

ADAPTATION D'UNE MÉTHODE DE PTV POUR LES GOUTTES DE COMBUSTIBLE S'ÉVAPORANT À PROXIMITÉ D'UNE FLAMME

Gaël Parant^{a,*}, Laurent Zimmer^a, Antoine Renaud^a, Franck Richecoeur^a

(a) Laboratoire EM2C, Université Paris Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France

*Correspondant: gael.parant@centralesupelec.fr

Résumé : Mesurer le temps et la durée d'évaporation des gouttes de carburant permet de mieux comprendre la dynamique du spray. Lorsqu'une goutte s'évapore, il est de plus en plus difficile de la détecter, et donc de la suivre avec un algorithme de vélocimétrie par suivi de particules (PTV). Pour résoudre ce problème, les algorithmes classiques de PTV ont été adaptés en exploitant l'image de la goutte à l'image N pour la retrouver à l'image N+1. De plus, l'imagerie interférométrique en défaut de mise au point a été utilisée pour mesurer la taille physique des gouttes à partir des images collectées pour la PTV. Ce nouvel algorithme a été appliqué à un brûleur à contre-courant avec des gouttelettes s'évaporant sur une flamme air-méthane. La vélocimétrie par images de particules (PIV) a été utilisée pour mesurer le champ de vitesse de l'air et le champ de température par mesure de Rayleigh. Le traitement des données collectées pendant l'expérience montre que l'algorithme PTV a suivi les gouttes pendant toute leur phase d'évaporation, ce qui aurait été très difficile pour un algorithme PTV classique. De plus, comme les gouttes s'évaporent dans un environnement à haute température, il est impossible de suivre leur taille physique à partir des ILIDS obtenus avec une source laser continue.

1 Introduction

Dans les moteurs actuels le carburant est injecté sous forme de spray. Les flammes spray sont complexes à étudier puisqu'elles sont pilotées par de nombreux phénomènes physiques comme le temps de réaction du combustible, l'ensemble des phénomènes liés à l'écoulement des gaz qui sont complexifiés par les forts gradients de températures et également le changement des phases du combustible qui doit s'évaporer avant de brûler.

Une bonne compréhension de la dynamique du spray et de son évaporation est nécessaire pour comprendre la stabilité des flammes spray. En effet, l'écoulement va transporter le spray et cela va créer des zones privilégiées d'évaporation qui créeront des poches riches en carburant. La forme et la composition de ces poches riches vont être déterminantes sur la stabilité des flammes. Ces poches, étant alimentées par l'évaporation du combustible liquide, le délai d'évaporation et les zones d'évaporation sont des éléments clés à comprendre pour étudier la dynamique de ces poches.

Les grandeurs cibles auxquelles il nous faut avoir accès sont la distance et le temps d'évaporation. Ainsi, il faut avoir la capacité à suivre des gouttes à proximité d'une flamme pour voir comment évolue ces grandeurs. De plus, ces grandeurs vont grandement dépendre du diamètre des gouttes. Une mesure qui couple le suivi de l'évaporation et la mesure de la taille des gouttes serait un vrai plus pour analyser l'évaporation.

Cependant, suivre des gouttes qui s'évaporent à proximité d'un front de flamme nécessite un volume de mesure conséquent par rapport à la taille d'une

goutte. Ainsi la technique de mesure doit avoir un recul suffisant pour voir l'ensemble du volume tout en pouvant mesurer la taille des gouttes. Cela exclut les techniques de mesure de diamètre avec une image focalisée des gouttes.

De plus, la technique de suivi des gouttes ne peut pas se reposer sur les propriétés du gaz environnant à cause des forts gradients de température et de composition. En effet les gouttes s'évaporent rapidement lorsqu'elles pénètrent dans les flammes. La frontière entre les gaz brûlés et gaz frais est une zone de gradient très fort avec, par exemple, une densité qui varie d'un facteur 5 sur quelques millimètres.

Pour notre étude, nous avons choisi de nous baser sur la mesure PTV 2D (vélocimétrie par suivi de particules) couplée à l'ILIDS (imagerie interférométrique en défaut de mise au point) pour la mesure du diamètre. Cette technique a l'avantage de permettre un grand volume de mesure pour suivre les gouttes sur toute leur phase d'évaporation et en même temps de mesurer le diamètre des gouttes en se reposant uniquement sur les propriétés physiques de la goutte et la configuration expérimentales.

Cependant, lorsqu'une goutte s'évapore, la diminution de sa taille rend difficile sa détection, d'autant plus lorsque la trajectoire des gouttes ne peut être prédite. Il est donc difficile de la suivre avec un algorithme classique PTV.

Pour résoudre ce problème, nous avons adapté les algorithmes classiques de PTV en exploitant l'image de la goutte à l'image N pour la retrouver à l'image N+1. Simultanément au suivi des gouttes, de la granulométrie par ILIDS est utilisée pour la mesure de

la taille initiale des gouttes et déterminer l'instant du début de l'évaporation.

Dans un premier temps, nous présenterons le banc expérimental sur lequel nous allons appliquer notre diagnostic PTV, puis l'algorithme sera détaillé et finalement 3 cas d'application seront présentés pour montrer les grandeurs que l'algorithme est capable de mesurer :

1. Évaporation d'un spray de dodécane
2. Comparaison avec un modèle numérique de la configuration
3. Évaporation d'un spray d'hexadécane

2 Configuration expérimentale

2.1 Banc expérimental

Le banc expérimental permettant de mettre en œuvre notre algorithme est un brûleur contre-courant présenté sur la figure 2.

Le brûleur du bas injecte un mélange d'air et de méthane à une richesse de 0.91 et $Re = 1430$ à travers

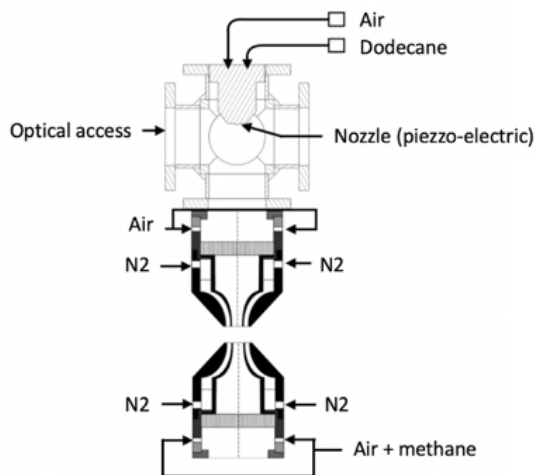


Figure 2- Banc expérimental

une buse de 20 mm. Ce mélange est protégé par un co-courant d'azote. Le brûleur du bas permet de générer une zone de gaz brûlés dans lesquels les gouttes vont s'évaporer.

Le brûleur du haut, similaire au brûleur du bas, injecte de l'air contenant des gouttes de combustible à $Re = 950$. Le combustible est injecté par un injecteur ultrason et un pousse seringue permettant de régler le débit. La part des gouttes est suffisamment faible pour que ce mélange ne s'enflamme pas. La distance entre les deux brûleurs est de 52mm.

2.2 ILIDS

La mesure ILIDS est réalisée grâce à une nappe laser continue à 532nm de 1mm d'épaisseur et une caméra rapide placée à 60° du plan de la nappe laser.

La caméra acquiert des images de 720x504 pixels à une fréquence de 20kHz et un temps d'exposition de 1/20000s. Elle est équipée d'un zoom Nikon de

105mm permettant d'obtenir l'image délocalisée des gouttes de dodécane.

En appliquant la formule proposée par Damaschke [1], nous obtenons qu'en multipliant le nombre de frange de l'image défocalisée des gouttes par $4.9\mu\text{m}$ nous pouvons remonter au diamètre physique des gouttes.

De plus, un cache spécial est placé entre la lentille et la caméra pour limiter la superposition des gouttes [2]. L'image des gouttes sur la caméra est présentée à la figure 10.

2.3 Mesure du champ de vitesse et de température

Le champ 2D de vitesse (mesure PIV) et de température (Rayleigh [3]) ont été mesuré pour connaître l'environnement dans lequel les gouttes s'évaporent. Ces deux mesures ne sont pas réalisables en présence de gouttes. Elles ont donc été réalisées sans goutte mais avec les mêmes débits de gaz donnés plus haut. La figure 1 présente le résultat des mesures le long de l'axe central du brûleur.

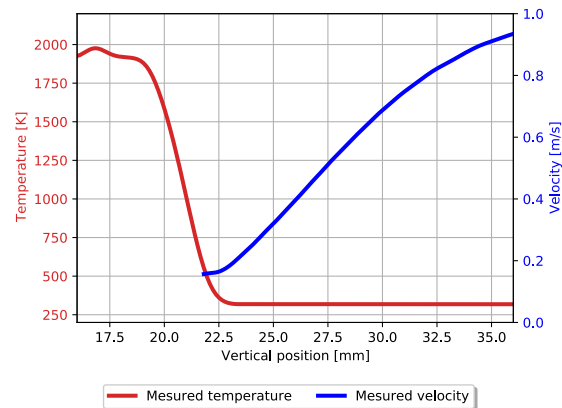


Figure 1 - Profil de vitesse et de température sur l'axe central

Les profils 2D des champs de vitesse et de température sont disponibles dans les travaux de Parant et al. [4].

3 Algorithme PTV

L'algorithme PTV peut se découper en 2 grandes parties : le suivi des gouttes puis analyse du signal ILIDS.

3.1 Suivi des gouttes

Les étapes principales de l'algorithme PTV sont [4]:

1. Suivi des gouttes de l'image N sur la trame N+1
2. Recherche des gouttes sur la trame N+1
3. Discrimination des anciennes et nouvelles gouttes et caractérisation des nouvelles gouttes de la trame N+1

Commençons par l'étape 2 : Pour rechercher les gouttes sur la trame N+1, nous avons donné une image simplifiée d'une goutte pour que l'algorithme recherche ce motif sur toute l'image (voir figure 10). Cependant, cette méthode reste limitée pour des

gouttes qui s'évaporent et perdent beaucoup en intensité.

Pour trouver les gouttes qui s'évaporent, nous nous reposons principalement sur l'étape 1 : Sachant qu'une goutte, même faiblement visible, est détectée à la trame N, l'algorithme va capturer son image (figure 11 (c)), puis va regarder de combien l'image de cette goutte (et non de l'image simplifiée) s'est décalée sur la trame N+1 avec un algorithme de corrélation de phase [5]. Ainsi, la recherche des gouttes devient spécifique pour chaque goutte, il est alors possible de trouver des gouttes très faiblement visibles. La figure 10 illustre la manière dont l'image des gouttes est déterminée.

Finalement, à l'étape 3 : Dans cette dernière partie, l'algorithme va chercher à identifier les nouvelles gouttes parmi toute les gouttes qu'il a trouvées à la trame N+1. Une fois l'ensemble des gouttes identifié, l'algorithme va, pour chaque goutte, préciser sa position à 0.1 pixel près, déterminer la taille exacte de son image et mesurer la position et nombre de frange d'interférence.

Concernant l'initialisation : L'initialisation est très simple. Comme à la « trame -1 » il n'y a pas de gouttes, l'algorithme va simplement sauter l'étape 1 et va directement commencer par l'étape 2 sur la trame 0.

3.2 Evaporation et taille des gouttes

Grâce au nombre de frange mesuré durant la phase d'analyse, il est possible de remonter à la taille de la goutte à partir de la formule proposée par Damaschke et al. [1].

De plus, Wu et al. [6] a montré que pour une très faible variation de diamètre, le nombre de frange ne change pas mais leur position change. Ainsi lorsque les franges commencent à bouger nous savons que le diamètre change et donc que la goutte commence à s'évaporer. Il est ainsi possible de déterminer précisément l'instant du début d'évaporation.

Cependant, comme le laser est continu, il est possible que, durant l'exposition de la caméra, les franges bougent et ne soient plus clairement visibles comme illustré sur la figure 11 (c). Ainsi, à partir d'un moment

nous ne plus suivre la taille des gouttes, nous savons seulement qu'elles s'évaporent.

Nous pouvons voir sur la figure 5 le résultat du suivi du nombre de frange et de la position des franges au cours du temps. Le signal d'interférence étant sinusoïdale, le nombre de frange est déterminé par transformé de Fourier le la position des franges est déterminé par la phase associée.

Sur les 80 premières images, le nombre de frange et la position des franges restent stables. Cependant, à partir de l'image 80 (bande rouge) la phase change subitement, les franges commencent à bouger, la goutte commence à s'évaporer. Pendant un temps, le nombre de frange reste mesurable mais à partir de l'image 125, il n'est plus possible de compter le nombre de franges, celles-ci sont floues, comme sur la figure 11 (c).

4 Cas test 1 : Evaporation du dodécane

4.1 Suivi des gouttes et évaporation

Grâce à notre algorithme, nous avons puis suivre des gouttes et déterminer sur quelle partie de leur trajectoire elles s'évaporent. La figure 3 présente 10 trajectoires caractéristiques des résultats que nous avons obtenu sur notre banc expérimental.

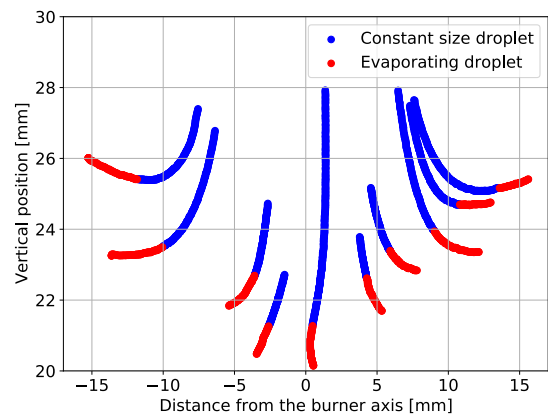


Figure 3 - Résultat du suivi PTV (dodécane)

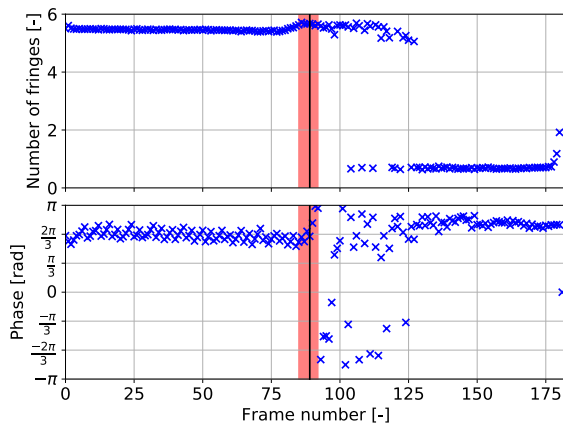


Figure 5 - Nombre et position des franges d'interférence

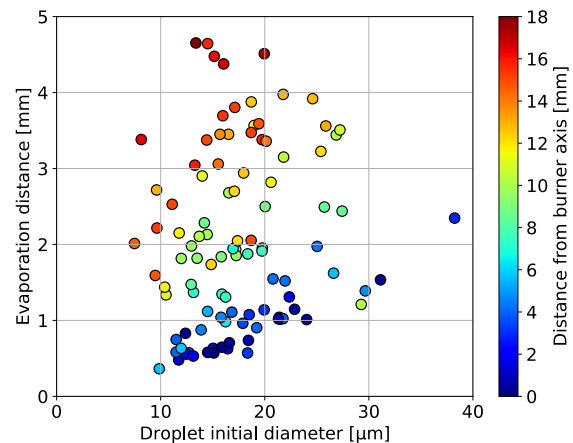


Figure 4 - Distance d'évaporation des gouttes de dodécane

4.2 Distance et délai d'évaporation

A partir de la mesure ILIDS nous avons pu déterminer de façon précise le diamètre initial des gouttes de dodécane. Puis une fois que les franges bougent, il n'est plus possible de mesurer la taille des gouttes. Cependant, grâce au suivi PTV nous pouvons toujours déterminer le temps et la distance sur laquelle les gouttes s'évaporent. Les figures 4 et 7 présentent la distance et le temps d'évaporation d'une centaine de gouttes suivis par PTV en fonction de leur diamètre initial et de leur position par rapport à l'axe du brûleur.

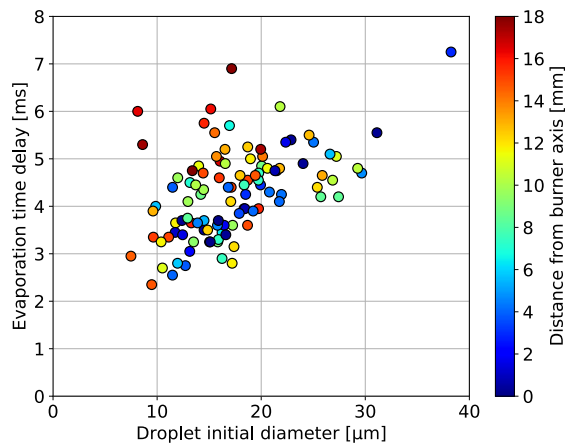


Figure 7 - Temps d'évaporation du dodécane

5 Cas test 2 : Comparaison numérique

5.1 Modélisation

Grâce à la mesure du champ de température et de vitesse sur l'axe centrale, nous pouvons chercher à simuler l'évaporation des gouttes sur le front chaud.

Pour cela, nous avons étudié l'évaporation d'une goutte injectée, en chute libre et à température ambiante, à partir de la sortie du brûleur du haut. Cette goutte est composée uniquement de dodécane et elle s'évapore dans de l'air dont la température est fixée par les mesures Rayleigh.

Le modèle de trainée utilisé est celui de Schiller Naumann. Le modèle d'évaporation est celui proposé par Spalding [7] avec la correction d'Abramzon et Sirignano. Les nombres de Nusselt et de Sherwood sont calculés à partir de l'équation de Ranz-Marshall. Les données thermodynamiques proviennent de la librairie python *thermo* [8] et sont calculées à partir de la température de la goutte. Le modèle d'évaporation a été validé à partir des résultats expérimentaux de Muelas [9] sur les mesures des gouttes de dodécane et d'hexadécane.

5.2 Comparaison

La figure 8 présente les résultats du temps d'évaporation du dodécane comparé à la simulation numérique.

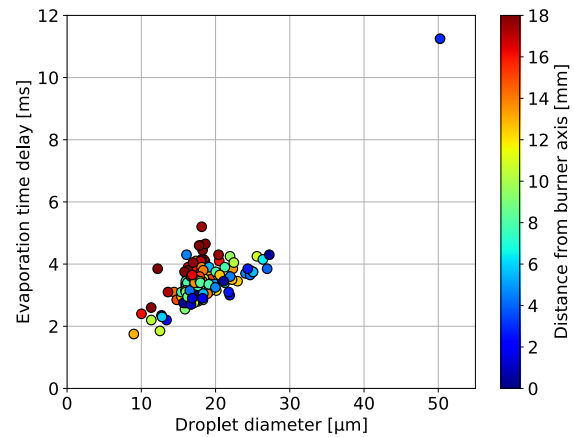


Figure 6 - Délai d'évaporation de l'hexadécane

Nous pouvons voir que le temps d'évaporation suit la

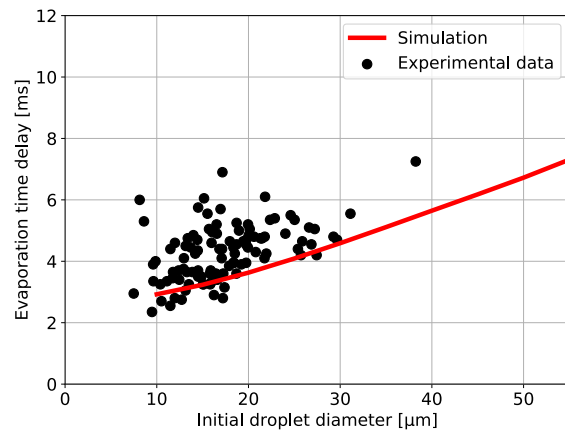


Figure 8 - Comparaison mesures-simulation du dodécane même tendance entre les mesures expérimentales et la simulation numérique.

De plus, dans le cas de la simulation et des mesures, le délai d'évaporation ne suit pas la loi classique du D^2 , c'est-à-dire que le temps d'évaporation n'est proportionnel au diamètre au carré. Cela suggère que l'évaporation est plus complexe que de l'évaporation d'une goutte au repos dans de l'air à température fixe.

Dans notre cas, lorsque les gouttes vont gagner en masse, elles vont gagner en inertie et donc elles vont réussir à pénétrer plus profondément le front chaud et donc les gouttes les plus grosses vont s'évaporer dans un environnement qui est en moyenne plus chaud que les gouttes de plus petite taille. Dans notre cas cela conduit à une faible augmentation du temps d'évaporation avec le diamètre des gouttes. De plus, les grosses gouttes vont conserver une forte vitesse de glissement ce qui va également accélérer leur évaporation par rapport aux petites gouttes.

6 Cas test 3 : Evaporation de l'hexadecane

6.1 Délai d'évaporation

Nous avons reproduit la même expérience avec de l'hexadecane. Le spray étant toujours en très faible quantité, nous pouvons toujours faire l'hypothèse que les gouttes pénètrent dans le même front chaud que celui mesuré à la [figure 2](#). La [figure 6](#) présente les résultats de mesure avec de l'hexadecane et la [figure 9](#) présente la comparaison des mesures d'hexadecane avec la simulation numérique.

Les résultats obtenus sont comparables au dodécane et la simulation numérique semble bien reproduire les résultats expérimentaux.

Cependant, nous pouvons constater que la dispersion du délai d'évaporation est plus grande pour le dodécane que nous l'hexadecane.

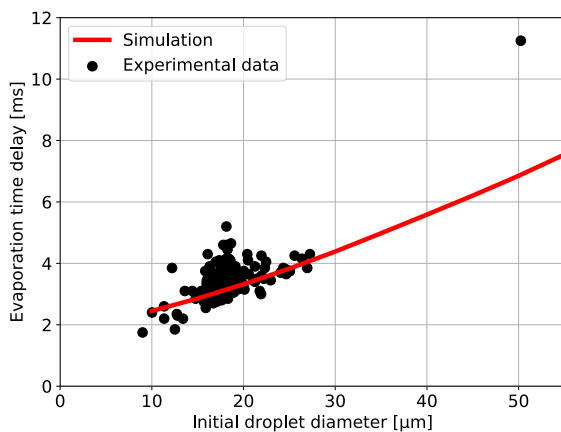


Figure 9 - Comparaison mesures-simulation de l'hexadecane

6.2 Temps de chauffe des gouttes

Comparé au dodécane, l'hexadecane a une grande température d'ébullition à pression ambiante (560K et 489K pour dodécane). De plus, pour que les gouttes d'hexadecane commencent à s'évaporer elles doivent atteindre une température proche de la température d'ébullition. Durant cette montée en température les propriétés physiques de l'hexadecane vont varier et notamment sa densité. A $T=300K$ la densité de l'hexadecane est de 768kg/m^3 alors qu'à sa température d'ébullition elle est de 572kg/m^3 . Cela correspond à une augmentation du diamètre de 10% au cours de la montée en température.

Grâce à notre suivi de la position des franges, nous pouvons voir lors gonflement de certaines gouttes, les franges se décaler dans le sens inverse de l'évaporation. Nous avons inclus cet effet dans notre algorithme PTV pour mesurer le temps que les gouttes d'hexadecane mettent à atteindre leur température d'ébullition et nous pouvons même le comparer aux simulations numériques. Les résultats sont présentés sur la [figure 10](#).

De nouveau, nous pouvons constater que les mesures expérimentales et la simulation numériques sont du même ordre de grandeur.

Lorsque l'on compare la [figure 6](#) et la [figure 7](#), nous pouvons constater que la dispersion des temps d'évaporation est plus grande pour le dodécane que pour l'hexadecane. Cela pourrait s'expliquer par le long temps de chauffe de gouttes d'hexadecane. En effet, l'hexadecane va absorber les fluctuations de

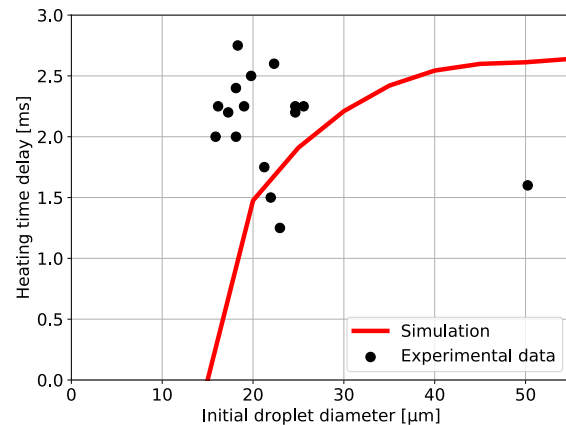


Figure 10 - Temps de chauffe des gouttes d'hexadecane l'écoulement dans son temps de chauffe, ce qui fait qu'il aura bien pénétré la zone chaude au moment de l'évaporation. Alors que le dodécane va s'évaporer plus vite et va subir les légères fluctuations de l'écoulement et donc peut commencer à s'évaporer alors qu'il n'a pas complètement pénétré la zone de gaz brûlés.

7 Conclusion

Grâce à ce nouvel algorithme, nous pouvons détecter les gouttes avant et pendant leur évaporation. Le suivi simultané de la position et du diamètre nous a permis de détecter l'instant et la position exacts du début de l'évaporation.

Vers la fin de l'évaporation, l'intensité des gouttes diminue fortement, ce qui les rend presque indétectables à partir d'une image grossière. Cependant, le nouvel algorithme recherche les gouttes à partir de leur image dans la trame N pour les retrouver dans la trame N+1. Nous avons pu estimer qu'il pouvait suivre les gouttes dix fois mieux que ne l'aurait fait un algorithme classique de PTV pendant la dernière milliseconde d'évaporation.

Nous avons mis en place 3 cas d'application pour illustrer les résultats que nous pouvons produire avec cet algorithme. Dans un premier temps, nous avons pu voir que les résultats sont cohérents avec la configuration expérimentale, puis nous avons constaté que nos mesures expérimentales sont cohérentes avec les modèles numériques classiques d'évaporation et finalement, nous avons pu voir que notre algorithme permettait de décomposer les phases d'évaporation de l'hexadecane sur un front chaud.

8 References

- [1] N. Damaschke, H. Nobach, T. I. Nonn, N. Semidetnov, and C. Tropea, "Multi-dimensional particle sizing techniques," *Exp. Fluids*, vol. 39, no. 2, pp. 336–350, 2005.
- [2] Baudoin R, Zimmer L (12/2015) Procédé et système optique de détection de particules dans un écoulement, FR Patent 13 61580
- [3] G. Parant, L. Zimmer, A. Renaud, and F. Richecoeur, "Adaptation of a PTV method for droplets evaporating in vicinity of a flame," *Exp. Fluids*, vol. 63, no. 6, 2022.
- [4] M. Guizar-Sicairos, S. T. Thurman, and J. R. Fienup, "Efficient subpixel image registration algorithms," *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 2, pp. 156–158, 2008.
- [5] Yingchun Wu, Cyril Crua, Haipeng Li, Sawitree Saengkaew, Lutz Mädler, Xuecheng Wu, Gérard Gréhan, "Simultaneous measurement of monocomponent droplet temperature/refractive index, size and evaporation rate with phase rainbow refractometry," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 214, pp. 146–157, 2018.
- [6] A. R. Masri, R. W. Dibble, and R. S. Barlow, "The structure of turbulent nonpremixed flames revealed by Raman-Rayleigh-LIF measurements," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 22, no. 4, pp. 307–362, 1996.
- [7] Spalding, D. B. (1953). The combustion of liquid fuels. *Symposium International on Combustion*, 4(1), 847–864.
- [8] Caleb Bell and Contributors (2016-2021). Thermo: Chemical properties component of Chemical Engineering Design Library (ChEDL) <https://github.com/CalebBell/thermo>.
- [9] Muelas, Á., Carpio, J., Ballester, J., Sánchez, A. L., & Williams, F. A. (2020). Pyrolysis effects during high-temperature vaporization of alkane droplets. *Combustion and Flame*, 217, 38–47.

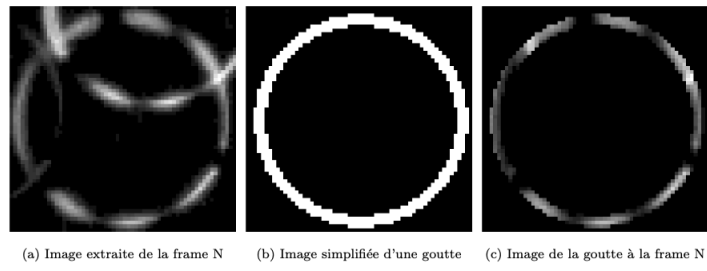


Figure 11 - Différente représentation d'une goutte pour l'algorithme PTV

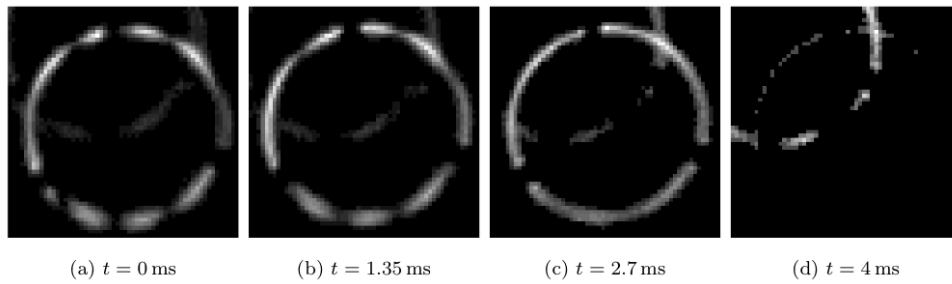


Figure 12 - Image d'une goutte au cours de son évaporation