

Distribution de température de gouttes-filles issues de trois micro explosions différentes.

Dominique TARLET¹, Anthony DEJEAN¹, Jérôme BELLETTRE^{1*},
Christophe ALLOUIS², Patrizio MASSOLI³

¹LUNAM, LTN UMR CNRS 6607, 1, rue Christian Pauc, 44306 Nantes cedex 3, France

²Istituto Ricerche sulla Combustione, CNR, Piazzale Tecchio 80, 80125 Napoli, Italie

³Istituto Motori, CNR, Via Marconi 8, 80125 Napoli, Italie

* (auteur correspondant : jerome.bellettre@univ-nantes.fr)

Résumé - La micro explosion des gouttes d'émulsion est connue pour diminuer la pollution émise par la combustion en spray. Elle consiste en une vaporisation rapide (< 1 ms) des gouttelettes d'eau internes à l'émulsion, produisant une fragmentation brusque de la phase continue d'huile. Les « gouttes-filles » qui en sont issues sont petites et rapides. Cette étude présente un système de mesure par plaque thermiquement fine, permettant de mesurer par caméra infrarouge les températures aux endroits d'impacts des gouttes-filles. Dans le cas d'une micro explosion optimale, les résultats montrent une distribution de température log-normale.

Nomenclature

Bi	nombre de Biot	T	temps, s
GF	« goutte-fille »	<i>Symboles grecs</i>	
Nu	nombre de Nusselt	λ	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
Re	nombre de Reynolds	ΔT	écart de température, K
Pr	nombre de Prandtl	<i>Indices et exposants</i>	
w/o	water-in-oil	D	diamètre goutte
		β	ratio volume/surface

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 après un délai de micro explosion, la vaporisation rapide (< 1 ms) de l'eau et la désintégration consécutive de l'émulsion soufflent des « gouttes-filles » (GF) avec une vitesse initiale. La Fig. 1 montre les images successives saisies par une caméra rapide,

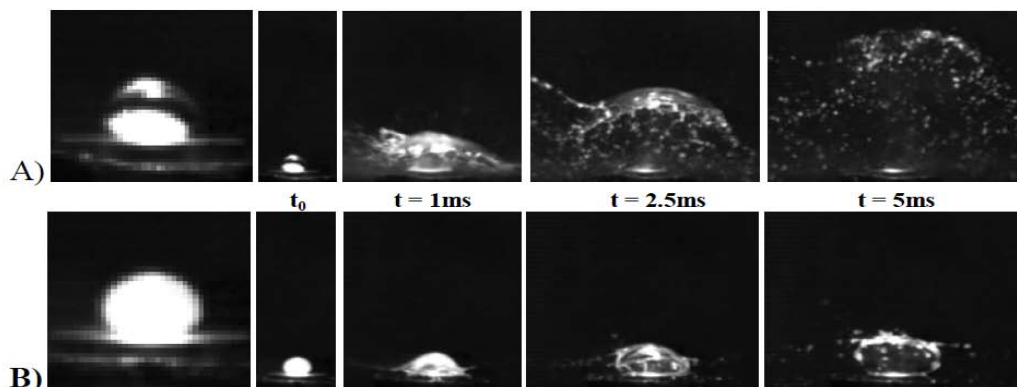


Figure 1 : Vidéo d'une micro explosion optimale (A) et non optimale (B) [4]

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 GF. En effet, elles ont montré qu'il existe un diamètre optimal ($D_{32} \sim 5 \mu\text{m}$) des gouttelettes internes d'eau pour lequel la micro explosion donne une propagation fine, homogène et rapide d'un front de GF.

L'étape suivante pour comprendre la micro explosion est le comportement thermique des GF, c'est-à-dire leur distribution de température et d'enthalpie. Parce que les simulations ont besoin de ces données pour valider des modèles de combustion en spray de combustibles liquides émulsionnés, avec prise en compte de la micro explosion. Le Tab. 1 montre les principales grandeurs et intervalles, concernant les aspects cinématiques de la micro explosion. La GF typique à cette étude a un diamètre de $400 \mu\text{m}$ et se déplace à 4 m/s ; une mesure directe de sa température et/ou de son enthalpie est très difficile.

Propriété	Valeur	Propriété	Valeur
Vitesse	$0.6 \text{ à } 12 \text{ m.s}^{-1}$	D_{32} (/rapport à la goutte-mère D_0)	10 à 90 %
Nombre (Détection optique)	40 to 100	Température (goutte d'émulsion)	130 à 190°C

Tableau 1 : Gouttes-filles issues de la micro explosion [4] dans les mêmes conditions.

Cette étude présente un système de plaque thermiquement fine (PTF) mis au point dans le but d'opérer une telle mesure. Ce système est fondé sur l'impact de ces GF rapides, petites et chaudes sur un côté d'une plaque d'aluminium de $200 \mu\text{m}$ d'épaisseur, thermiquement fine ($Bi \ll 1$). La PTF est visée de l'autre côté par une caméra infrarouge (IR) acquérant le champ de température lors de leurs impacts, à une fréquence de 800 Hz .

Les trois émulsions eau-dans-huile (*w/o*) testées dans les mêmes conditions sont connues [4] pour représenter un optimum de la micro explosion, plus deux émulsions non optimales. Ce plan d'expériences est conçu pour étudier les aspects thermiques de la micro explosion, autour d'une micro explosion connue comme étant optimale du point de vue mécanique.

2. Installation expérimentale

Le but du montage expérimental développé ici est la caractérisation thermique quantitative des GF issues d'une micro explosion. La Fig. 2 montre le schéma du montage.

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. Les trois émulsions sont : l'« Optimale » ($D_{32} \sim 5 \mu\text{m}$), dont la micro explosion est optimale [4] par rapport aux deux autres nommées la « Petite » ($D_{32} \sim 3,5 \mu\text{m}$) et la « Grande » ($D_{32} \sim 10 \mu\text{m}$).

Dans les mêmes conditions qu'en [4], la goutte d'émulsion est déposée sur une surface chauffée, maintenue à une température de 375°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 des gouttelettes d'eau internes présentes 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 ».

Après la micro explosion de la goutte-« mère » d'émulsion, les « gouttes-filles » qui en résultent vont impacter sur une plaque fine d'aluminium (200 µm d'épaisseur, cf. Fig. 2). Cette plaque est conçue pour être thermiquement fine, avec son nombre de Biot inférieur à $5 \cdot 10^{-3}$ concernant la convection forcée liquide, comme à l'intérieur des gouttes lors de l'impact. De précédentes études [4] ont montré que les GF étaient lancées avec une vitesse initiale à un azimuth bas ($< 30^\circ$) et avec une symétrie circulaire. L'autre face de la plaque est traitée pour avoir une émissivité constante. La caméra IR vise cette face et donne des informations quantitatives sur la température et l'enthalpie des gouttes-filles lors de leur impact. Une haute fréquence (800 Hz) doit être utilisée avec la caméra FLIR SC-7500, pour saisir le réchauffement transitoire qui en résulte, et qui dure de 20 à 50 ms.

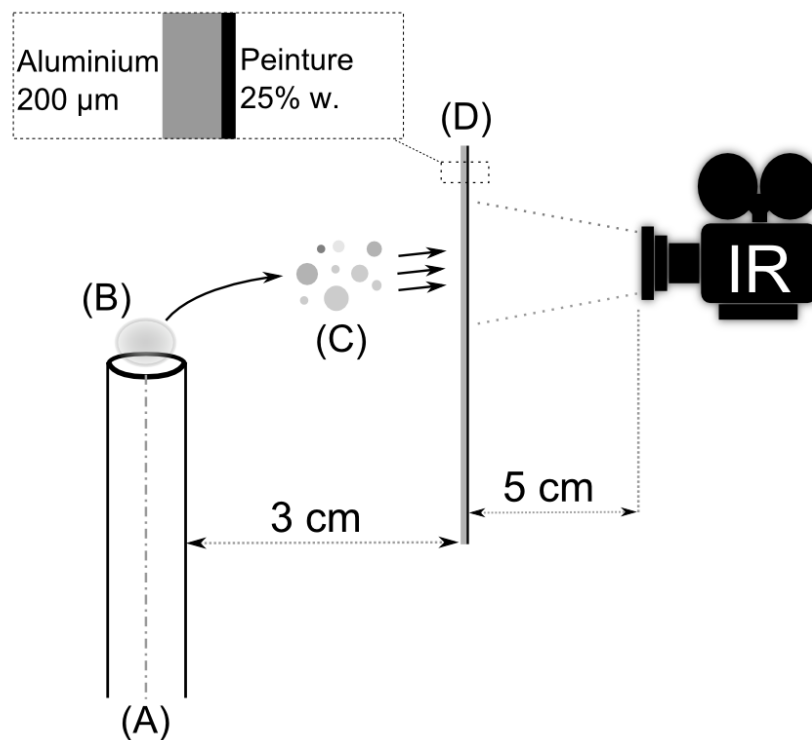


Figure 2 : Montage expérimental – (A) Tige chauffante se terminant par une surface concave maintenue à 375°C, (B) Goutte d'émulsion sur la surface chaude subissant un effet Leidenfrost puis une micro explosion, (C) Gouttes-filles dans leur trajet de ~3 cm vers la plaque (D) visée par la caméra IR FLIR SC-7500

2.1. Caractérisation de la plaque thermiquement fine

Une partie importante de la présente étude est de s'assurer que le champ de température mesuré sur une face de la plaque est réellement représentatif des propriétés thermiques des GF impactant sur l'autre face. Par conséquent, des tests détaillés sont effectués sur la plaque par comparaison entre la mesure IR et des thermocouples, en conditions stationnaires et instationnaires. Les statistiques sont aussi vérifiées, de sorte que la taille de l'échantillon (> 500 impacts pour chaque émulsion, cf. Tab. 2) soit assez grand pour permettre d'en dériver une distribution statistique crédible. Enfin, une corrélation bien connue pour le transfert thermique sur les gouttes de liquide dans l'air (Ranz et Marshall, équation 1) est appliquée afin de vérifier leur refroidissement négligeable au cours de leurs 3 cm de trajet de la micro explosion jusqu'à la plaque.

$$Nu_D = 2 + 0,6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Lors des mesures, la plus chaude d'entre elles produisait un pic de température de 112°C lors de l'impact. Un test est pratiqué (Fig. 3), pour vérifier que la résistance de contact entre la plaque d'aluminium et la couche de peinture n'empêche pas le transfert thermique à travers le système. La couche de peinture pourrait représenter en elle-même une résistance au transfert thermique. Ceci doit être testé dans des conditions instationnaires et avec de petites quantités d'enthalpie, imitant l'impact des gouttes-filles. Un thermocouple est collé sur la face interne et la face externe est visée par la caméra IR. Une goutte de 10 µm d'eau chaude est alors déposée sur la face interne par une seringue. Les résultats comparés du thermocouple et de la caméra IR sont montrés Fig. 3. Concernant l'infrarouge et la mesure par thermocouple, la température maximale et la durée du réchauffement sont très proche (< 1 K de différence). Cet accord montre l'excellente capacité du système à enregistrer un réchauffement petit et rapide (~12 K en 0,75 s.) lors de l'impact d'une goutte de liquide chaud.

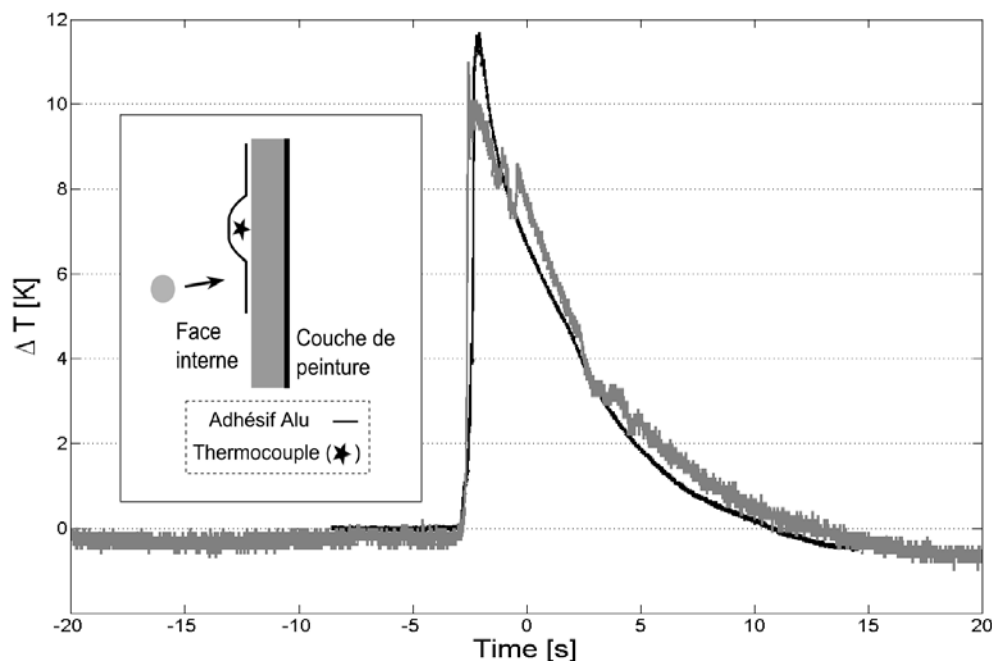


Figure 3 : Schéma et résultat de l'expérience de vérification : une goutte chaude est déposée sur la face interne de la plaque munie d'un thermocouple (TK). L'effet est enregistré à la fois par le thermocouple et la caméra IR.

3. Visualisations IR des impacts

Une fois que les GF ont impacté la plaque, l'effet de leur impact est scruté par la caméra IR comme un maximum local transitoire, montré Fig. 4. La durée du réchauffement significatif résultant d'un impact individuel est de l'ordre de la ms (cf. Fig. 5).

La localisation des impacts est opérée par un traitement d'image sur les images successives issues du film IR. Le logiciel MATLAB© est utilisé. D'abord, les maximums locaux sont repérés au-dessus d'un seuil de température (de 21 à 24°C) pour éviter une fausse localisation de maximums locaux sans existence physique. Ensuite, les coordonnées des centres de gravité de ces maximums locaux sont mémorisées dans un registre. La courbe de la température sur la face externe de la plaque au cours du temps, à ces coordonnées, est au cœur de la présente étude. La fig. 5 montre ces courbes de températures pour 106 impacts résultant de la « Grande » émulsion. Ces courbes de températures sont grisées en fonction de leur maximum : la courbe avec le maximum le plus élevé est en noir, celle avec le maximum le moins élevé est en gris clair, et ainsi de suite entre ces deux bornes.

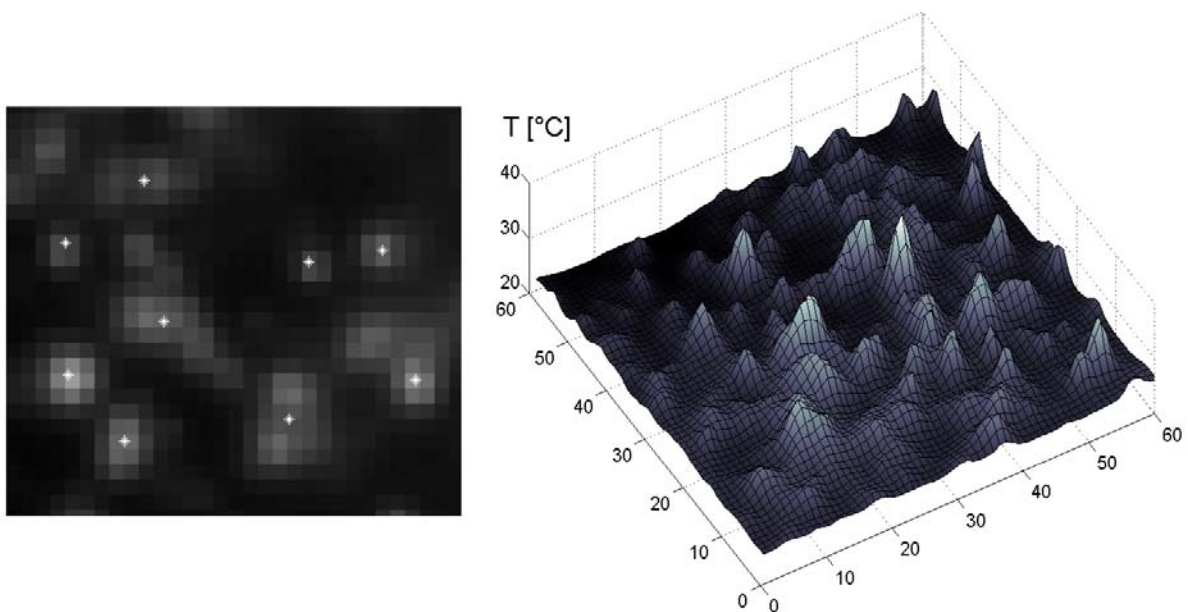


Figure 4 : Localisation des maximums locaux transitoires dus aux impacts de gouttes-filles. A droite, les maximums locaux sont d'abord localisés par la fonction *IMEXTENDEDMAX* du logiciel MATLAB® donnant les maximums locaux au-dessus d'un seuil entre 21 et 24 °C pour éviter une fausse localisation (échelle en pixels). A gauche, les centres de gravité des maximums locaux sont alors repérés (ici pas des étoiles blanches).

La température maximum enregistrée au centre de gravité des impacts est choisie comme donnée représentative de la GF impactant à cet endroit. Le transfert thermique se produit seulement de la température la plus chaude à la température la moins chaude. Si la température de la plaque augmente, celle-ci reçoit de la chaleur d'une GF plus chaude. Si la température de la plaque s'arrête d'augmenter (atteint son maximum), alors elle a atteint la température la plus proche de la goutte-fille.

4. Résultats et interprétation

Une fois qu'un nombre suffisant d'impact a été enregistré, la distribution statistique des températures maximums est obtenue, comme montré Fig. 5. Un calcul statistique donne le nombre minimal d'impacts dans l'échantillon pour obtenir une moyenne et une distribution fiables. Dans le cas présent, un pré-échantillon de 33 impacts du cas d'émulsion « Optimale » montre que la taille minimale de l'échantillon est 200 pour obtenir une précision relative de 3 à 4% sur la moyenne. Les résultats de la présente étude sont extraits des échantillons présentés Tab. 2.

Les distributions statistiques des maximums de température Fig. 5 montrent des tendances différentes pour les émulsions « Optimale », « Petite » et « Grande ». Les distributions sont tracées par des histogrammes en barres sur la même abscisse, et les échelles sont les mêmes pour permettre une comparaison entre les trois.

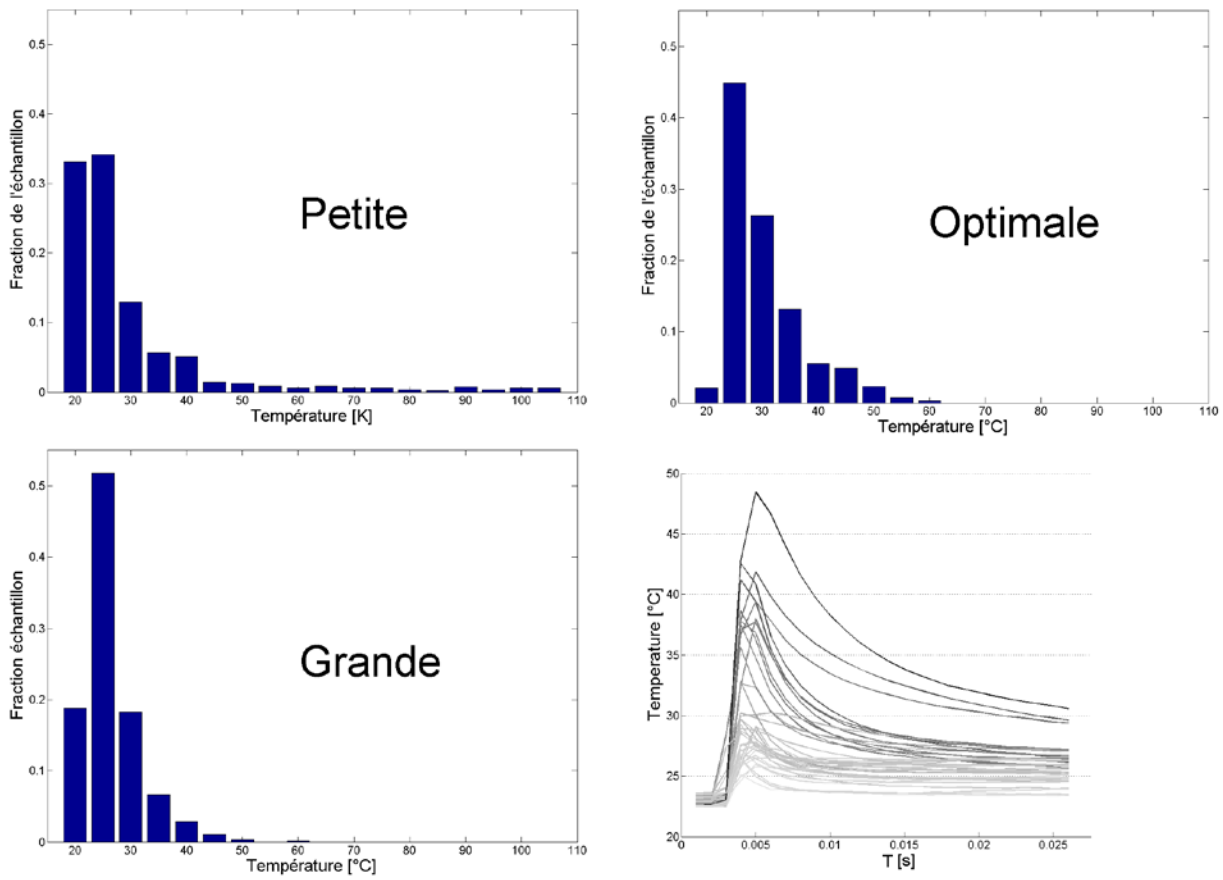


Figure 5 : Histogrammes des distributions des maximums de température aux lieux des impacts. Ils sont tous tracés par des barres sur la même gamme de température, pour permettre une comparaison. Le graphe temporel des 106 impacts d'une micro explosion de la « Grande » émulsion est aussi montré. Les courbes de température y sont grisées en fonction de leur maximum- noir pour la plus chaude, gris clair pour la moins chaude.

Une observation qualitative porte sur l'allure de la distribution « Optimale » étant proche de l'allure d'une distribution observée dans la nature, comme par exemple la loi log-normale. Des calculs et des comparaisons quantitatives sont présentement menées pour confronter l'allure de la distribution à une loi log-normale.

Emulsion	Nombre de micro explosions	Nombre total d'impacts
Grande ($D_{32} \sim 10 \mu m$)	10	650
Optimale ($D_{32} \sim 5 \mu m$)	13	434
Petite ($D_{32} \sim 3.5 \mu m$)	10	550

Tableau 2 : Echantillons constituant les résultats exposés ici.

La signification d'une loi log-normale est que la distribution obtenue résulte de multiplications successives d'une variable aléatoire donnée. En effet, elle est le résultat de multiplications successives des effets d'une variable aléatoire. Ceci a un sens concernant la distribution de diamètres des gouttelettes internes d'une émulsion, qui résulte d'étapes successives de cisaillement et de rupture [5]. Une distribution log-normale des températures des GF signifierait qu'elles subissent un grand nombre de refroidissements successifs durant le temps très court de la micro explosion. Des études sont présentement menées pour considérer la distribution de taille des GF et les inhomogénéités dans la goutte d'émulsion avant le déclenchement de la micro explosion [6].

5. Conclusion

La distribution de température des GF issues de la micro explosion a été mesurée, pour trois émulsions dont l'une étant optimale. Le système de plaque fine thermique permet d'obtenir de l'information quantitative sur les propriétés thermiques des GF, qui peut être davantage analysée et décomposée. La température maximum sur le lieu de l'impact, localisée par post-traitement, montrent différentes tendances pour chacune des trois émulsions. Au stade présent de l'étude, deux faits sont mentionnés :

- (i) La faible atomisation de la « Petite » émulsion, comme dans les résultats cinématiques des études précédentes [4], est confirmée ici par la présence de GF chaudes ($> 60^\circ C$) révélant une faible homogénéisation de la « goutte-mère » d'émulsion juste avant sa micro explosion ;
- (ii) L'allure de la distribution de températures des GF issues de l'« Optimale » semble qualitativement plus proche d'une loi log-normale. Cette observation qualitative est présentement confrontée à des comparaisons quantitatives.

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* 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*, 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* 105 (2003), 103-150.
- [6] E. Mura, P. Massoli, C. Josset, K. Loubar and J. Bellettre, Study of the micro-explosion temperature of water in oil emulsion droplets during the Leidenfrost effect, *Experimental Thermal and Fluid Science* 43 (2012) 63-70.