental et techniques optiques

Un jet de gouttelettes monodisperse est créé par désintégration d'un jet liquide à l'aide de vibrations imposées par une céramique piézo-électrique. Les gouttelettes, juste après la fragmentation, sont injectées dans une enceinte isolée thermiquement (figure 1) alimentée par un écoulement laminaire d'air chaud, généré par un réchauffeur électrique. Afin de limiter les pertes thermiques au niveau des parois, un fil résistif chauffant, contrôlé en température, y est inséré. La température de l'écoulement d'air dans l'enceinte peut atteindre 540°C. De plus, plusieurs hublots en quartz ont été aménagés afin de permettre différents accès optiques (figure 1). L'écoulement d'air est homogénéisé dans l'enceinte en forçant l'écoulement à travers une couche de mousse métallique et une paroi multi-performée. La vitesse de l'air dans l'enceinte reste faible (0,1 à 0,3 m/s) par rapport à celle des gouttes (de l'ordre de 10 m/s). Trois paramètres principaux sont mesurés à différentes positions du jet (ce qui équivaut à différents instants) : la vitesse, le diamètre et la température des gouttes.

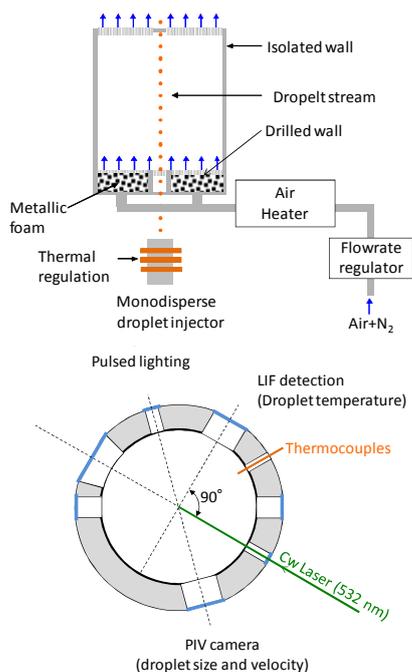


Figure 1 Schéma du dispositif expérimental : enceinte chauffée avec injection d'un jet de gouttes monodisperse.

**Mesure de la température des gouttes : principes**

Les mesures de température sont réalisées par fluorescence induite par laser à deux couleurs (2cLIF), technique développée initialement dans les travaux de Lavieille et al. [3]. Le combustible est préalablement ensemencé à l'aide d'un colorant fluorescent, le pyrrométhène 597-C8 qui absorbe la longueur d'onde (532 nm) d'un laser Nd-Yag doublé en fréquence. Une caractéristique intéressante du pyrrométhène 597-C8 est notamment la faible dépendance de sa fluorescence à la composition du solvant, qu'il soit constitué d'un alcane, d'un alcool ou d'une cétone [4]. Ainsi, des bandes spectrales de détection identiques, [540; 560 nm] et [590; 610 nm] peuvent être utilisées pour différents combustibles. La figure 2 montre l'émission du pyrrométhène 597-C8 en solution dans le n-dodécane pour différentes température de 20°C à 100°C : une forte diminution du signal de fluorescence peut être observée. Selon Lemoine et Castanet [5], l'intensité de fluorescence  $I_{fi}$  détectée sur une bande spectral spécifique est donnée par :

$$I_{f,i} = K_{opt,i} K_{spec,i} I_0 C V_c f_i(T) \tag{1}$$

Dans cette expression,  $C$  désigne la concentration molaire du colorant fluorescent,  $I_0$  est l'intensité du faisceau laser incident,  $K_{opt,i}$  est une constante optique et  $K_{spec,i}$  est une constante dépendant des propriétés spectroscopiques du traceur fluorescent dans son environnement. Le volume de mesure  $V_c$  est formé par l'intersection entre les deux faisceaux laser excitateurs, la gouttelette et l'angle solide de collection du signal de fluorescence. La dépendance

en température du signal de fluorescence est exclusivement contenue dans la fonction  $f_i(T)$ .

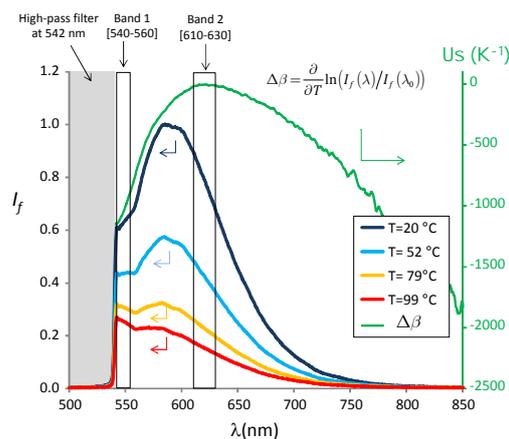


Figure 2 Spectres d'émission du pyrrométhène 597-C8 mesurés à différentes températures. Sur l'axe secondaire, sensibilité en température  $Us$  ( $\lambda=630$  nm).

Le signal de fluorescence varie avec le temps lorsque la goutte traverse le volume de mesure et dépend de nombreux facteurs tels que la taille relative de la goutte par rapport au volume d'excitation laser ou au volume collecté, la trajectoire de la goutte. De plus la position relative de la goutte par rapport aux faisceaux laser modifie également l'énergie laser interceptée par la goutte. Afin d'éliminer la dépendance en ces paramètres variables et non maîtrisés, le signal de fluorescence est détecté sur deux bandes spectrales séparées (notées 1 et 2), de manière à former le rapport en ces deux intensités :

$$R_{12}(T) = \frac{I_{f,1}}{I_{f,2}} = \frac{K_{opt,1} K_{spec,1}}{K_{opt,2} K_{spec,2}} f_{12}(T) \tag{2}$$

$$f_{12}(T) = f_1(T) / f_2(T)$$

Les constantes optiques et spectroscopiques peuvent être déterminées à l'aide d'un point de référence où la température est connue. De plus, le rapport des intensités ne dépend plus des paramètres mal maîtrisés tel que l'intensité laser, le volume de mesure ou encore la concentration du traceur fluorescent. Le facteur de sensibilité à la température  $\beta(\lambda) = \partial \ln I_f / \partial T$  (figure 2) dépend fortement de la longueur d'onde. Ainsi, les deux bandes spectrales doivent être choisies de manière à optimiser la sensibilité du rapport des intensités.

La figure 3 présente le dispositif optique de la 2cLIF. Le volume d'excitation de la fluorescence est formé par l'intersection de deux faisceaux laser, ce qui permet un positionnement plus aisé des gouttes au col des faisceaux. La fluorescence est collectée à angle droit par un doublet achromatique. La diffusion de Mie du rayonnement laser incident par les gouttes est éliminée par l'insertion d'un filtre passe haut de forte densité optique. Un jeu de lames séparatrices et de filtres interférentiels permet de séparer le signal optique en deux bandes spectrales. Le signal de

fluorescence est ensuite convertit en un signal électrique à l'aide de deux photomultiplicateurs équipés d'amplificateurs transimpédance rapides.

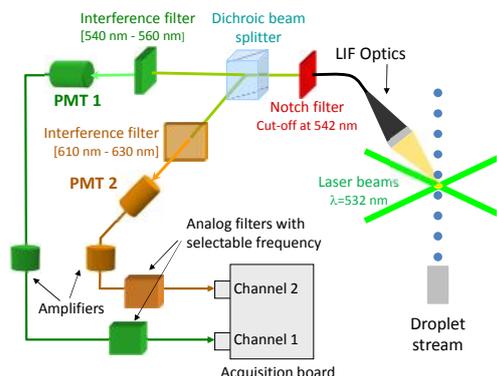


Figure 3 Dispositif expérimental de 2cLIF.

Afin de connaître la sensibilité en température du traceur fluorescent, une calibration préliminaire doit être effectuée. Le traceur fluorescent en solution dans le liquide d'intérêt est progressivement chauffé dans une cellule thermorégulée munie d'accès optiques. Le signal de fluorescence est alors mesuré en fonction de la température du liquide, tout en minimisant le temps d'exposition au faisceau laser afin d'éliminer le phénomène de photobleaching. La figure 4 présente les courbes de calibration obtenues pour différents combustibles de points d'ébullitions différents : l'éthanol, l'isohexane, le n-heptane, le n-décane, le n-dodécane. La sensibilité en température est influencée par la nature du solvant. La variation relative du rapport de fluorescence est de l'ordre de 0,7%/°C pour le n-heptane, alors qu'elle est de l'ordre de 1%/°C pour l'éthanol à 25°C. La fonction de sensibilité à la température peut être approchée par [6] :

$$f_{12}(T) \approx \exp\left(\frac{A}{T^2} + \frac{B}{T} + C\right) \quad (3)$$

où A, B et C sont des coefficients déterminés expérimentalement à partir des courbes de calibration.

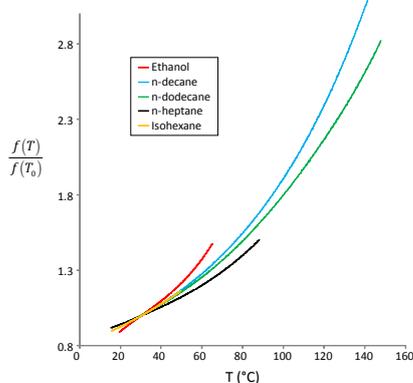


Figure 4 Courbes de calibration : évolution du rapport des intensités de fluorescence pour différents combustibles en fonction de la température (T0=25°C).

### Application aux gouttes multicomposant

Plusieurs types de mélange ont été examinés, notamment ceux composés d'isohexane, de n-décane et de n-dodécane. Les calibrations en température confirment que la sensibilité en température  $f_{12}(T)$  dépend peu de la composition des mélanges, comme le montre la figure 5 dans le cas d'un mélange isohexane/n-dodécane. Dans le cas le plus défavorable, l'utilisation d'une fonction de sensibilité en température unique pour caractériser le mélange quel que soit sa composition (y compris dans le cas de l'évaporation complète de l'isohexane), conduirait à une erreur maximale de 2°C sur la température. L'effet de la composition est plus important pour les mélanges heptane/n-dodécane (figure 6), mais la fonction reste néanmoins peu affectée pour une fraction volumique de n-heptane restant inférieure à 75%. Ainsi, l'utilisation de la fonction de calibration correspondant à la composition initiale de la goutte sera suffisante pour limiter les erreurs de mesure de la température sur la période de mesure (environ 10 ms).

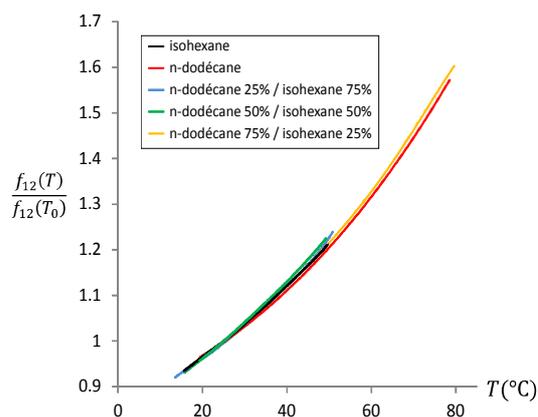


Figure 5 Courbes de calibration pour les mélanges n-dodécane / isohexane.

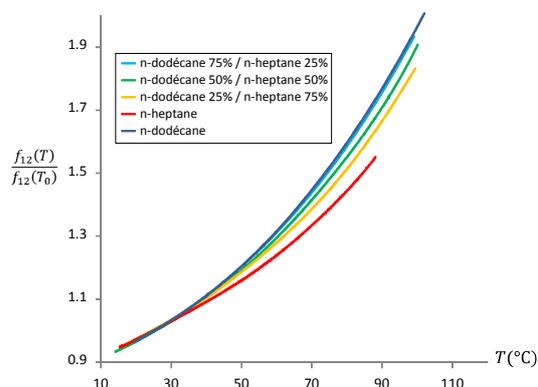


Figure 6 Courbes de calibration pour les mélanges n-dodécane / n-heptane.

### Effet des résonances morphologiques (MDRs)

Une attention toute particulière est prêtée à l'élimination des modes de résonance morphologiques (MDRs) qui peuvent apparaître dans certaines gouttes. En effet, certaines longueurs d'onde de fluorescence sont piégées par réflexion totale à la surface de la goutte. Lorsque le parcours des rayons lumineux au voisinage de la surface est multiple de la longueur d'onde du rayonnement, il s'ensuit un phénomène d'amplification favorisant l'émission stimulée. Ainsi, les gouttelettes peuvent se comporter comme des micro-lasers dont la longueur d'onde dépend de l'indice de réfraction du liquide et du diamètre instantané de la goutte. Ces phénomènes se produisent lorsque le gain le long du trajet optique est supérieur aux pertes dues à l'absorption de la longueur d'onde amplifiée. Plusieurs spectres de fluorescence ont été réalisés sur des gouttes de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre, composée de n-décane,ensemencées par différentes concentrations (variant de  $10^{-7}$  mol/l à  $5.10^{-5}$  mol/l) en pyrrométhène 597-C8 (figure 7). Chaque spectre correspond à la contribution de plusieurs dizaines de milliers de gouttelettes du fait du temps d'acquisition nécessaire. Un pic d'intensité correspondant à l'apparition d'un effet laser peut nettement être distingué aux alentours de 620 nm pour la plus haute concentration en colorant testée. La largeur de ce pic peut s'expliquer par le fait qu'il résulte de la contribution de nombreuses gouttelettes dont les diamètres sont tous très légèrement différents. La résonance se produit clairement là où la réabsorption de la fluorescence est complètement négligeable (figure 7), ce qui explique le fait que l'augmentation de la concentration en colorant a tendance à favoriser les MDRs. Ainsi, il apparaît clairement, que même pour les concentrations utilisées (de l'ordre de  $5.10^{-6}$  mol/l), il n'est pas possible de s'affranchir totalement de l'influence des MDRs dans la bande de détection [610 nm-630 nm]. Afin d'éliminer l'effet néfaste des MDRs sur la mesure de température, un colorant non fluorescent (Oil Blue N), soluble dans les alcanes et les alcools, est ajouté au liquide. Sa zone spectrale d'absorption correspond à la zone dans laquelle se produit l'amplification des longueurs d'onde de fluorescence (figure 7). Comme le montre la figure 8, une concentration en Oil Blue N de l'ordre de  $10^{-6}$  mol/l est suffisante pour éliminer l'effet des MDRs sur le rapport des intensités de fluorescence.

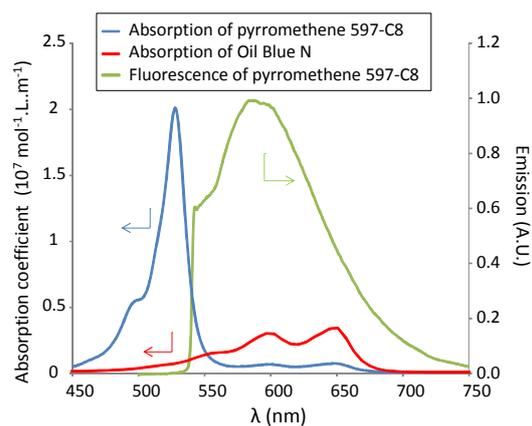


Figure 7 Spectre d'absorption et d'émission du pyrrométhène 597-C8 et du Oil Blue N.

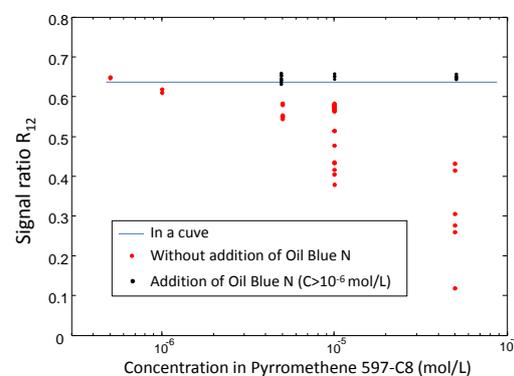


Figure 8 Influence de l'ajout de Oil Blue N sur le rapport des intensités de fluorescence.

### Influence du volume de mesure

Du fait de l'effet de l'effet « lentille » produit par la traversée de la surface de la goutte et de l'absorption du faisceau laser incident par le colorant fluorescent, le champ d'excitation laser n'est pas uniforme à l'intérieur de la goutte. Si le champ de température n'est pas uniforme à l'intérieur de la goutte, mais présente des gradients de température, la non uniformité du champ d'excitation induit une pondération inégale entre les différentes zones de la goutte. Cette pondération peut être quantifiée, en prenant en compte les caractéristiques du système optique (faisceaux excitateurs, dispositif de collection de la fluorescence) et celles de la goutte. Le diamètre des faisceaux au col est de l'ordre de 136  $\mu\text{m}$  et le diamètre de la zone imagée par le doublet achromatique est de l'ordre de 140  $\mu\text{m}$ . Ainsi, l'utilisation conjointe de l'optique géométrique et de la méthode de lancé de rayons permet de décrire le champ d'excitation interne à la goutte (voir l'exemple de la figure 9 où la goutte est légèrement excentrée par rapport à l'axe des faisceaux laser excitateurs). Le champ de température à l'intérieur de la goutte peut être simulé à l'aide du modèle de conduction effective suggéré par Abramzon et Sirignano [1], stipulant une diffusion de la chaleur purement

sphérique. Deux cas d'échauffement de gouttelettes très différents ont été simulés, le premier concernant une goutte d'éthanol et le second une goutte de n-dodécane, ce second combustible conduisant à des gradients de température internes nettement plus importants, comme le montre la figure 10 représentant l'évolution temporelle des température au centre ( $T_c$ ), à la surface de la goutte ( $T_s$ ) et la température moyenne volumique ( $T_m$ ). Le calcul est répété pour différentes positions de la goutte perpendiculairement à l'axe des faisceaux laser et de l'optique de collection, afin de prendre en compte l'effet du mouvement de la goutte aux cours de sa traversée du volume de mesure, exactement comme dans le cas de l'expérience. Le champ d'excitation interne est ensuite convolué au champ de température simulé, ce qui permet d'estimer la température moyenne réellement déterminée par la technique 2cLIF ( $T_{LIF}$ ). Comme le montre la figure 10, la température ( $T_{LIF}$ ) diffère de quelques degrés de la moyenne arithmétique volumique ( $T_m$ ), en particulier lorsque la différence entre les température au centre et de surface sont très importantes. De plus cette différence est d'autant plus importante que les gradients de température à l'intérieur de la goutte sont élevés (cas de la goutte de n-dodécane). Dans la phase d'échauffement, il apparaît que  $T_{LIF}$  surestime toujours la température moyenne  $T_m$ , ce qui montre la forte pondération imposée par la région centrale de la goutte par le technique LIF. A partir des calculs précédents, il est possible d'estimer que la température mesurée par la technique LIF est de l'ordre de  $T_{LIF} \approx (T_c + T_m)/2$ .

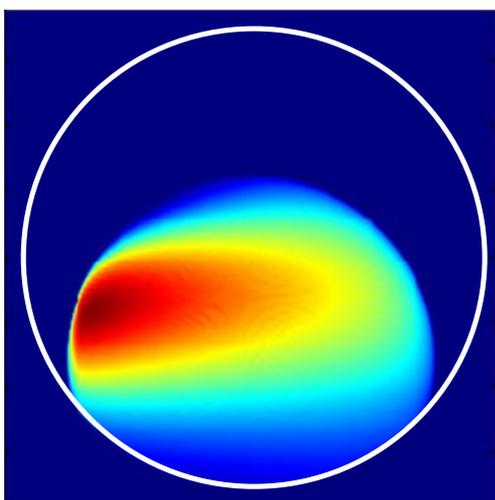


Figure 9 Champ de fluorescence observé par le dispositif de collection dans le cas d'une gouttelette de 112 µm décalée verticalement par rapport à l'axe des faisceaux d'excitation.

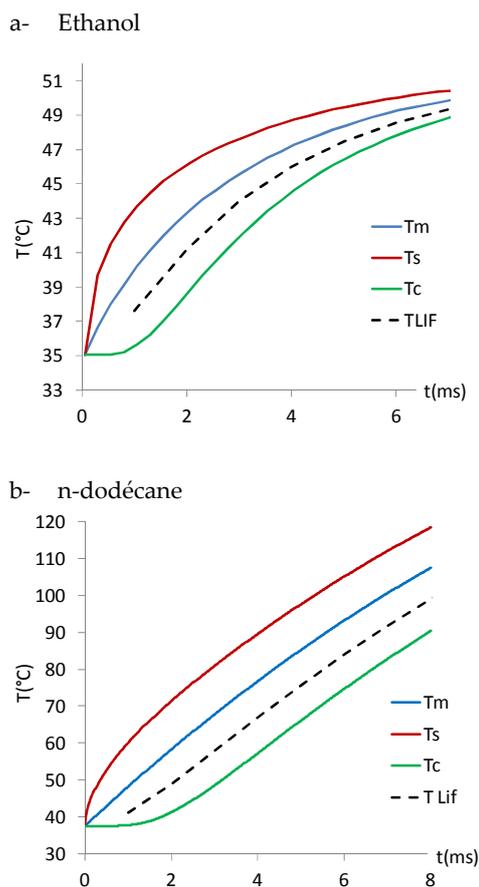


Figure 10 Comparaison entre la température au centre de la gouttelette  $T_c$ , la température de surface  $T_s$ , la température moyenne  $T_m$  et la température  $T_{LIF}$  mesurée par la technique 2cLIF. a- Ethanol ( $T_0=35,1^\circ\text{C}$ ,  $D_0=111.6 \mu\text{m}$ ,  $V_0=11,8 \text{ m/s}$ ,  $C_0=5,4$ ), b- n-dodécane ( $T_0=25.1^\circ\text{C}$ ,  $D_0=109 \mu\text{m}$ ,  $V_0=11.6 \text{ m/s}$ ,  $C_0=5.5$ ).

- Mesure du diamètre des gouttes

Le diamètre des gouttes est mesuré par ombroscopie quantitative. Un laser Nd-Yag à double cavité (type laser de PIV) est focalisé sur un matériau fluorescent solide (red Perspex®). La tache fluorescente ainsi obtenue est placée au foyer d'une lentille convergente afin de créer un faisceau élargi de lumière incohérente (figure 11). Ce faisceau est utilisé comme éclairage afin d'observer les gouttes par ombroscopie. La durée de l'impulsion laser étant de 5 ns et la durée de vie de la fluorescence du matériau de l'ordre de quelques nanosecondes, aucun flou de bouger n'est possible. De plus, les inconvénients inhérents à une lumière cohérente (grains de speckle, interférences) sont évités. Les images d'ombroscopie sont enregistrées par une caméra CCD (2048x2048 pixels) en mode PIV (figure 11). La quantification du diamètre des gouttes intervient après une phase de correction des aberrations optiques (particulièrement la distorsion en barillet observée pour des objectifs à fort grandissement) et un traitement des images permettant la détection des contours en se basant sur un seuil de niveau de gris après normalisation des

images [7]. La précision absolue de la technique est directement liée à la résolution spatiale qui est de l'ordre de  $1\mu\text{m}$  ; la précision relative (mesure de variation de taille) est très nettement meilleure.

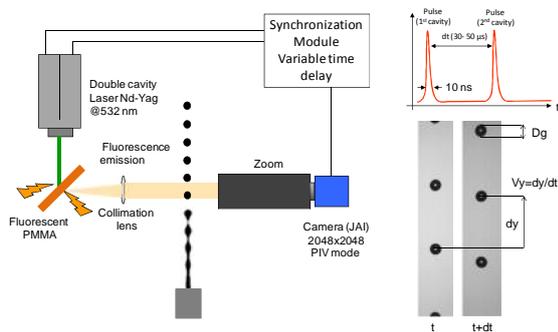


Figure 11 Dispositif expérimental pour la mesure du diamètre des gouttes par ombroscopie quantitative.

Une illustration de celle-ci est présentée sur la figure 12, pour deux jets de gouttelettes monodisperse injectées dans des conditions isothermes (éthanol et n-dodécane injectée à  $24^\circ\text{C}$  dans de l'air à  $24^\circ\text{C}$ ). L'acquisition consiste en 100 paires d'images, ce qui s'avère suffisant pour assurer la convergence statistique de la moyenne avec une RMS de l'ordre de  $0,03\mu\text{m}$  pour la taille et de  $0,07\text{m/s}$  pour la vitesse (figure 13). De très faibles variations de taille peuvent être détectées dans les deux cas testés.

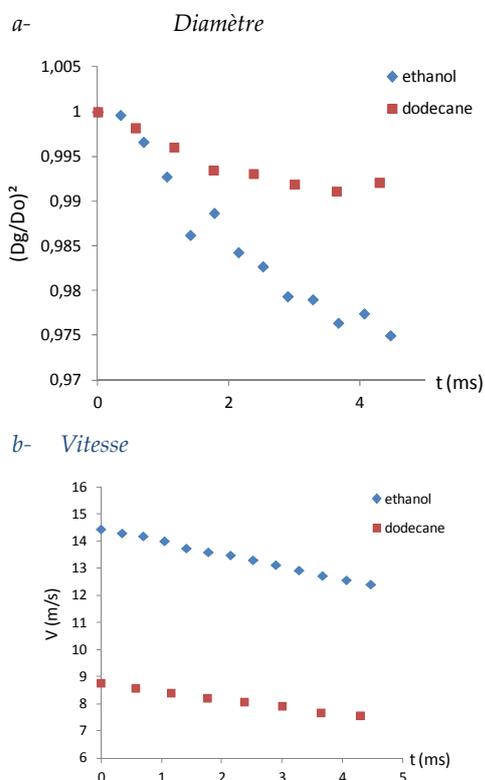


Figure 12 Evolution temporelle de la taille des gouttes (a) et de leur vitesse (b) dans cas de gouttelettes de n-dodécane et d'éthanol injectées à  $24^\circ\text{C}$  dans de l'air à  $24^\circ\text{C}$  ( $D_0=101,2\mu\text{m}$  pour le n-dodécane et  $D_0=113,4\mu\text{m}$  pour l'éthanol).

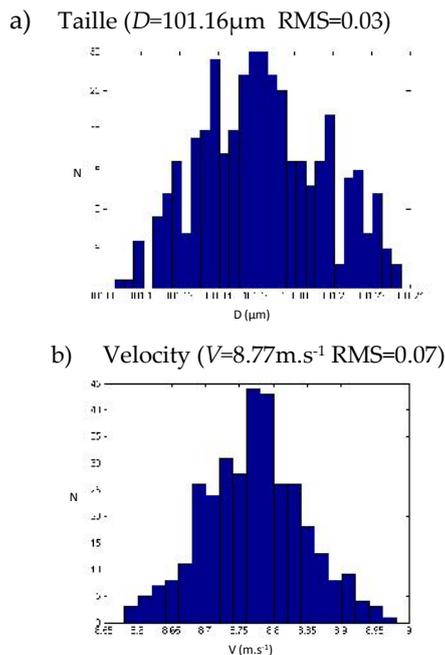


Figure 13 Distributions de la taille et de la vitesse des gouttes ( $t=0$ ) pour les gouttes de n-dodécane dont l'évolution temporelle est présentée figure 12.

### 3 Résultats expérimentaux et discussion

Les différentes techniques décrites précédemment ont été utilisées afin de décrire l'échauffement et l'évaporation de gouttelettes composées de différents combustibles de volatilité différente. Les gouttes ont été injecté dans de l'air sec dont la température est de  $540^\circ\text{C}$ . Le dispositif d'injection ne permet pas de garantir une totale indépendance dans la variation des paramètres d'étude tels que la vitesse des gouttes, le diamètre et le paramètre de distance. Ainsi, quantifier l'influence des différents paramètres sur l'échauffement et l'évaporation demeure particulièrement complexe. La figure 14 compare le comportement (échauffement et évaporation) de différents combustibles de volatilité différente : éthanol, n-heptane, n-décane and n-dodécane. Les évolutions au cours du temps, de la température et du diamètre des gouttes sont comparées, pour des conditions d'injection similaires à l'exception des gouttes de n-heptane ayant une vitesse d'injection nettement plus élevée et une température d'injection plus basse.

Pour des combustibles fortement volatiles, tels que l'isohexane ou l'éthanol, les gouttelettes atteignent rapidement une température d'équilibre nettement plus faible que la température d'ébullition des combustibles. A titre d'exemple, cette température d'équilibre, qui correspond à la température de bulbe humide du combustible à la température de l'air dans la chambre d'essais, est de  $40^\circ\text{C}$  pour l'isohexane et de  $50^\circ\text{C}$  pour l'éthanol, alors que leurs températures d'ébullition sont respectivement de  $60^\circ\text{C}$  et  $78^\circ\text{C}$ . Lorsque la température d'équilibre est atteinte, la

chaleur prélevée par la goutte à son environnement est entièrement utilisée pour son évaporation. Sur la figure 14, il apparaît clairement que l'évaporation des gouttelettes de n-heptane, d'isohexane et d'éthanol suit la loi du  $d^2$  correspondant à une décroissance linéaire de la surface de la goutte. Pour les combustibles les moins volatiles tels que le n-décane ou le n-dodécane, l'évaporation devient significative seulement lorsque la température du liquide est suffisamment élevée. La figure 14 montre également que les gouttes de n-décane ou de n-dodécane n'ont pas le temps d'atteindre une telle température. Ainsi, il apparaît que la dilatation thermique du liquide compense très largement l'évaporation (très faible). Ainsi, la chaleur prélevée à l'environnement est essentiellement utilisée pour l'échauffement des gouttes. Cela explique que les gouttes de n-heptane, n-décane et de n-dodécane ont un taux d'échauffement très voisin jusqu'à ce que l'évaporation devienne significative ( $t=2ms$ ). En augmentant la température d'injection des gouttes, une température d'équilibre de 170°C pour le n-dodécane a été atteinte (figure 15-a). Cette température atteinte, le taux d'évaporation, représenté par la pente de l'évolution du  $d^2$  (figure 15-b) est très élevé et comparable à celui observé pour les gouttelettes d'isohexane dans la mesure où les conditions d'écoulement sont similaires. Dans un second temps, l'évaporation de gouttes multicomposant a également été étudiée. La figure 16 présente plusieurs séries de mesures réalisées sur des mélanges à fort contraste de volatilité, composés d'isohexane et de n-dodécane. Dans ces différentes expériences, la vitesse des gouttes, leur diamètre à l'injection et le paramètre de distance reste comparables. Des modifications très significatives de l'échauffement et de l'évaporation peuvent être observées lorsque la composition initiale du combustible est modifiée. Un accroissement de la fraction volumique d'isohexane tend à accroître le taux d'évaporation et à réduire le taux d'échauffement. L'extrapolation des résultats pour des fractions volumique de 50% et 75% d'isohexane conduit à supposer l'existence d'une température de pseudo-équilibre. La stagnation relative de la température du liquide semble accompagnée par une décroissance quasi-linéaire du diamètre des gouttes. D'un point de vue purement qualitatif, le comportement des mélanges diffère peu de celui des composants purs, du fait des faibles variations de compositions durant le temps d'étude. Lorsque les gouttes contiennent une fraction volumique de n-dodécane supérieure à 50%, la température du liquide croît rapidement tout en dépassant la température d'ébullition de l'isohexane (60°C). Cependant, le taux d'échauffement n'est pas suffisamment important pour conduire à des micro-explosions des gouttes.

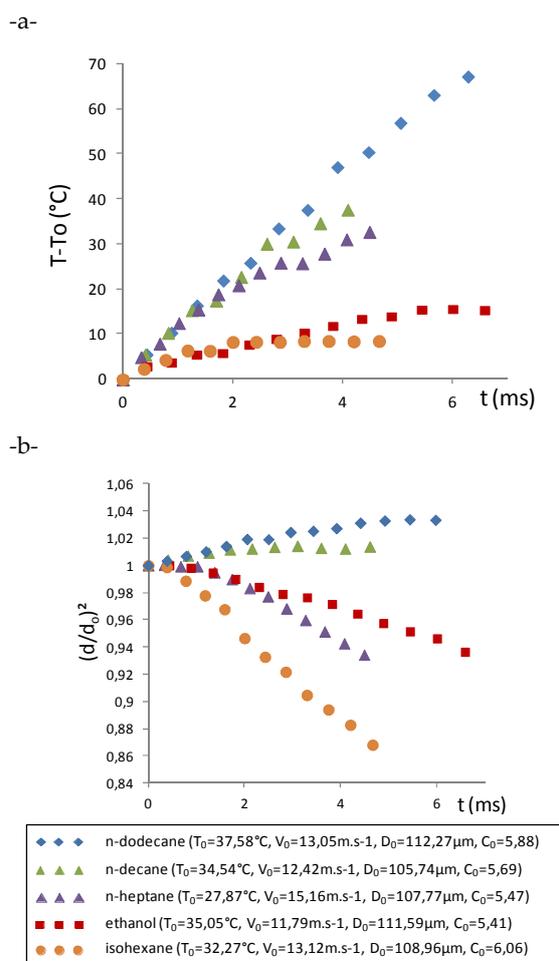


Figure 14 Echauffement (a) et évaporation (b) de gouttelettes composées de différents liquides.

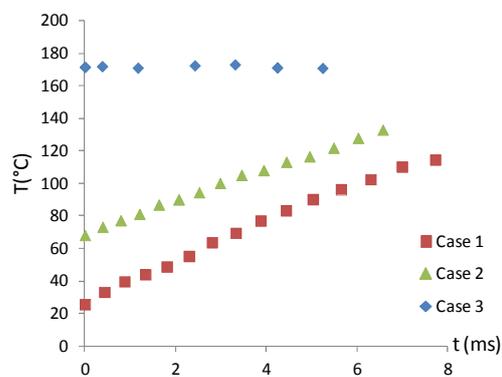


Figure 15-a Evaporation de gouttelettes de n-dodécane pour différentes températures d'injection. Evolution temporelle de la température (cas 1 :  $T_0=26^\circ\text{C}$ ,  $D_0=97,4\mu\text{m}$ ,  $V_0=11,8\text{ m/s}$ ,  $C_0=4,2$ ; cas 2 :  $T_0=68^\circ\text{C}$ ,  $D_0=99,1\mu\text{m}$ ,  $V_0=13\text{ m/s}$ ,  $C_0=4,5$ ; cas 3 :  $T_0=170^\circ\text{C}$ ,  $D_0=92,1\mu\text{m}$ ,  $V_0=13,3\text{ m/s}$ ,  $C_0=4,8$ ).

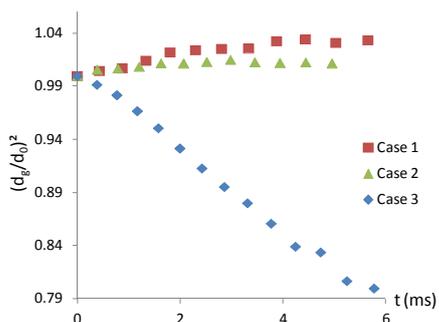
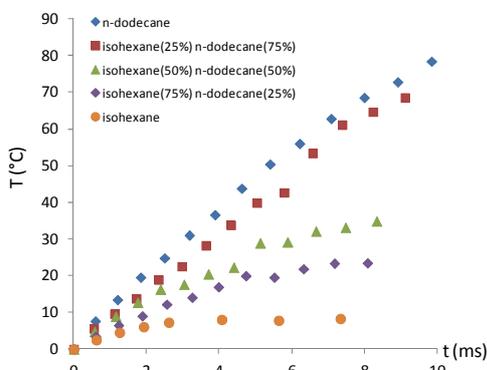


Figure 15-b Evaporation de gouttelettes de n-dodécane pour différentes températures d'injection. Evolution temporelle de la taille (cas 1 :  $T_0=26^\circ\text{C}$ ,  $D_0=97,4 \mu\text{m}$ ,  $V_0=11,8 \text{ m/s}$ ,  $C_0=4,2$ ; cas 2 :  $T_0=68^\circ\text{C}$ ,  $D_0=99,1 \mu\text{m}$ ,  $V_0=13 \text{ m/s}$ ,  $C_0=4,5$ ; cas 3 :  $T_0=170^\circ\text{C}$ ,  $D_0=92,1 \mu\text{m}$ ,  $V_0=13,3 \text{ m/s}$ ,  $C_0=4,8$ ).

-a-



-b-

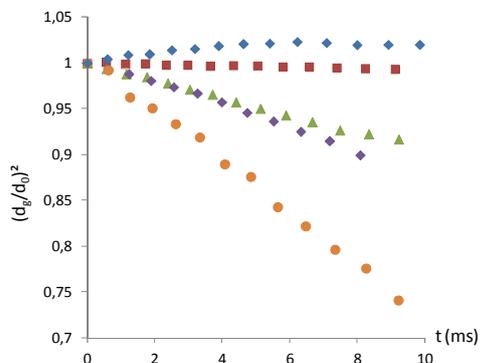


Figure 16 Evaporation de gouttes binaires (isohehexane-n-dodécane) dans des conditions expérimentales similaires. Evolution de la température (a) de la taille (b) ( $T_0=35^\circ\text{C}$ ,  $D_0=115 \mu\text{m}$ ,  $V_0=8,5 \text{ m/s}$ ,  $C_0=6$ ).

#### 4 Conclusions

Cette étude a démontré les importantes possibilités offertes par la technique de fluorescence induite par laser à deux couleurs afin de mesurer les températures de gouttes monocomposant puis bicomposant. Dans ce cadre, l'utilisation du

pyrométhène 597-C8 se révèle particulièrement intéressante du fait de sa solubilité dans de nombreux combustibles (éthanol, alcanes mais également bicomcombustibles) et de la faible sensibilité de sa fluorescence à la composition du solvant. Les progrès importants réalisés concernent

- la suppression des effets néfastes des résonances morphologiques par l'adjonction d'un colorant absorbant dans la bande spectrale amplifiée et non fluorescent,
- la prise en compte de la convolution entre le champ de température interne et le champ d'excitation laser non homogène.

Par ailleurs, la mesure conjointe de l'évolution du diamètre des gouttes devrait permettre une estimation des flux d'échauffement et d'évaporation et ainsi une estimation des nombre de Nusselt et de Sherwood relatifs aux transferts de chaleur et de masse.

#### References

- [1] Abramzon B, Sirignano WA (1989) Droplet vaporization model for spray combustion calculations. International Journal of Heat and Mass Transfer 32:1605-1618
- [2] Deprédurand V, Castanet G, Lemoine F (2010) Heat and mass transfer in evaporating droplets in interaction: Influence of the fuel. International Journal of Heat and Mass Transfer 53:3495-3502
- [3] Lavieille P, Lemoine F, Lavergne G, Lebouché M (2001) Evaporating and combusting droplet temperature measurements using two-color laser-induced fluorescence. Exp Fluids 31:45-55.
- [4] Deprédurand V, Miron P, Labergue A, Wolff M, Castanet G, Lemoine F (2008) A temperature-sensitive tracer suitable for two-colour laser-induced fluorescence thermometry applied to evaporating fuel droplets. Measurement Science and Technology 19:105403.
- [5] Lemoine F, Castanet G (2013) Temperature and chemical composition of droplets by optical measurement techniques: A state-of-the-art review. Exp Fluids 54:1-34.
- [6] Lavieille P, Delconte A, Blondel D, Lebouché M, Lemoine F (2004) Non-intrusive temperature measurements using three-color laser-induced fluorescence. Exp Fluids 36:706-716
- [7] Blaisot J, Yon J (2005) Droplet size and morphology characterization for dense sprays by image processing: application to the Diesel spray. Exp Fluids 39:977-994.