
Mesure instantanée du champ de vitesses de gouttes-filles issues de la micro-explosion

Christophe ALLOUIS¹, Dominique TARLET^{2*}, Jérôme BELLETTRE²

¹ Istituto Ricerche sulla Combustione CNR - Piazzale Tecchio 80 - 80125 Napoli - Italie

² Laboratoire de Thermocinétique - LTN UMR 6607 - BP 50609 - 1 rue Christian Pauc - 44307 Nantes cedex 3

* (auteur correspondant : dominique.tarlet@univ-nantes.fr)

Résumé - L'activité objet de la présentation consiste en la mise au point d'une expérimentation en visualisation in-situ des gouttes durant le phénomène de micro-explosion. Ceci permet de mesurer leur vitesse dans le plan et leur diamètre plus que de réaliser une caractérisation qualitative de leur température de surface. Cette approche effectuée à l'aide d'une caméra rapide infra rouge, permet ainsi de caractériser le champ de vitesse d'un échantillon de gouttes filles issues d'une micro explosion reconnue auparavant comme optimale. L'avantage de la visualisation infra rouge consiste en sa grande sensibilité.

Nomenclature

D_{32} Diamètre de Sauter, μm

T température, K

V vitesse, $m.s^{-1}$

Symboles grecs

ϵ émissivité radiative, [-]

1. Introduction

La micro explosion est un phénomène connu en matière de combustion, comme diminuant les émissions polluantes [1]. Dans une goutte d'émulsion eau-dans-huile (water-in-oil, w/o), le déclenchement de la micro explosion est gouverné par les transferts de chaleur et de masse, ainsi que par le changement de phase [2, 3] des gouttelettes internes d'eau. Une fois la micro explosion déclenchée, la vaporisation rapide ($\leq 1 ms$) de l'eau et la désintégration consécutive de l'émulsion "soufflent" des gouttelettes-filles avec une vitesse initiale.

La figure 1 montre les images successives saisies par une caméra rapide, lors d'une micro explosion. Les études précédentes, centrées sur les aspects cinématiques et mécaniques de la micro explosion [4] étudiaient surtout le nombre, la taille et la vitesse des gouttes-filles. En effet, elles ont montré qu'il existe un diamètre optimal ($D_{32} \simeq 5 \mu m$) des gouttelettes internes d'eau pour lequel la micro explosion donne un nombre de gouttelettes-filles maximal, d'après la détection à la caméra rapide [4]. Le tableau 1 montre les principales grandeurs et intervalles, concernant les aspects cinématiques de la micro explosion. La gouttelette-fille typique de ces études précédentes a un diamètre de $400 \mu m$ et se déplace à $2 m.s^{-1}$. Ces mêmes conditions seront reproduites ici.

Les trois émulsions eau-dans-huile (w/o) sont testées ici dans les mêmes conditions [4] pour représenter un optimum de la micro explosion, plus deux émulsions non optimales. Ceci permet d'étudier plus finement la micro explosion, car la caméra infra rouge est plus sensible que la caméra optique, en effet elle permet de travailler avec des durées d'exposition (temps d'intégration) beaucoup plus courts : $140 \mu s$ de durée d'intégration dans le cas présent. De plus, la caméra infra rouge peut fournir une estimation qualitative de la température de surface des gouttes.

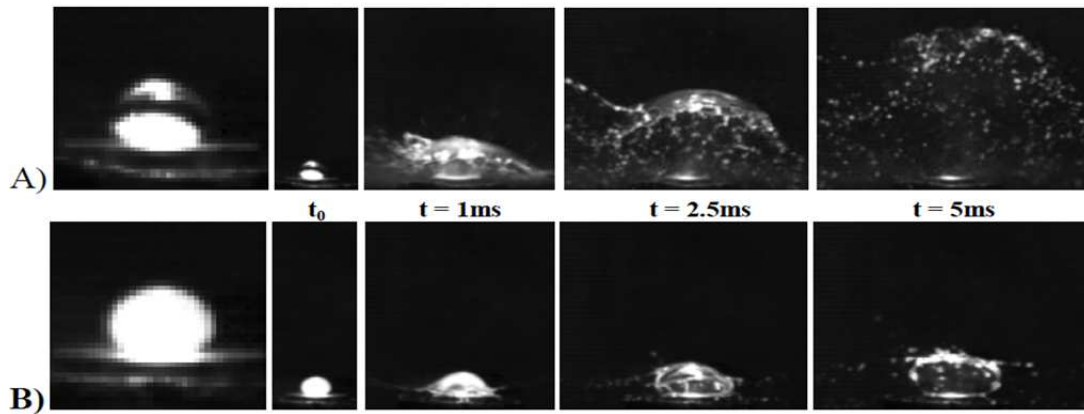


Figure 1 Images prises d'une micro explosion optimale (A) et non-optimale (B) [4]

Vitesse V	0,6 à $12 m.s^{-1}$	D_{32} (/rapport à la goutte-mère d'émulsion)	30 à 90 %
Nombre (détection optique)	40 à 100	Température T	130 à $190^{\circ}C$

Tableau 1 Propriétés des gouttes-filles de la micro explosion, le phénomène étant reproduit ici dans les mêmes conditions que [4]

2. Installation expérimentale

Tout d'abord, la micro explosion doit être déclenchée dans une goutte d'émulsion avec des propriétés données. Trois émulsions différentes d'eau dans l'huile de tournesol sont testées. La fraction d'eau dans l'émulsion est constante (30 %) dans tous les cas. Le seul paramètre de la goutte d'émulsion qui varie est le diamètre moyen des gouttes d'eau internes, qui est mesuré au microscope optique. La distribution en taille de ces gouttes d'eau internes suit une loi log-normale, conformément à ce qui est déjà bien connu avec un agitateur rotatif produisant des étapes successives de cisaillement et de rupture [5]. Les trois émulsions sont : l'Optimale ($D_{32} \simeq 5 \mu m$, écart-type $1,4 \mu m$), dont la micro explosion est optimale [4] par rapport aux deux autres nommées la Petite ($D_{32} \simeq 3,5 \mu m$, écart-type $0,92 \mu m$) et la Grande ($D_{32} \simeq 10 \mu m$, écart-type $2,85 \mu m$).

La figure 2 montre que dans les mêmes conditions qu'en [4], la goutte d'émulsion est déposée sur une surface chauffée, maintenue à une température de $375^{\circ}C$. Son volume est contrôlé par une pipette à doseur pour qu'elle ait un diamètre de 3 mm. La goutte d'émulsion subit alors un effet Leidenfrost dû à la vaporisation intense dans sa partie basse. La goutte d'émulsion est soulevée sur le film de vapeur, et glisse continuellement sur la surface concave, jusqu'au déclenchement de sa micro explosion. Au cours du délai préalable à la micro explosion, tout contact avec une surface solide est ainsi évité, ce qui empêche un déclenchement prématuré de la micro explosion. Cela résulte dans une désintégration unique et totale de la goutte, caractéristique d'une véritable micro explosion et accompagnée par un bruit de déflagration. C'est là la principale différence entre la micro explosion et son insuccès, parfois nommé « puffing ».

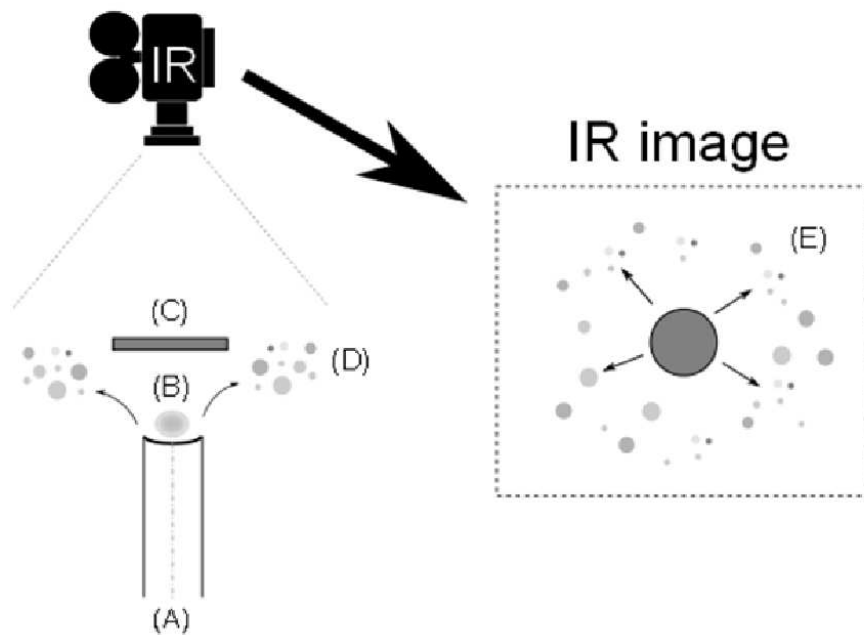


Figure 2 *Installation expérimentale - (A) surface chauffée, (B) goutte-mère d'émulsion subissant une micro explosion, (C) cache opaque au rayonnement infra rouge intense de la surface chauffée, (D) envol de gouttes-filles dans le champ (E) vu par la caméra infra rouge*

Dans ce travail, la gerbe de gouttelettes-filles qui part lors de la micro explosion est alors vue d'en haut par la caméra infra rouge. Leur vitesse est donc mesurée dans le plan, et la grande sensibilité de la caméra infra rouge permet une reconnaissance aisée et fiable. La télécaméra infra rouge est un modèle SC 7500 de FLIR Systems. Le détecteur a une matrice de 640×512 pixels, et est sensible dans la zone $3 - 5 \mu m$. L'étalonnage est avec une sensibilité de $5 mK$ dans l'intervalle $0 - 2500 K$. La résolution de $210 \mu m$ par pixel, avec un diamètre moyen de Sauter (D_{32}) des gouttelettes de $400 \mu m$, permet de repérer les gouttelettes les plus petites grâce à la sensibilité thermique des pixels concernés. La profondeur de champ permet de repérer le siège de la micro-explosion (plaque chauffée) et de suivre les objets qui en partent ; ils deviennent flous après une durée significative de chute libre, lorsqu'ils sont arrivés au bas de l'image visible figure 4. Dans les conditions présentes de mesure, le déplacement d'une gouttelette d'une image à la suivante est de l'ordre de la dizaine de pixels, alors que les maximums locaux sont repérés par la machine, avec une faible incertitude de 1 ou 2 pixels au maximum. Par conséquent, une incertitude de moins de 10% est considérée sur la vitesse obtenue. La fréquence d'acquisition de 1500 Hz, et le temps d'intégration de $140 \mu s$ suffisent à repérer les gouttelettes issues de la micro-explosion (cf. figure 4), qui est définie comme la désintégration unique et totale de la goutte d'émulsion [6]. Les premières gerbes limitées de gouttes-filles plus petites qui sont parfois observées avant la micro-explosion correspondent au régime de "puffing", et ne sont par conséquent pas répertoriées par la présente étude.

A partir de ces images infra-rouges, des mesures de la taille, de la vitesse et de la température superficielle des gouttelettes sont possibles en principe. Castanet *et al.* [7] ont réalisé de telles mesures de température superficielles de gouttes plus lentes, en chute libre. En plus d'un post-

traitement complexe dû à la sphéricité de l'objet, la différence significative qu'ils constatent avec la température moyenne dans le volume de la goutte mesurée par Laser-Induced Fluorescence (LIF) suggère les précautions à prendre pour interpréter le signal de température. Néanmoins, la mesure de la taille des gouttes reste crédible, surtout dans les premiers instants de leurs trajectoires où elles sont encore chaudes avec des contours nets. Finalement, c'est la mesure de vitesse qui reste la plus fiable avec le procédé de mesure décrit ici. La mesure de taille des gouttes est également possible. L'application de cette technique de mesure à l'énergie cinétique des gouttes est envisagée, particulièrement pour un bilan en termes d'énergie cinétique, d'énergie de surface (capillarité), qui seraient confrontées à l'énergie mécanique disponible lors de la micro-explosion.

3. Résultats et discussion

Plus de 500 micro explosions réalisées ont donné des enregistrements de vidéos. Les résultats exposés ici concernent 9 vidéos de micro explosion Optimale, l'une d'entre elles étant représentée figure 3. On voit des gouttes-filles plus chaudes que leur environnement, quitter le lieu de la micro explosion avec une vitesse dans le plan. Leur déplacement d'une image à la suivante permet donc de mesurer précisément leur vitesse. De plus, une interprétation qualitative de leur température de surface peut être obtenue par la visualisation infra rouge.

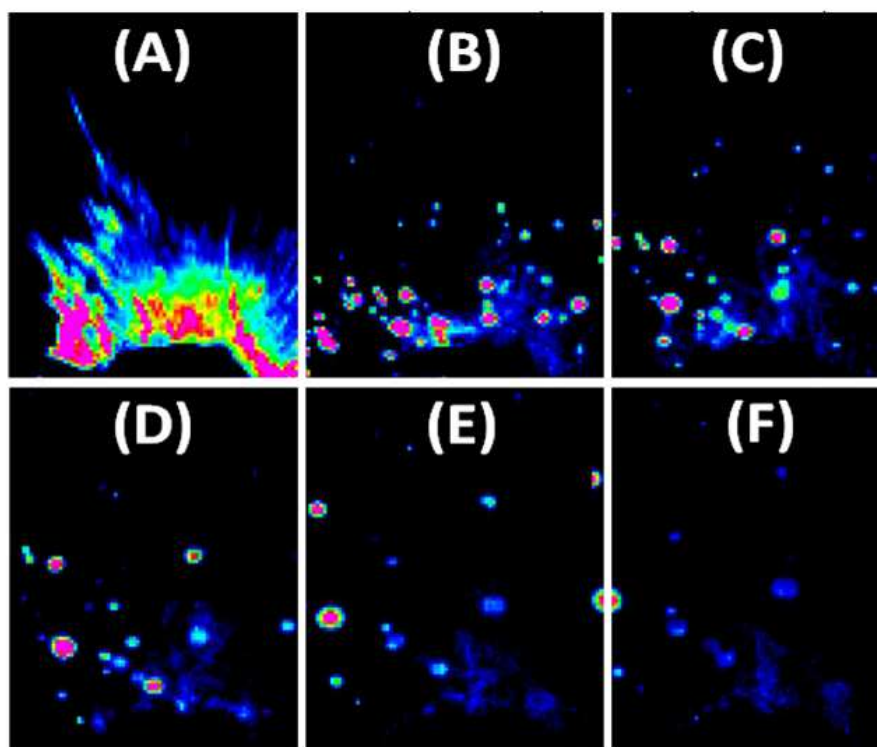


Figure 3 Visualisation d'une micro-explosion "Optimale", par une séquence de 6 images successives (A-F). Fréquence d'acquisition 1500 Hz, temps d'intégration 140 μ s, résolution 210 μ m par pixel.

Le post-traitement consiste à repérer la position des gouttelettes sur chaque image, par une localisation des maximums locaux. La vitesse dans le plan peut donc être calculée. L'appariement des gouttelettes d'une image à la suivante est opéré manuellement. Cela reste possible avec une faible densité d'objets sur l'image ; les algorithmes de type "Tracking" devenant pertinents

avec de fortes densités d'objets sur l'image [8]. Le repérage des maximums locaux est montré figure 4. Sur le haut de l'image, on distingue le cache de forme rectangulaire et de largeur 10,5 mm. les gouttelettes-filles sont expulsées de haut en bas et le signal obtenu est très clair sur la thermographie infra rouge.

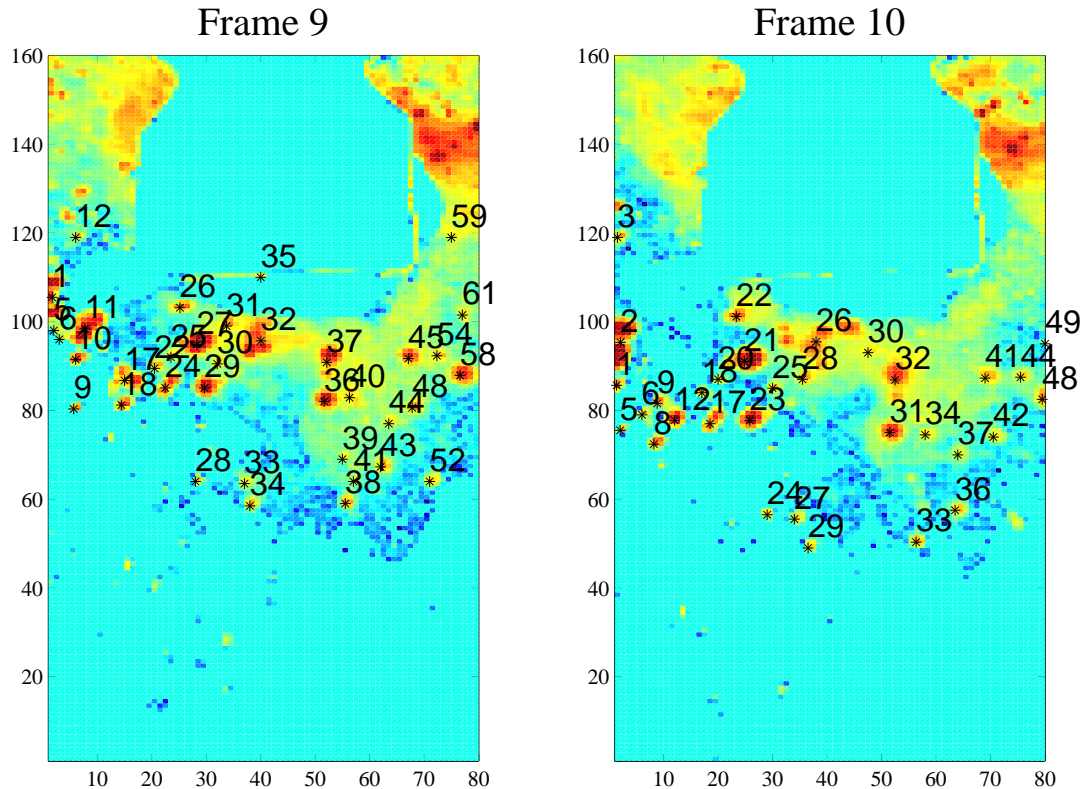


Figure 4 Repérage des maximums locaux sur le champ obtenu par thermographie infra rouge.

Les 575 vitesses (pas élémentaires de trajectoire) obtenues sont représentées sous forme d'histogramme figure 5. Ces résultats sont cohérents avec les premiers résultats obtenus précédemment avec une caméra optique [4], au moyen de la même installation expérimentale et sous les mêmes conditions. En effet, les mesures optiques donnaient un intervalle de vitesse de $0,6$ à 12 m.s^{-1} . Néanmoins des différences entre les deux méthodes de mesure peuvent être constatées. En effet, la vitesse dans le plan est mesurée ici par le dessus, alors que les mesures optiques [4] saisissaient le spray par le côté. La symétrie circulaire de l'écoulement dispersé de gouttelettes-filles se prête particulièrement à ce type de mesure par le dessus.

4. Conclusion

Une mesure précise et fiable de la vitesse dans le plan des gouttelettes-filles issues de la micro explosion est réalisée dans un cas de micro explosion optimale. Il aboutit à des résultats de vitesse, en cohérence avec des mesures précédentes au moyen d'une caméra optique. Dans l'avenir, le même traitement sera appliqué sur les trois émulsions : Petite, Optimale et Grande, grâce à l'échantillon de données expérimentales de plusieurs centaines de vidéos saisies dans ces différentes situations. Un bilan de quantité de mouvement permettra de remonter à la physique, plus précisément à la mécanique de la micro explosion.

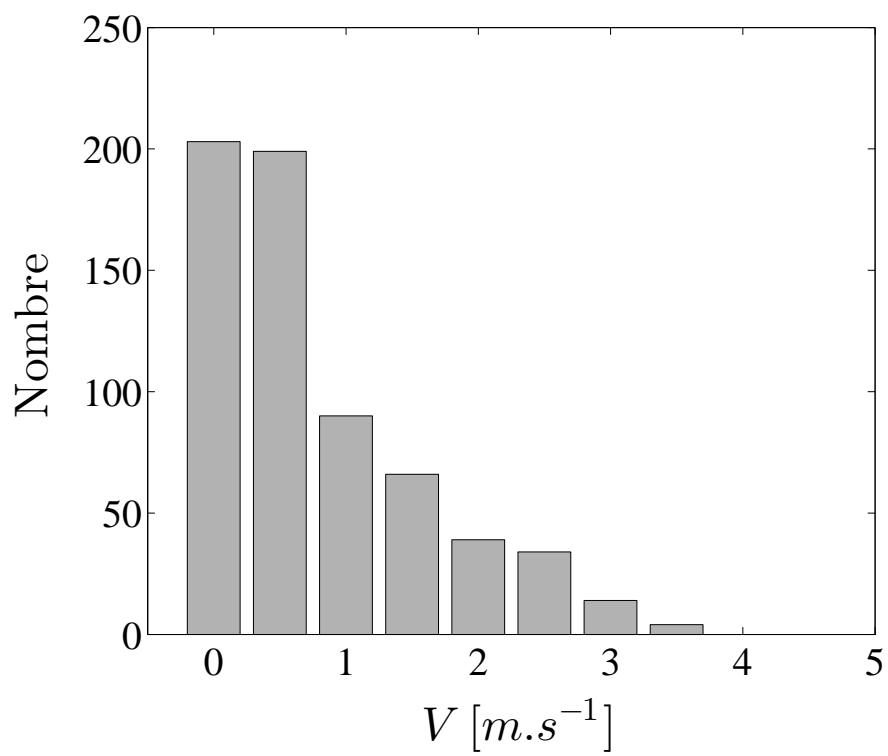


Figure 5 *Histogramme des vitesses obtenues sur le cas de la figure 3.*

Références

- [1] M. Mattiello, M. Cosmai, L. Pistone, F. Beretta et P. Massoli, Experimental evidence for micro-explosion in water/fuel emulsion flames inferred by laser light scattering, Twenty-fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute (1992), 1573-1578.
- [2] D. Tarlet, J. Bellettre, M. Tazerout et C. Rahmouni, Prediction of micro-explosion delay of emulsified fuel droplets, *International Journal of Thermal Science*, 48-2 (2009), 449-460.
- [3] C.K. Law, A model for the combustion of oil/water emulsion droplets, *Combustion Science and technology* Vol. 21 (1979), 1-4.
- [4] E. Mura, C. Josset, K. Loubar, G. Huchet and J. Bellettre, Effect of dispersed water droplets in micro-explosion phenomenon for water in oil emulsion, *Atomization and sprays*, Vol. 20-9 (2010), 791-799.
- [5] A.A. Pena and G.J. Hisaraki, Enhanced characterization of oilfield emulsions via NMR diffusion and transverse relaxation experiments, *Advances in Colloid and Interface Science* Vol. 105 (2003), 103-150.
- [6] H. Watanabe, Y. Matsushita, H. Aoki and T. Miura, Numerical simulation of emulsified fuel spray combustion with puffing and micro-explosion, *Combustion and Flame* Vol. 157-5 (2010), 839-852.
- [7] G. Castanet, A. Delconte, P. Lavieille, F. Lemoine, C. Amiel, P. Berthoumieu and G. Lavergne, Simultaneous measurements of mean and surface temperature of evaporating moving droplets using combined two colors Laser-Induced Fluorescence and Infrared Thermometry. Extension to the measurement of the temperature distribution within the droplets, Proceedings of the International Congress on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS) (2003)
- [8] D. Tarlet, C. Bendicks, C. Roloff, R. Bordás, B. Wunderlich, B. Michaelis and D. Thévenin, Gas Flow Measurements by 3D Particle Tracking Velocimetry Using Coloured Tracer Particles, *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 88-3 (2012), 343-365.