



HAL
open science

Étude expérimentale de l'évaporation de gouttelettes bicomposant

Adrien Jean, Rudy Bazile, Bernard Ferret

► **To cite this version:**

Adrien Jean, Rudy Bazile, Bernard Ferret. Étude expérimentale de l'évaporation de gouttelettes bicomposant. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440004

HAL Id: hal-03440004

<https://hal.science/hal-03440004v1>

Submitted on 22 Nov 2021

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.

Étude expérimentale de l'évaporation de gouttelettes bicomposant



A. Jean^a, R. Bazile^a, B. Ferret^a

a. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse ; Université de Toulouse

Résumé :

Nous souhaitons affiner la compréhension de phénomènes qui ont lieu dans une chambre de combustion aéronautique, dans laquelle des gouttes de carburant multicomposant sont injectées. Pour cela, on s'intéresse en particulier à l'influence de la présence d'un alcool dans le mélange liquide sur son évaporation. Une expérience modèle pour l'étude d'écoulements diphasiques turbulents a été conçue à cet effet. Le banc expérimental permet de générer dans un canal un écoulement d'air chauffé fortement turbulent et présentant des propriétés de turbulence homogène isotrope. Un spray de gouttelettes polydispersées de liquide bicomposant acétone/éthanol est généré dans cet écoulement. Une campagne expérimentale de fluorescence induite par plan laser a été entreprise afin de caractériser les régimes d'évaporation en fonction de la composition du mélange liquide. Les concentrations instantanées de la phase vapeur d'acétone sont extraites de cette campagne.

Abstract :

In order to better understand the phenomena that occur in a jet engine combustion chamber, in which multi-component fuel droplets are injected, we focus in this study on the influence of the presence of an alcohol in the fuel mixture upon its vaporization. A model experiment meant for the study of turbulent two-phase flows has been designed at IMFT. The test bench enables to create in a canal a heated, highly turbulent air flow with good properties of homogeneous and isotropic turbulence. A spray of polydispersed bi-component acetone/ethanol fuel droplets is injected coaxially in this flow. Measurements are conducted using planar laser-induced fluorescence to characterize the droplets' evaporation regimes as a function of the fuel composition. Instantaneous acetone vapor concentrations are extracted from these measurements.

Mots clefs : écoulement diphasique turbulent ; évaporation de gouttes bicomposant ; fluorescence induite par plan laser

1 Introduction

Cette étude se situe dans le contexte où les industriels du secteur aéronautique sont contraints de concevoir des moteurs moins gourmands en énergie et respectant des normes environnementales de plus en plus strictes. Pour cela il est nécessaire d'affiner la compréhension de phénomènes qui ont lieu dans une chambre de combustion, dans laquelle des gouttes de carburant sont injectées et vaporisées.

En particulier, on souhaite mieux comprendre l'influence du caractère multicomposant des carburants sur l'évaporation des gouttes et on s'intéresse ici à l'effet de la présence d'un alcool dans le mélange liquide bicomposant (acétone/éthanol). Récemment, les travaux d'Ammigan *et al.* (2012) [1] ont montré que pour des gouttes de ce mélange, l'acétone s'évapore plus vite que dans le cas de gouttes monocomposant.

De tels effets doivent être correctement pris en compte dans les modèles d'évaporation multicomposant. D'autre part, les écoulements rencontrés dans les chambres de combustion des turboréacteurs sont fortement turbulents. L'effet de la turbulence sur l'évaporation a fait l'objet de plusieurs études dans

la littérature récente, incluant notamment les travaux de Rauch *et al.* (2009) [7] et de Réveillon & Demoulin [8] (2007). Ces deux aspects sont pris en compte dans l'étude expérimentale en cours à l'IMFT.

Une expérience modèle pour l'étude d'écoulements diphasiques turbulents a été conçue à cet effet à l'IMFT (travaux de Cochet (2007) [3]) et permet de générer dans un canal un écoulement d'air chauffé fortement turbulent et présentant des propriétés de turbulence homogène isotrope. Un brouillard de gouttelettes polydispersées de liquide bicomposant (acétone et éthanol) est généré dans cet écoulement.

Dans un premier temps, le dispositif expérimental et les moyens métrologiques mis en place sont décrits. On présente ensuite succinctement les caractéristiques de l'écoulement porteur et du spray avant d'exposer et de discuter les premiers résultats quant à l'influence de l'alcool sur l'évaporation des gouttes.

2 Dispositif expérimental et métrologie

2.1 Dispositif expérimental

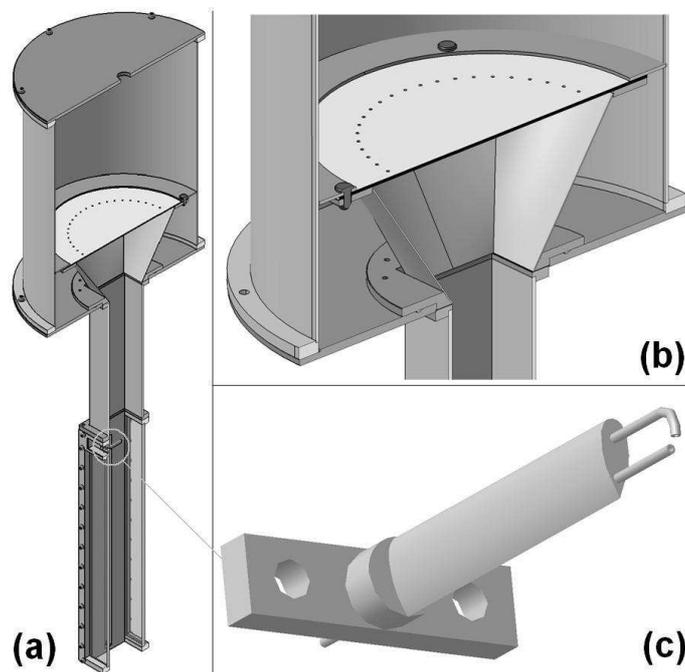


FIGURE 1 – Banc expérimental : (a) vue générale, (b) génération d'un écoulement d'air turbulent, et (c) injecteur.

Le banc expérimental (figure 1 (a)), légèrement modifié par rapport aux travaux de Cochet *et al.* (2009) [4] et de Moreau & Bazile (2012) [6], permet de créer dans un canal un écoulement d'air chauffé fortement turbulent et présentant des propriétés proches de la turbulence homogène isotrope. Un brouillard de gouttes polydispersées est généré dans cet écoulement.

Pour cela, l'air est chauffé au moyen d'une lampe avant d'entrer dans une cuve cylindrique à l'intérieur de laquelle se trouvent une plaque percée (de 45 trous de 3 mm de diamètre régulièrement espacés et situés à 125 mm du centre de la plaque) et un convergent rond-carré qui fait le lien entre la cuve cylindrique et la veine d'essai de section $H^2 = 92 \times 92 \text{ mm}^2$ et équipée de larges accès optiques.

Les jets d'air créés par les orifices de la plaque percée impactent sur le convergent. Les structures aux grandes échelles sont ainsi détruites pour être transformées en énergie cinétique turbulente d'intensité élevée (Bédard & Cheng (1995) [2]), à des niveaux supérieurs à la turbulence de grille (de l'ordre de 20% en zone établie).

Afin de générer un brouillard de gouttelettes polydispersées dans la zone établie de la turbulence, un injecteur peu intrusif dont le détail est visible sur la figure 1 (c) et inspiré des travaux de Lázaro & Lasheras (1989) [5] est implanté dans la veine d'essai à une distance de $4H = 368\text{ mm}$ du début de celle-ci et de manière à ce que le point d'injection soit au centre de la veine. Celui-ci sera pris pour origine du repère orthonormé utilisé dans la suite, l'axe Oz étant orienté dans le sens de l'écoulement.

L'injecteur consiste en deux tubes très fins ($500\ \mu\text{m}$ de diamètre intérieur) en inox, l'un transportant le carburant liquide et l'autre l'air. Le tube transportant l'air est coudé avec un angle de 90° à sa sortie et orienté de telle manière que le jet d'air impacte le jet liquide, provoquant l'atomisation de celui-ci en un spray de fines gouttelettes, coaxial à l'écoulement porteur.

2.2 Métrologie

Les résultats présentés dans la section suivante ont été obtenus grâce à trois techniques de diagnostics laser permettant d'accéder aux grandeurs physiques utiles à l'analyse de l'évaporation des gouttelettes bicomposants : anémométrie laser Doppler (ADL), anémométrie phase Doppler (PDA) et fluorescence induite par plan laser (PLIF).

On utilise l'ADL pour caractériser l'écoulement porteur ; les mesures sont effectuées à température ambiante et au moyen d'un ensemencement de traceurs microscopiques. Une source laser et une chaîne d'acquisition Dantec Dynamics donnent accès à deux composantes de la vitesse de l'écoulement : la composante axiale (suivant Oz) et une des deux composantes radiales (suivant Oy) à partir respectivement des vitesses instantanées W_i et V_i , $i = 1..N$, des N traceurs passant dans le volume de mesure. Le déplacement de ce dernier dans la veine permet de mesurer les évolutions axiale (Oz) et radiales (dans les deux directions Ox et Oy) de V et W .

La PDA fournit la mesure simultanée taille/vitesse des gouttelettes à l'injection. La mesure est réalisée dans un environnement au repos et à température ambiante.

La PLIF est utilisée pour caractériser l'évolution de l'évaporation des gouttes dans l'écoulement diphasique. Un laser Nd:YAG et un montage optique permettent de produire une nappe laser de longueur d'onde 266 nm , laquelle éclaire l'écoulement diphasique. Or l'acétone est une espèce fluorescente : excitée par cette lumière, elle en réémet une à une longueur d'onde plus élevée. Un filtre passe-bande BG25 monté sur la caméra intensifiée Princeton Instruments PI-MAX2 permet à celle-ci de ne voir que le signal de fluorescence. Après étalonnage, la technique permet de déduire de l'intensité de ce signal la concentration de vapeur d'acétone dans la veine d'essai. Le traitement d'images est important et consiste entre autre à discriminer les phases vapeur et liquide (on pourra se reporter à Moreau & Bazile (2012) [6] pour plus de détails).

3 Résultats et discussions

3.1 Phase porteuse

L'écoulement porteur a fait l'objet d'une étude expérimentale dans Cochet *et al.* (2009) [4], sur le même banc expérimental et dans la même configuration, par la technique de vélocimétrie par images de particules (PIV). Nos résultats présentant un très bon accord avec ces derniers, on se reportera à [4] pour de plus amples détails sur les caractéristiques de l'écoulement porteur.

La figure 2 représente l'évolution axiale des fluctuations turbulentes w' et v' des vitesses axiale et radiale normalisées par la vitesse débitante $W_0 = 2\text{ m/s}$. Ces moments d'ordre 2 sont définis comme la moyenne quadratique des fluctuations de vitesse :

$$w' = \sqrt{\overline{w_i^2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_i - \overline{W})^2}$$

où $\overline{W} = \frac{1}{N} \sum_i W_i$. On observe sur le graphe une forte décroissance des niveaux de fluctuations turbulentes depuis l'entrée de la veine jusqu'à $z/H \approx -2$ puis une décroissance plus lente. Au point d'injection du brouillard de gouttelettes ($z/H = 0$) on est à un peu plus de 25% en $z/H = 0$ et à près

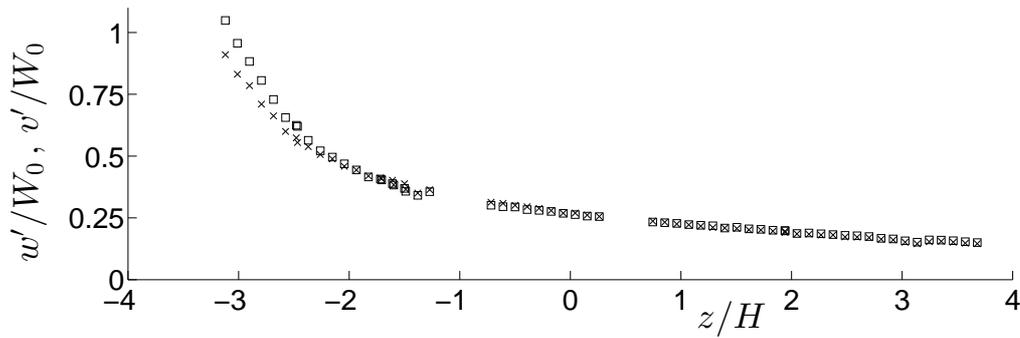


FIGURE 2 – Évolution axiale des fluctuations de vitesses axiale (carrés) et radiale (croix) de l'écoulement porteur, normalisées par W_0 .

de 15% pour le dernier point de mesure, en $z/H \approx 3.7$. On montre que l'écoulement devient quasi homogène et isotrope vers $z/H = 0$. Le nombre de Reynolds de l'écoulement basé sur la largeur de la veine et la vitesse débitante est $Re_H = W_0 H / \nu_{air} = 11800$.

3.2 Phase dispersée

On injecte un débit-masse liquide de 0.21 g/s et il faut pour l'atomiser un débit-masse d'air de 0.05 g/s . Ces débits étant sensibles, des débitmètres-régulateurs de précision assurent leur constance. La figure 3 représente les distributions de vitesses et de tailles des gouttes du spray, dans un volume de mesure situé sur l'axe du spray et à 20 mm en aval du point d'injection. Les diamètres caractéristiques correspondant à ce point de mesure sont $d_{10} = 22 \mu\text{m}$ et $d_{32} = 50 \mu\text{m}$; la vitesse moyenne est $\bar{W} = 7 \text{ m/s}$ et la RMS de fluctuation de vitesse $w' = 4 \text{ m/s}$. La large gamme de taille de gouttes assure une grande variété de comportements de celles-ci vis à vis de la turbulence.

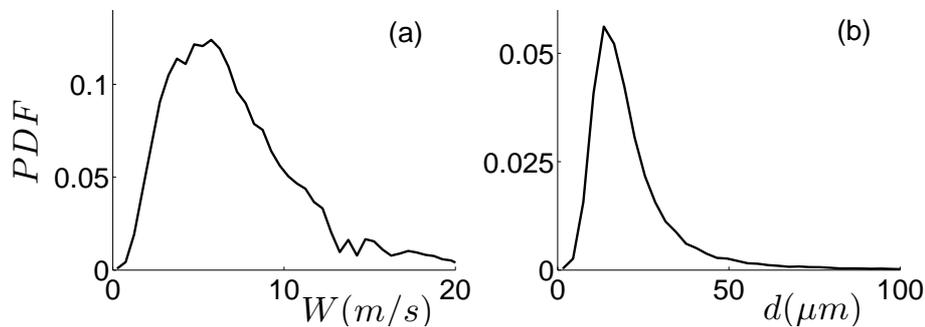


FIGURE 3 – Distributions (a) de vitesses et (b) de tailles des gouttes, sur l'axe du spray à 20 mm du point d'injection.

3.3 Influence du solvant sur l'évaporation de l'acétone

Les paramètres de l'écoulement diphasique sont les suivants : l'écoulement porteur a une vitesse débitante $W_0 = 2 \text{ m/s}$ et est à une température de 100°C , pour un débit-masse d'air de 16 g/s . On injecte le liquide à température ambiante avec un débit-masse de 0.21 g/s , et il faut pour l'atomiser un débit-masse d'air de 0.05 g/s , également à température ambiante. Deux compositions liquide sont comparées : acétone seule et mélange acétone/éthanol dans les proportions 50%-50% (en masse).

La figure 4 représente les profils radiaux (suivant Ox ; $y = 0$) de concentration de vapeur d'acétone pour les deux compositions liquide et en trois positions axiales. Dans le cas du mélange, la concentration mesurée est multipliée par deux afin de pouvoir mieux comparer les mesures et mettre en valeur l'influence de l'éthanol.

Sans tenir compte de la composition du mélange, on voit que ces profils sont de plus en plus plats

quand z augmente : ceci illustre le mélange turbulent de la vapeur avec l'écoulement porteur. En $z/H = 2$ (figure 4 (a)), on est proche de l'injection ; le spray étant injecté en $x = 0$ il est cohérent que la vapeur soit plus concentrée au centre de la veine que près des parois. En $z/H = 3.3$ (b) la différence de concentration est atténuée tandis qu'en $z/H = 5.4$ (c) elle n'existe plus, le mélange est réalisé. On explique un peu plus loin pourquoi la concentration paraît plus élevée pour les x positifs que pour les x négatifs.

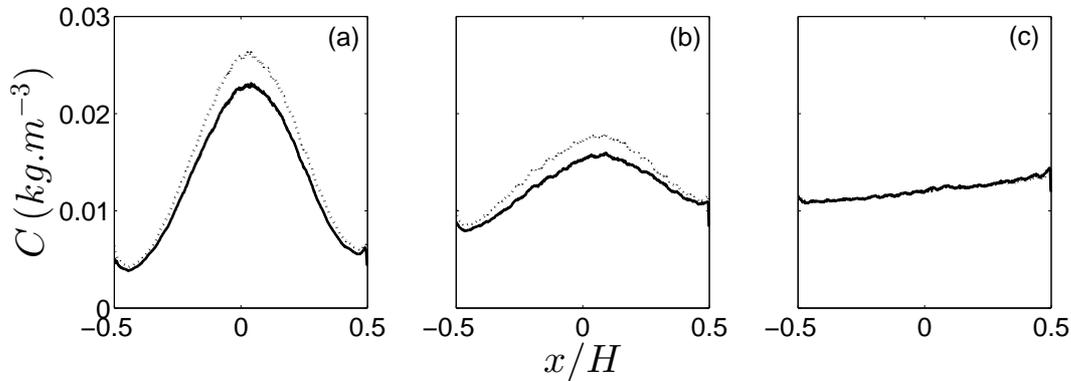


FIGURE 4 – Profils radiaux ($y = 0$) de concentration de vapeur d'acétone pour deux compositions liquide (lignes continues : acétone ; lignes pointillées : mélange éthanol-acétone) en trois positions axiales : (a) $z/H = 2$, (b) $z/H = 3.3$ et (c) $z/H = 5.4$.

L'influence du solvant sur l'évaporation de l'acétone est illustrée sur les figures 4 (a) et (b) : le profil *doublé* de concentration de vapeur du mélange est supérieur au profil de concentration de vapeur pour l'acétone seule. En $x/H = 0$, la différence est de 13.8% en $z/H = 2$ et de 12.4% en $z/H = 3.3$, ce qui montre que l'acétone s'évapore plus vite lorsqu'elle est mélangée à de l'éthanol. Sur la figure 4 (c) les deux courbes se superposent : c'est logique car on est loin de l'injection et l'évaporation est quasi-complète.

Il est à noter que la source laser éclaire l'écoulement par les x positifs. Ceci est à l'origine des valeurs plus élevées pour les x positifs que pour les x négatifs car l'intensité de la lumière du laser est absorbée par le milieu qu'elle traverse, dans notre cas par la vapeur d'acétone, et donc diminue avec le trajet optique. Il s'ensuit que l'intensité du signal de fluorescence enregistré par la caméra diminue de la même manière. Il y a donc un biais de mesure dans la concentration de vapeur (valeurs sous-estimées) qu'il est possible de corriger.

L'étalonnage de la concentration de vapeur a consisté à injecter un débit connu d'acétone pré-vaporisée et pré-mélangée à l'écoulement porteur dans la veine d'essai. Ce procédé est répété pour plusieurs couples de débit d'air et d'acétone afin de s'assurer de la validité des résultats. On en déduit un coefficient moyen reliant l'intensité du signal de fluorescence reçu par la caméra au débit-masse injecté d'acétone. Connaissant la vitesse débitante de l'écoulement et la section de la veine d'essai, on en déduit la concentration de vapeur $C = \dot{m}/(W_0 H^2)$ en fonction de l'intensité du signal. Ces travaux sont à poursuivre afin d'affiner l'étalonnage, ce qui permettrait également de corriger le biais cité plus haut dû à l'absorption de la lumière par l'acétone.

Cependant, ces résultats intermédiaires montrent sans ambiguïté que la présence de l'éthanol dans le mélange liquide accélère l'évaporation de l'acétone. Des calculs d'évaporation mono- et bicomposant à partir de modèles simples sont en cours afin de comprendre cet effet.

4 Conclusions et perspectives

Dans le but d'affiner la compréhension de phénomènes ayant lieu dans les chambres de combustion aéronautiques, une étude expérimentale a été menée afin de comprendre l'influence du caractère multicomposant des carburants sur l'évaporation des gouttes. On s'est intéressé ici à l'effet de la présence d'un alcool dans un mélange liquide bicomposant acétone/éthanol.

Des résultats encourageants montrent que la vaporisation de l'acétone est accélérée en présence d'éthanol. Ces travaux sont à poursuivre afin de corriger certains biais et de mesurer l'influence sur l'évaporation de paramètres comme la température de l'écoulement ou la composition du mélange dans des proportions différentes. Ces résultats devront ensuite être comparés à des modèles d'évaporation afin de comprendre l'origine de cet effet. De plus, des calculs de simulation aux grandes échelles de l'écoulement diphasique, reprenant la configuration expérimentale décrite ici, sont en cours à l'IMFT et devraient aider à compléter sa compréhension.

Remerciements Les auteurs expriment toute leur gratitude à MM. C. Korbuly, M. Marchal, S. Cazin et J.-M. Sfedj de l'IMFT et à la Fondation EADS, sans le soutien de laquelle ces travaux n'auraient pas vu le jour.

Références

- [1] Ammigan, K., Miller, R., Clack, H. 2012 Effect of asymmetric radiant heating on monodisperse acetone/ethanol and acetone/2-propanol bi-component droplets. *International Journal of Multiphase Flow* **38** 67-72
- [2] Bédard, B., Cheng, R.K 1995 Experimental study of premixed flames in intense isotropic turbulence. *Combustion and Flame* **100** 485-494
- [3] Cochet, M. 2007 Évaporation de gouttelettes polydispersées dans un écoulement de canal fortement turbulent. Analyse de la formation du mélange diphasique par imagerie de fluorescence. *Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*
- [4] Cochet, M., Bazile, R., Ferret, B., Cazin, S. 2009 Evaporation of polydispersed droplets in a highly turbulent channel flow. *Experiments in Fluids* **47** 379-394
- [5] Lazaro, B.J, Lasheras, J.C 1989 Particle dispersion in a turbulent, plane, free shear layer. *Phys. Fluids A* **1** 1035-1044
- [6] Moreau, F., Bazile, R. 2012 Evaporation of bi-component droplets in a heated, highly turbulent flow. *Experiments in Fluids* **53** 331-342
- [7] Rauch, B., Calabria, R., Chiariello, F., Le Clercq, P., Massoli, P., Rachner, M. 2011 Accurate analysis of multicomponent fuel spray evaporation in turbulent flow. *Experiments in Fluids* **52** 935-948
- [8] Reveillon, J., Demoulin, F.X 2007 Effects of the preferential segregation of droplets on evaporation and turbulent mixing. *Journal of Fluid Mechanics* **583** 273-302