

Étude expérimentale de l'évaporation d'un brouillard de gouttelettes dans un écoulement de canal chauffé et turbulent

F. MOREAU^{a,b}, M. MARCHAL^{a,b}, G. COUTEAU^{a,b}, R. BAZILE^{a,b}

*a. Université de Toulouse ; INPT, UPS ; IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse) ;
Allée Camille Soula, F-31400 Toulouse, France*

b. CNRS ; IMFT ; F-31400 Toulouse, France

Résumé :

Résumé

Dans de nombreuses applications industrielles comme dans les turbines aéronautiques ou dans les moteurs à pistons, la dynamique et l'évaporation de spray en écoulement fortement turbulent joue un rôle important. Le but de ce travail est de fournir une base de données sur l'évolution physique d'un spray polydispersé et bi-composants en vue de futures simulations. Une expérience a été conçue afin de créer un écoulement chauffé et turbulent dans lequel des gouttelettes bi-composants sont injectées. La phase porteuse et la phase dispersée sont caractérisées en termes de vitesse et de taille de particules. Le montage expérimental est constitué d'une veine verticale avec des accès optiques. De l'air chaud est injecté dans une chambre de tranquillisation, passe à travers un générateur de turbulence puis est envoyé dans la veine. L'écoulement d'air est caractérisé par anémométrie laser doppler. Ces mesures montrent que pour un écoulement de 2 m/s les niveaux de turbulences dans la zone établie atteignent 40 %. La turbulence possède d'intéressantes propriétés d'isotropie à partir d'une distance égale à quatre fois la largeur de la veine. La phase dispersée est caractérisée avec l'anémométrie phase doppler permettant d'accéder simultanément et pour chaque goutte aux composantes radiale et longitudinale de la vitesse et au diamètre. L'évolution spatiale des fonctions de densité de probabilité des diamètres est ainsi obtenue.

Abstract :

Abstract

Many industrial applications like aeronautical turbines or piston engines, deal with spray dynamics and evaporation. The purpose of this work is to provide a data base for the physical evolution of a polydispersed and bi-component spray, for comparison with future simulations. A model chamber is designed to generate a heated turbulent flow in which two-component droplets are injected. The air flow is described in terms of its velocity field and the liquid phase in terms of droplets diameters and velocities. The experimental setup consists in a vertical channel with optical access. The preheated air (423 K) is injected in a tank at the top of the channel and passes through a turbulence generator. The air flow is characterized using Laser Doppler Velocimetry. These measurements show that for a mean velocity of 2 m/s the turbulence levels are very high : up to 40 % in the area where the flow is established. The turbulence is shown to have isotropic properties after a distance equal to four times the width of the channel. The liquid phase is characterized with Phase Doppler Anemometry (PDA). A PDA-laser with two couples of beams is used, such that the diameters, the longitudinal and the radial velocities can be measured. The spatial evolution of the probability density function (PDF) of the droplet diameter is obtained from these measurements.

Mots clefs : Etude expérimentale, diphasique, évaporation, gouttelettes, turbulence, PDA

1 Cadre de l'étude

Afin de réduire les émissions polluantes issues des chambres de combustions aéronautiques, une meilleure compréhension des phénomènes physiques liées à l'atomisation du liquide, à l'évaporation, et au mélange est nécessaire. Cette étude se focalise sur l'évaporation.

Un des premiers modèles d'évaporation de gouttelettes mono-composant isolées date de Spalding [1]. Il établit que le carré du diamètre de la goutte diminue linéairement avec le temps. Par la suite, de nombreux auteurs ont apporté leur contribution en revenant sur les hypothèses simplifiées du modèle de Spalding afin de les améliorer. Hubbard [2] prend en compte des propriétés physiques variables pour la vapeur entourant la goutte, ce qui affine l'ensemble des calculs des autres grandeurs thermodynamiques. Abramzon et Sirignano [3] étudient l'influence de la convection et introduisent des nombres de Nusselt et Sherwood modifiés. On peut entre autres

citer les travaux numériques de Chiang et Sirignano [4] et expérimentaux de Athasit [5] qui montrent l'impact du sillage induit par les gouttes voisines. De plus la turbulence peut avoir plusieurs influences apparemment contradictoires sur l'évaporation. En effet, elle peut augmenter le taux d'évaporation d'une goutte isolée Birouk et Gökalp [6] mais générer des amas de gouttelettes ce qui a tendance à saturer l'atmosphère en vapeur et bloquer localement l'évaporation [5]. D'autre part plusieurs types de modélisations sont actuellement considérées pour la partie multi-composants de l'évaporation. Sirignano [7] propose un modèle à composants discrets qui prend en compte la fraction massique de chaque composant. C'est un modèle précis mais très pénalisant en temps de calcul. Hallett [8] développe la thermodynamique continue où les composés de même nature sont regroupés et représentés par une fonction de distribution continue. Enfin avec la méthode des moments, McGraw [9] et Marchisio [10], combinent les deux méthodes précédentes. Les composés sont modélisés par des pseudo composants dont la fonction de densité de probabilité est un Dirac dont la position varie au cours du temps.

Ce travail expérimental s'inscrit dans ce cadre. L'objectif est de se placer dans un cas modèle plus simple (température de 420 K et pression atmosphérique) que les chambres de combustion réelles (température de 800 K et pression de 30 à 40 bars). La turbulence créée dans l'expérience est intense, de l'ordre de 40 %, et s'approche du cas de turbulence homogène et isotrope. De plus on se limitera à un mélange bi-composant, octane/3-pentanone, plus simple à étudier que le kérosène. Les expériences présentées ici montrent une caractérisation de l'écoulement porteur et l'évolution des diamètres et des vitesses des gouttelettes au cours de l'évaporation.

2 Dispositif expérimental et techniques de mesures

Le dispositif expérimental permet l'étude de l'évaporation de gouttelettes dans une turbulence ayant des caractéristiques isotropes. La configuration utilisée le plus fréquemment pour ce type d'étude expérimentale est la turbulence de grille, qui donne des intensités turbulentes de l'ordre de 10 %. Or ces intensités sont peu représentatives de la turbulence produite dans une chambre de combustion. Afin de travailler à des intensités plus élevées, un dispositif original, inspiré des travaux de Santavicca et Videtto [11] et de Bédard et al [12], a été mis en place durant un travail précédent [13] réalisé à l'IMFT. Le dispositif initial a été adapté afin d'avoir un meilleur brassage des structures turbulentes. Le montage (Fig.1) est constitué d'une cuve cylindrique qui reçoit, par un orifice situé dans sa partie supérieure, de l'air chauffé. L'air passe ensuite par une plaque circulaire percée de 45 trous de 3 mm. Les jets issus de ces trous viennent alors impacter sur un convergent, ce qui transforme l'énergie à grande échelle en énergie cinétique turbulente de forte intensité. Enfin l'écoulement arrive dans un canal de section carrée de largeur $H = 92$ mm. Ce canal est composé de plusieurs sections amovibles dont l'une est munie de hublots en pyrex et en quartz permettant des accès optiques. Les axes et les vitesses pour l'air et les gouttes sont définis dans le tableau 1. Un injecteur est placé à l'entrée de la veine ($z/H = 0$) afin de créer un brouillard polydispense de gouttelettes. L'injection ultrasonique permet de créer des gouttelettes fines sans pour autant leur donner une vitesse initiale trop importante par rapport à la vitesse débitante.

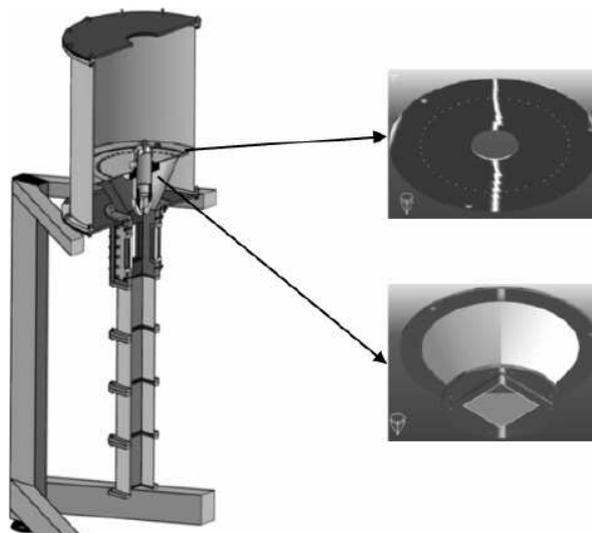


FIG. 1 – Montage expérimental

La vitesse débitante de l'air dans la veine est $W_0 = 2$ m/s avec un nombre de Reynolds turbulent basé sur l'échelle intégrale de 850.

La caractérisation de l'écoulement porteur a été réalisée avec un système d'anémométrie laser doppler (LDA) afin de mesurer les vitesses. Les mesures de vitesses et de diamètres des gouttelettes ont été réalisées par anémométrie phase doppler (PDA).

Axe	vertical, z	radial, y
Vitesse moyenne pour l'air	W	V
Vitesse rms pour l'air	w'	v'
Vitesse moyenne pour les gouttes	W_l	V_l
Vitesse rms pour les gouttes	w'_l	v'_l

TAB. 1 – Définition des axes et des vitesses

Les caractéristiques optiques principales du système de mesure sont explicitées dans le tableau 2.

Optique d'émission LDA		Optique d'émission PDA	
Laser continu Yag		Laser continu Argon	
Longueur d'onde du laser	561 nm - 532 nm	Longueur d'onde du laser	514.5 nm - 488 nm
Diamètre du volume de mesure	510 μm - 480 μm	Diamètre du volume de mesure	290 μm - 280 μm
Longueur du volume de mesure	422 μm - 400 μm	Longueur du volume de mesure	9.39 mm - 8.90 mm
Optique de réception			
Angle de décalage	30°		
Distance focal de la lentille	600 mm		

TAB. 2 – Caractéristiques des systèmes LDA et PDA

3 Résultats

3.1 Caractérisation de l'écoulement porteur

L'écoulement a étéensemencé avec des gouttelettes d'huile d'olive de 1 μm conduisant à des nombres de Stokes basés sur l'échelle intégrale (St_L) et sur l'échelle de Kolmogorov (St_k) faibles assurant que les gouttelettes sont de bons traceurs de l'écoulement : $St_L = 6.5 \cdot 10^{-5}$ et $St_k = 1.7 \cdot 10^{-3}$.

Les profils radiaux de vitesses longitudinales moyennes le long de la veine (Fig. 2) montrent un aplatissement progressif jusqu'à $z/H = 2.4$. A partir de $z/H = 2.4$ la différence entre les bords et le centre est inférieure à 10 %. Il subsiste cependant une légère dissymétrie. De même les profils radiaux de vitesses radiales moyennes (Fig. 2) montrent une dissymétrie dans la zone initiale, puis un aplatissement progressif avec une variation au delà de $z/H = 2.4$ inférieure à 4%.

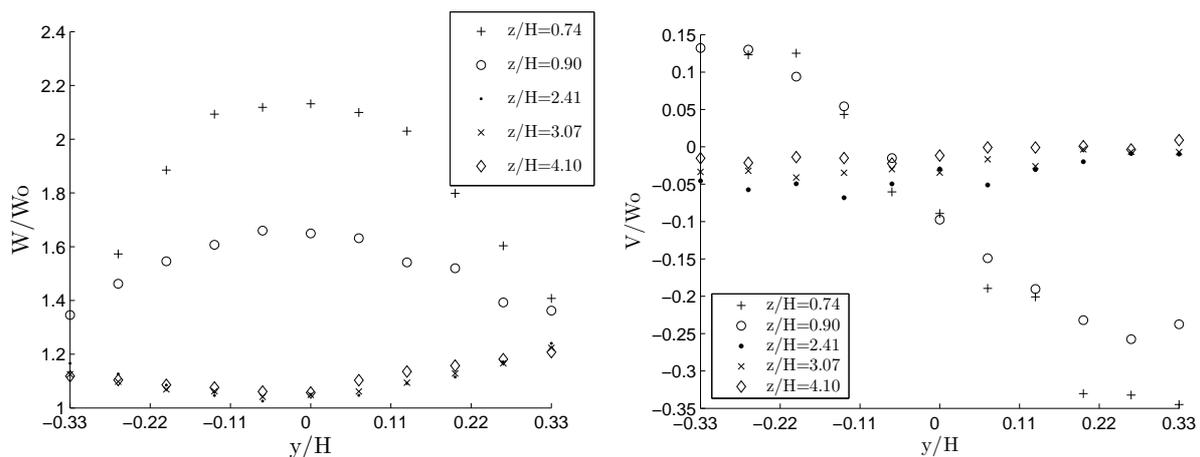


FIG. 2 – Evolution des profils radiaux de vitesses moyennes adimensionnées : (à gauche) longitudinales, (à droite) radiales, en différents points le long de l'axe

Les niveaux de turbulence sont particulièrement élevés (Fig. 3) : de l'ordre de 90% en entrée de veine, ils chutent à 40% à $z/H = 4.1$, zone où les conditions d'isotropie sont les meilleures. En effet les fluctuations de vitesses adimensionnées le long de l'axe (Fig. 3) deviennent rapidement du même ordre de grandeur et sont pratiquement confondues à partir de $z/H = 4.1$.

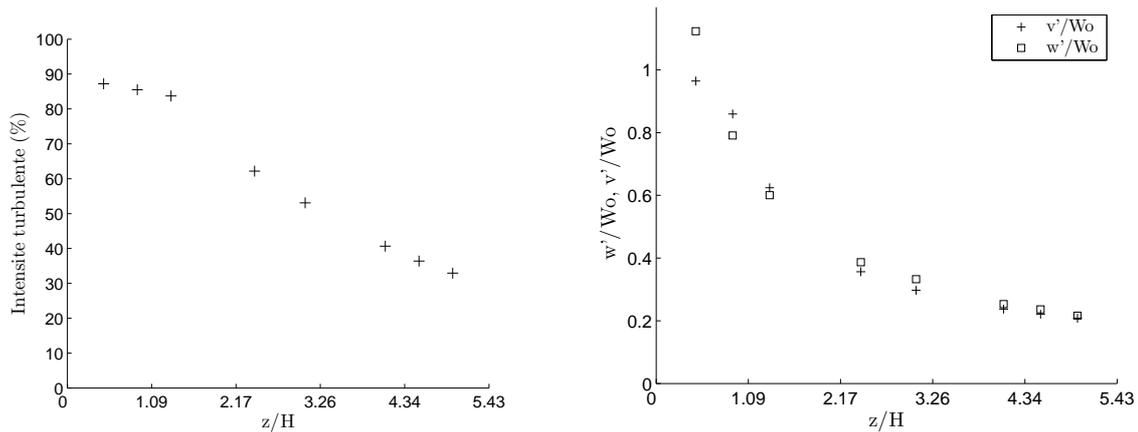


FIG. 3 – (à gauche) Evolution longitudinale de l'intensité turbulente, (à droite) Evolution longitudinale des fluctuations de vitesses

3.2 Caractérisation de la phase dispersée

Conditions expérimentales

- La phase porteuse : air à 423 K en entrée de veine et une vitesse débitante de 2 m/s soit un débit $\dot{m}_g = 14.1$ g/s.
- La phase dispersée : mélange liquide d'octane et de 3-pentanone dans la proportion 85%/15% en volume et à un débit de $\dot{m}_l = 0.41$ g/s.
- Chargement massique : $\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g} = 2.9$ %

Discussion La technique PDA donne accès pour chaque goutte, effectivement mesurée passant à travers le volume de mesure, à ses deux composantes de vitesse : longitudinale et radiale et à son diamètre. La mesure permet d'accéder à l'évolution longitudinale et radiale de ces grandeurs dans la veine et en particulier le classement des vitesses en fonction de la taille des gouttes.

L'évolution longitudinale, sur l'axe, de la fonction de densité de probabilité (pdf) des diamètres (Fig.4) montre une diminution de la proportion des petites gouttes au profit des grosses. En effet les petites gouttes, du fait de leur diamètre et de leur inertie thermique plus faibles, ont un temps d'évaporation plus court. Or dans ces conditions les phénomènes d'atomisation secondaire sont négligeables. En effet dans le cas le plus défavorable, avec la plus grande vitesse de cisaillement (6 m/s) et les plus grosses gouttes (300 μm), les nombres de Weber restent inférieurs à 1. Or la rupture n'a lieu qu'à partir de 12. Pour ce qui est des phénomènes de coalescence, la quantification est bien plus complexe et des études sont en cours. Les mesures ont été effectuées sur l'axe ; une explication possible de cette évolution est que les petites gouttelettes sont portées par la turbulence hors de l'axe ce qui entraîne cette diminution apparente du diamètre de Sauter (D_{32}). Cependant l'évolution radiale du D_{32} (Fig.4) en deux points de l'axe longitudinal montre que cette diminution se retrouve sur tout le profil radial, il ne s'agit donc pas d'un simple effet aérodynamique.

Pour la suite de l'étude, on s'intéressera aux propriétés des gouttelettes par classe de taille. Trois classes sont donc définies : de 0 à 40 μm , de 40 à 140 μm et de 180 à 300 μm . Pour avoir un ordre de grandeur le tableau 3 expose les nombres de Stokes basés sur l'échelle intégrale et sur l'échelle de Kolmogorov pour différents diamètres. La variété des nombres de Stokes est telle que les gouttelettes présenteront des comportements dynamiques bien différents dans l'écoulement.

d(μm)	20	100	200	300
St_L	0.025	1.1	2.96	5.96
St_k	0.83	35	98	175

TAB. 3 – Nombre de Stokes suivant la taille des gouttelettes

La figure 5 est une mesure sur l'axe à $z/H = 0.49$. Les gouttelettes ont été regroupées par classe de 40 μm pour des diamètres de 0 à 300 μm . A chaque classe correspond donc un nombre de Stokes (St_L) qui est reporté en abscisse. Le rapport des fluctuations moyennes des gouttes et de l'air, w'_l/w' , est alors tracé en fonction du nombre de Stokes. Une grande variété de comportement est observée. Les gouttelettes les moins inertielles ont un comportement proche du gaz, leur nombre de Stokes tend vers 1 en revanche les gouttes les plus inertielles subissent peu les fluctuations, leur nombre de Stokes tend vers 0. Les rapports w'_l/w' et v'_l/w' sont ensuite

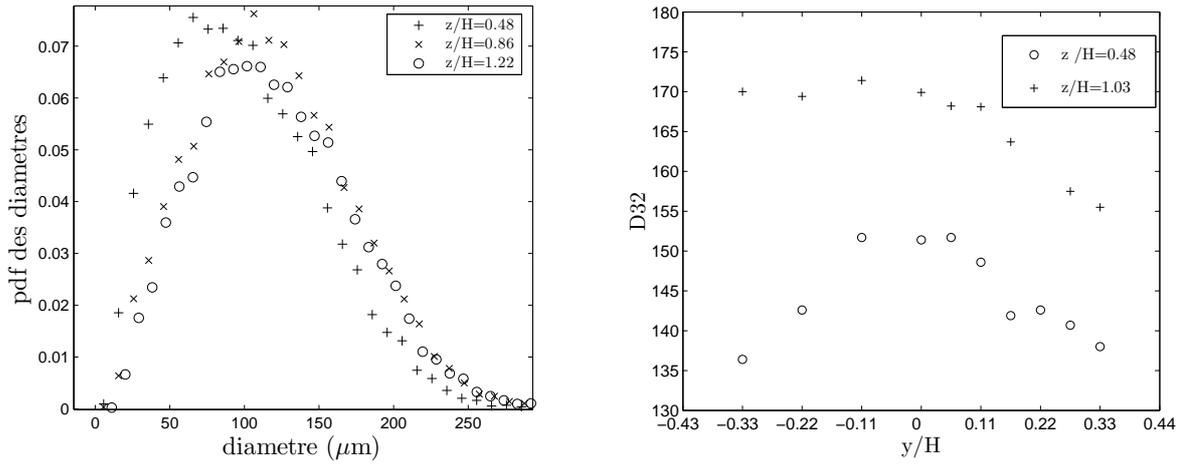


FIG. 4 – (à gauche) Evolution longitudinale de la pdf des diamètres, (à droite) Evolution radiale du D_{32} à $z/H = 0.48$ et $z/H = 1.03$

tracés pour les trois classes de taille précédemment définies sur un demi profil à $z/H = 0.49$. Il est notable que les profils sont relativement plats ce qui indique que les particules fluctuent de manière homogène le long de la section. De plus les fluctuations radiales et longitudinales sont quasi superposables par classe, ce qui est une indication d'isotropie.

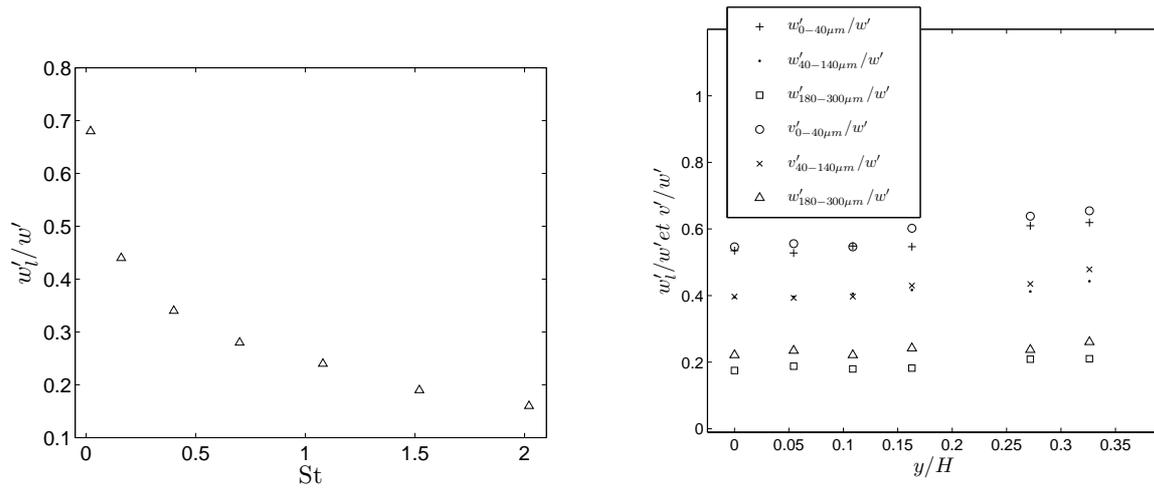


FIG. 5 – (à gauche) Evolution du rapport w'_l/w' en fonction de St à $z/H = 0.49$, (à droite) Profil radial à $z/H = 0.49$ de w'_l/w' et v'_l/w' pour les 3 classes de taille

La zone considérée dans la figure 6 est la zone dans laquelle l'écoulement s'établit. De ce fait, sur l'axe il y a une forte diminution de la vitesse longitudinale de l'air. Les gouttelettes sont injectées dans l'écoulement avec une vitesse de 0.5 à 1 m/s. On observe deux phases :

- Une première phase d'accélération durant laquelle l'air transfère de la quantité de mouvement aux gouttes. Les plus petites gouttes à faible nombre de Stokes se mettent plus rapidement à la vitesse de l'air que les grosses.
- Une seconde phase de décélération. Une fois que les gouttes ont atteint la vitesse de l'air, elles suivent sa décélération plus ou moins rapidement en fonction de leur inertie.

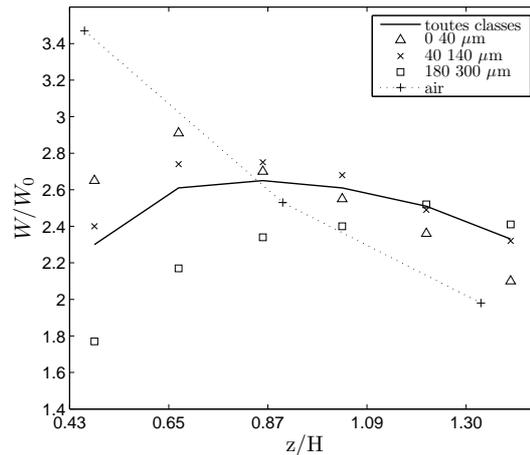


FIG. 6 – Evolution axiale de W pour l'air et les gouttes par classe de taille

Perspectives Ce travail présente un dispositif permettant de générer une turbulence intense avec de bonnes conditions d'isotropie. L'étude de l'évolution des diamètres et des vitesses des gouttelettes au cours de l'évaporation est explicitée. Les études en cours s'attachent à quantifier cette évolution suivant différents paramètres tels que la température de la phase porteuse, le chargement massique, la quantité de 3-pentanone dans la phase liquide. En effet le 3-pentanone étant fluorescent dans l'ultra-violet alors que l'octane ne l'est pas, il est possible d'avoir accès à son flux dans la phase liquide grâce à la Fluorescence Laser Induite (LIF). Enfin dans la zone, plus éloignée de l'injection, où les gouttelettes sont évaporées l'étude du mélange de la phase vapeur du 3-pentanone va être menée par LIF.

Remerciements Les auteurs voudraient remercier E. Cid et S. Cazin du service Signaux et Images de l'IMFT, J.-P. Escafit, L. Mouneix et J.-M. Sfedj de l'atelier de Conception et Fabrication Mécanique ainsi que le CNRS et l'ONERA pour leur support financier.

Références

- [1] Spalding . Combustion of fuel particles. *Fuel*, 30, 1951.
- [2] Hubbard G., Denny V., and Mills A. Droplet evaporation : Effects of transients and variable properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(9), 1003–1008, September 1975.
- [3] Abramzon B. and Sirignano W. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(9), 1605–1618, September 1989.
- [4] Chiang C. and Sirignano W. Axisymmetric calculation of three droplets interactions. *Atomization and Sprays*, 3, 91–107, 1993.
- [5] Atthasit A. Etude expérimentale des phénomènes d'interaction dans les jets diphasiques denses au moyen des jets rectilignes monodisperses. PhD thesis, ENSAE, 2003.
- [6] M. Birouk I. G. Current status of droplet evaporation in turbulent flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32, 408–423, 2006.
- [7] Sirignano W. *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*. Cambridge Univ Press, 1999.
- [8] Hallett W. L. H. A simple model for the vaporization of droplets with large numbers of components. *Combustion and Flame*, 121(1-2), 334–344, April 2000.
- [9] McGraw R. Description of aerosol dynamics by the quadrature method of moments. *Aerosol Science and Technology*, 27, 255 – 265, 1997.
- [10] Marchisio D. L. and Fox R. O. Solution of population balance equations using the direct quadrature method of moments. *Journal of Aerosol Science*, 36(1), 43–73, January 2005.
- [11] Videto B. D. and Santavicca D. A. A turbulent-flow system for studying turbulent combustion processes. *Combustion Science And Technology*, 76(1-3), 159–164, 1991.
- [12] Bédard B. and Cheng R. K. Experimental study of premixed flames in intense isotropic turbulence. *Combustion and Flame*, 100(3), 485–494, February 1995.
- [13] Cochet M. Evaporation de gouttelettes polydispersées dans un écoulement de canal fortement turbulent. Analyse de la formation du mélange diphasique par image de fluorescence. PhD thesis, INPT, 2007.