

Simulation numérique comparée de la combustion d'un spray de fioul lourd pur et en émulsion

Dominique TARLET¹, Jérôme BELLETTRE^{2*}, Mohand TAZEROUT², Camal RAHMOUNI¹

¹CREED – Veolia environnement - 291, avenue Dreyfous Ducas – 78520 LIMAY

²Département Systèmes Energétiques et Environnement – Ecole des Mines de Nantes

4, rue Alfred Kastler – B.P. 20722 - 44307 Nantes Cedex 3

* (auteur correspondant : Jerome.Bellettre@emn.fr)

Résumé - Bien que très visqueux, les fiouls lourds, les huiles usagées et les graisses peuvent être utilisés en tant que combustibles. Brûler ces combustibles en émulsion avec l'eau diminue la longueur de flamme et la formation de particules par rapport à un combustible pur grâce au phénomène de micro explosion (vaporisation rapide de l'ensemble des gouttelettes d'eau internes). Dans cet article est exposé un modèle de combustion d'un spray de fioul lourd pur. Puis nous modélisons un spray d'émulsion de l'eau dans le fioul lourd en combustion dans les mêmes conditions. Enfin la comparaison de leurs résultats se montre en accord qualitatif avec une comparaison expérimentale.

Nomenclature

D	diamètre, m	U	vitesse, $m.s^{-1}$
E	énergie, $J.kg^{-1}$	V	fraction volumique
f	fraction massique d'eau	<i>Symboles grecs</i>	
k	énergie cinétique turbulente, $m^2.s^{-2}$	α	coefficient convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$
k_C	coefficient de diffusion, $m.s^{-1}$	ε	taux de dispersion de k , $m^2.s^{-3}$
K	diffusivité massique, $m^2.s^{-1}$	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
m	masse, kg	μ	viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
N_i	flux d'évaporation, $kmole.s^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
Q	débit, $kg.s^{-1}$	<i>indices</i>	
Sc	nombre de Schmidt	d	gouttelette
S	terme source, $kg.m^{-3}.s^{-1}$	G	phase gazeuse
T	température, K	j	espèces chimiques
		h	enthalpique

1. Introduction

Les fiouls lourds, comme les huiles usagées ou les graisses animales etc. sont des produits visqueux qu'il est souhaitable d'utiliser en tant que combustibles. Brûler ces combustibles en émulsion avec l'eau raccourcit la flamme et diminue la formation de particules (résidus carbonés solides) et de NOx par rapport à un combustible pur. En effet, le phénomène de micro explosion, c'est-à-dire la vaporisation rapide (durée de l'ordre de 0,1 ms. [1,2]) des gouttelettes d'eau internes disloque chaque gouttelette d'émulsion en une multitude de gouttelettes plus petites. Or le délai de micro explosion, la longueur et la température de flamme sont indispensables au dimensionnement de chaudières utilisant ces émulsions. Dans cet article, nous exposons un modèle de spray en combustion visant à calculer le champ de température et le taux de combustion local. Une simulation stationnaire 2D de la chambre de combustion est réalisée, avec 19 flux de gouttelettes permettant un suivi lagrangien. Dans ce contexte, nous présentons tout d'abord une modélisation d'un spray de fioul lourd pur en combustion, puis les modifications fondamentales qui lui sont apportées pour modéliser un spray d'émulsion de l'eau dans le fioul lourd. Par rapport à un spray de combustible pur, les

modifications concernent autant l'intérieur que l'extérieur de la gouttelette d'émulsion : tout d'abord le modèle dit des « couches de sphère » [3] est appliqué aux gouttelettes d'émulsion. Ce modèle renseigne le critère de micro explosion, qui est fonction des températures des gouttelettes internes d'eau. A l'instant où ce critère est vérifié, la micro explosion est modélisée de la façon suivante : la gouttelette d'émulsion disparaît et laisse place à un faisceau de 8 flux de gouttelettes de combustible pur. Une telle réduction de moitié du diamètre des gouttelettes serait équivalente à une multiplication par 10 de la pression d'injection du combustible pur par un injecteur de type « swirl » [4 p.210]. L'écoulement turbulent des gaz (modèle $k-\varepsilon$ [5]), le modèle de combustion « Eddy-dissipation » [6] et les équations de transport des différentes espèces chimiques, ainsi que les conditions aux limites sont les mêmes, que ce soit avec le combustible pur ou en émulsion. Finalement, une comparaison des longueurs et champs de température des flammes obtenues avec et sans émulsion est effectuée.

2. Modélisation

Une simulation stationnaire 2D de la chambre de combustion est réalisée (figure 1). Ce domaine de simulation vise à reproduire schématiquement une chaudière de petite puissance (< 1 MW). La condition à la limite gauche du domaine est une vitesse d'air atmosphérique chaud imposée (tableau 1), qui ressort à la limite droite. De faibles fractions massiques de CO_2 et d' H_2O y ont été incluses délibérément. Des gouttelettes de combustible sont injectées à 2 cm. du bord gauche du domaine.

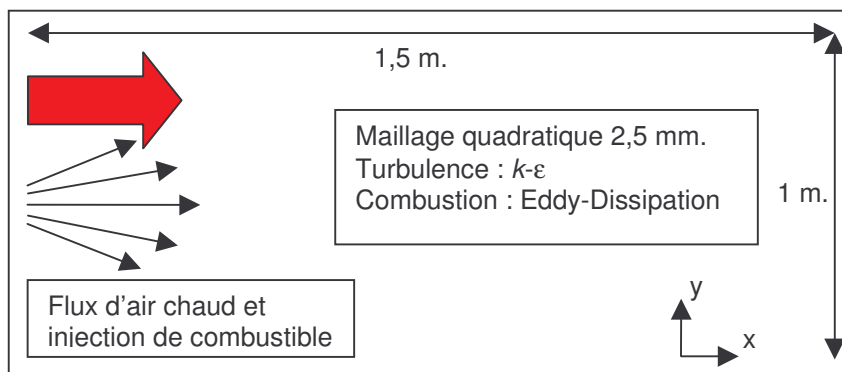


Figure 1 : *Domaine de simulation*

k [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$]	0,045	U [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	1
ε [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$]	0,1	T [K]	1200
$V(\text{O}_2)$	0,235	$V(\text{H}_2\text{O})$	0,005
$V(\text{CO}_2)$	0,005	$V(\text{N}_2)$	0,745

Tableau 1 : *Condition à la limite gauche : flux d'air chaud*

2.1. Modélisation en phase gazeuse

Cinq phénomènes physiques sont modélisés dans le flux d'air turbulent : Transport des différentes espèces gazeuses (O_2 , CO_2 , N_2 , H_2O , $\text{C}_{19}\text{H}_{30}$), conservation de la quantité de mouvement, conservation de l'énergie, turbulence et taux de combustion local. Le transport des espèces gazeuses est calculé par l'équation 1. Le terme source S est non nul avec l'évaporation des gouttelettes de fioul (modélisé par du $\text{C}_{19}\text{H}_{30}$) ou d'émulsion. La conservation de la quantité de mouvement est reproduite par le système d'équations 2. La force F_d est exercée sur l'environnement gazeux des gouttelettes en réaction à leur force de

traînée. Par ailleurs, la combustion turbulente nécessite le choix de modèles spécifiques. La turbulence est prise en compte par le modèle $k-\varepsilon$ standard [5]. La combustion en phase gazeuse est gouvernée par le modèle « Eddy-dissipation » [6], fondé sur la durée caractéristique du mélange turbulent (k/ε) mettant les réactifs en présence dans un temps supérieur de 2 ordres de grandeur à la durée de combustion du type Arrhenius, par conséquent négligée. Ce modèle de combustion nécessite une fraction non nulle de réactifs au départ des calculs, d'où les fractions de CO_2 et H_2O présentes dans les conditions aux limites (tableau 1). Enfin, la conservation de l'énergie est décrite par l'équation 3, où le terme source S_h représente ici le pouvoir calorifique du combustible, moins la chaleur latente de l'eau évaporée de l'émulsion. L'ensemble de ces équations est largement utilisé dans la littérature pour des sprays en combustion [7] et permet de comparer nos simulations avec et sans émulsion.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U}) = S \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \nabla(\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \tau + \vec{F}_d ; \quad \tau = \mu \left[(\nabla \vec{U} + \vec{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla I \vec{U} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{U}(\rho E + p)) = -\nabla \left(\sum_j h_j J_j \right) + S_h \quad (3)$$

2.2. Injection et modélisation des gouttelettes de combustible

Les gouttelettes de combustible sont incluses dans un débit (Q_d) stationnaire de gouttelettes en interaction avec la phase gazeuse environnante. Elles bénéficient d'un suivi individuel lagrangien. L'injection de combustible (figures 1 et 2) imite les distributions de diamètre mesurées dans [8] par diffractométrie laser sur des sprays de combustible pur et en émulsion, sans combustion. L'injection imite aussi la distribution de vitesse mesurée [9] dans un spray d'émulsion en combustion. En résumé, les gouttelettes ont une vitesse plus élevée et un diamètre plus petit dans l'axe de l'injecteur qu'aux extrémités et ces conditions d'injection sont les mêmes avec et sans émulsion, sauf en ce qui concerne le diamètre initial des gouttelettes (plus gros pour tenir compte de l'eau dans l'émulsion). Les vitesses et les diamètres initiaux sont entre 30 et 80 m.s^{-1} , et entre 120 et 200 μm . Les systèmes d'équations 4 et 5 décrivent les conditions imposées à l'injection, l'indice i étant maximal dans l'axe de l'injecteur, celui-ci étant également axe de symétrie. Il y a 19 flux de gouttelettes ($i_{\max} = 10$), et le même nombre de gouttelettes par seconde est injecté dans chaque flux (équation 5).

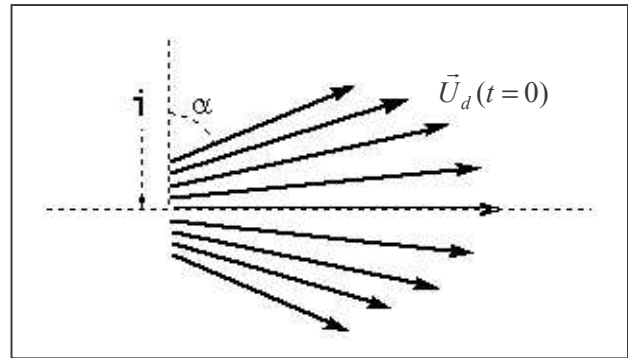


Figure 2 : Injection de combustible

$$\|\vec{V}_d\|(i) = 50 + 30 \frac{i}{i_{\max}} ; \quad D_d(i) = 100 \cdot 10^{-6} - 50 \cdot 10^{-6} \frac{i}{i_{\max}} ; \quad a(i) = \alpha + \left(\frac{\Pi}{2} - \alpha \right) \times \left(\frac{i}{i_{\max}} \right)^{1,2} \quad (4)$$

$$Q_d(i) = 9 \cdot 10^{-5} \times \left(\frac{D_d(i)}{D_d(i_{\max})} \right)^3 \quad (5)$$

2.2.1. Fioul pur

Une gouttelette de combustible pur se voit appliquer le bilan de quantité de mouvement et la force de traînée F_t décrits par le système (6). Le bilan thermique de la gouttelette, ainsi que la corrélation de Ranz et Marshall [10] utilisée pour calculer les transferts convectifs, sont reproduites dans le système (7). Le rayonnement thermique est négligé. Le flux de combustible s'évaporant de la gouttelette est calculé par le système (8), à savoir corrélation de Nusselt et hypothèse de vapeur saturée au-dessus de la surface de la gouttelette. L'ensemble de ces équations prend en compte précisément l'influence de la phase gazeuse sur les transferts massiques et thermiques entre celle-ci et les gouttelettes (en particulier la vitesse relative U_d).

$$\frac{d\vec{U}_d}{dt} = F_t (\vec{U}_G - \vec{U}_d); \quad F_t = \frac{18\mu}{\rho_d D_d^2} \frac{C_d Re_d}{24} \quad (6)$$

$$m_d C_{Pd} \frac{dT_d}{dt} = hA_d (T_G - T_d) + L_d \frac{dm_d}{dt}; \quad \frac{hD_d}{\lambda_G} = 2 + 0,6 \times Re_d^{0,5} Pr_d^{0,33} \quad (7)$$

$$N_i = k_C \left(\frac{Psat(T_d)}{RT_d} \right); \quad \frac{k_C D_d}{K} = 2 + 0,6 \times Re_d^{0,5} Sc_d^{0,33} \quad (8)$$

2.2.2. Emulsion de l'eau dans le fioul

Par rapport à une gouttelette de fioul pur, une gouttelette d'émulsion (avec plusieurs milliers de gouttelettes d'eau dispersées dans le fioul) est modélisée différemment (figure 3). D'abord, son diamètre est plus large pour contenir la fraction d'eau. Ensuite, l'évaporation conjointe d'eau avec le combustible est modélisée par l'équation 9 (hypothèse de *steady depletion* [11]). Le critère de micro explosion est renseigné par le modèle des « couches de sphères » [3] inclus dans le suivi lagrangien des gouttelettes d'émulsion. A l'endroit où ce critère est vérifié, le flux de gouttelettes d'émulsion disparaît et un terme source d'eau vapeur évacue l'eau restante dans les gouttelettes d'émulsion. Enfin, 8 « gouttelettes-filles » de fioul pur aux vitesses et aux diamètres choisis (tableau 2) partent à 1 mm. du lieu de la micro explosion, dans une cellule différente. Cette répartition en huit est l'unique possibilité indiquée pour l'instant dans la littérature, où les seules deux campagnes de mesures optiques existantes indiquent toutes deux une réduction de moitié du diamètre (SMD) dans un spray avec micro explosion par rapport à un spray de combustible pur [12,13].

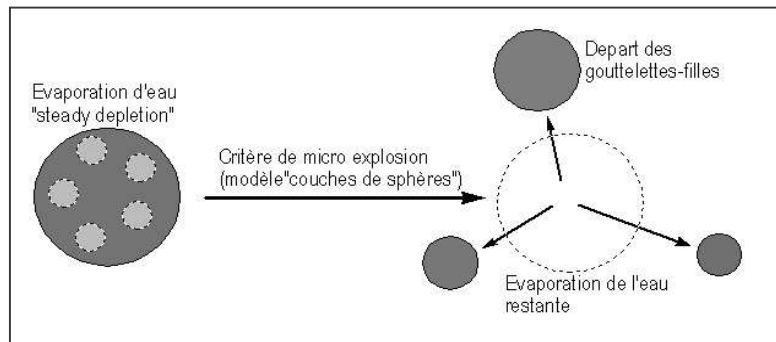


Figure 3 : Modélisation d'une gouttelette d'émulsion

$$dm_{H_2O} = f(dm_{H_2O} + dm_{C_{19}H_{30}}) \quad (9)$$

8 gouttelettes-filles	Diamètres		5 aléatoires compris dans $D_m \pm 0,25.D_m$ les 3 restants sont égaux et correspondent au reste de fioul dans la gouttelette d'émulsion
	Vitesses relatives	modules	aléatoires entre 8 et 15 $m.s^{-1}$
directions		uniformément réparties de 0 à $15.\pi/8$	

Tableau 2 : Gouttelettes issues de la micro explosion (« gouttelettes-filles »)

3. Résultats

La modélisation du spray en combustion exposée précédemment est résolue par une méthode numérique aux volumes finis, le domaine étant divisé par un maillage quadratique (2,5 mm. de côté, soit 240000 cellules). Peu de différences ont été observées avec 375000 cellules.

Le premier résultat inspecté est la longueur de flamme, et sa répartition (figure 4). En effet, d'après des observations reportées dans la littérature, la longueur de flamme est grossièrement proportionnelle à la fraction de fioul dans l'émulsion, et la combustion est plus intense sur l'axe de la flamme avec une émulsion qu'avec du combustible pur [9]. Les résultats exposés figure 4 montrent pour l'émulsion un taux de réaction maximum 60% plus élevé, et 50 cm en amont par rapport au fioul pur.

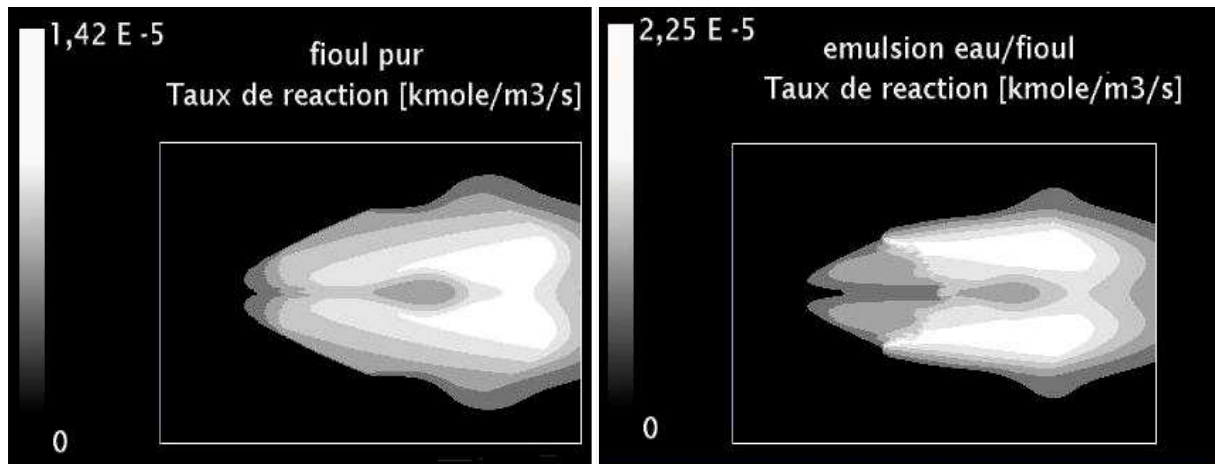


Figure 4 : Résultats – flammes obtenues

Les champs de température avec et sans émulsion sont aussi un résultat important car facilement comparable à des données expérimentales [9]. La figure 5 expose les distributions radiales de température (symétriques) à différentes positions de l'axe de la flamme (longueur du domaine : 1,5 m). Avec une émulsion, la température est plus élevée de 50, voire 100 K à partir d'1,15 m. sur l'axe de la flamme, ce qui est en accord avec la tendance généralement observée : une flamme plus étroite et plus intense sur son axe avec une émulsion, par rapport au combustible pur [9].

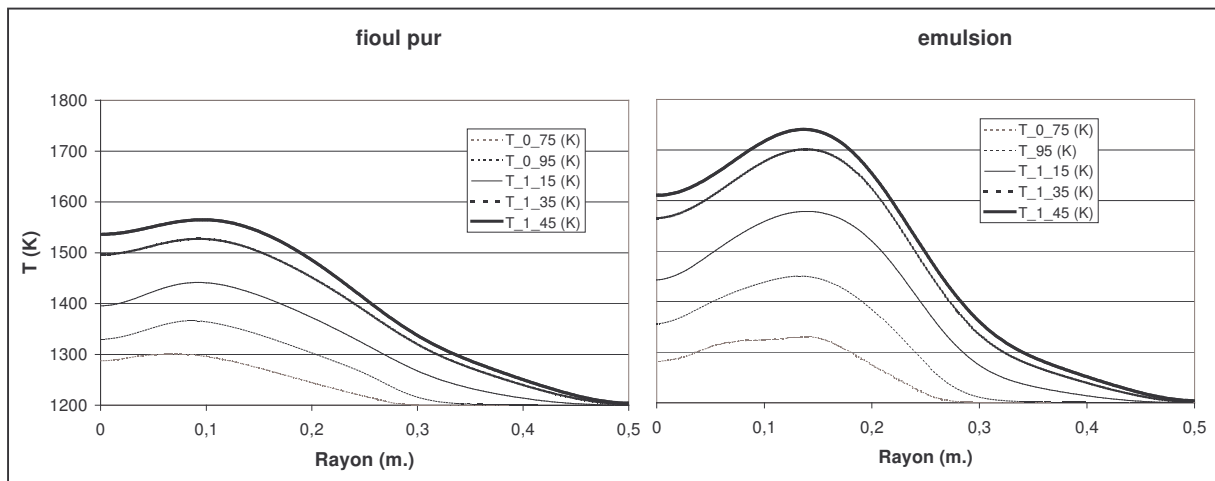


Figure 5 : Résultats - champs de température

A titre qualitatif, les champs de température obtenus numériquement (figure 5) comparés avec des mesures expérimentales sur une flamme au gasoil de plus petite taille (figure 6) présentent des tendances similaires d'augmentation de la température, en particulier sur l'axe de la flamme ($r = 0$).

4. Conclusion

En conclusion, ce travail apporte une modélisation globale de la combustion des sprays d'émulsion, en particulier du phénomène de micro explosion. Les résultats sont en accord avec les tendances observées expérimentalement dans la littérature : la flamme est plus courte et plus intense sur son axe avec une émulsion qu'avec un combustible pur. Sur le plan qualitatif, cette comparaison est également similaire à des mesures effectuées sur une flamme plus petite. A l'avenir, des mesures de champ de température sur des flammes au fioul lourd de même puissance devraient permettre une validation quantitative de ce modèle. La prise en compte d'un nombre plus important de gouttelettes dans le spray devrait également être testée.

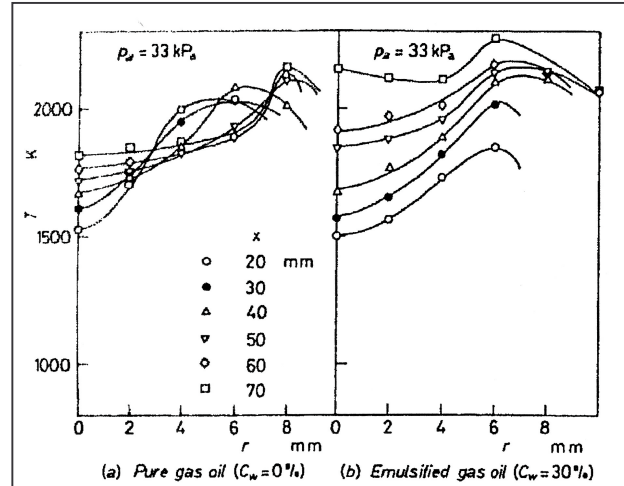


Figure 6 : Mesures expérimentales [8]

Références

- [1] V.M. Ivanov, P.I. Nefedov, Experimental investigation of the combustion process of natural and emulsified liquid fuels, *Trudy Goryachikh Iskopyemykh*. 19 (1962) 35-45.
- [2] Dryer, F.L., *Water addition to practical combustion systems – concepts and application*, NTIS Report No. DE82021289.
- [3] Dominique Tarlet, Jérôme Bellettre, Mohand Tazerout, Camal Rahmouni, *Simulation numérique de la combustion d'une gouttelette d'émulsion de l'eau dans l'huile*, congrès Société Française de Thermique, Reims (France) 2005, pp.349-354.
- [4] A.H. Lefebvre, *Atomization and sprays*, Ed. Taylor & Francis (1989).
- [5] B.E. Launder, D.B. Spalding, *Lectures in mathematical models of turbulence*, Academic press, London (1972).
- [6] B.F. Magnussen, B.H. Hjertager, *On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion*, 16th Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute (1976).
- [7] T. Furuhashi, S. Tanno, T. Miura, Y. Ikeda, T. Nakajima, Performance of numerical spray combustion simulation, *Energy. Convers. Mgmt.*, 38-10 (1997), 1111-1122.
- [8] J.H. Rhim, S.Y. No, G.Y. Lee, O.Y. Yang, Spray characteristics of water/oil emulsified fuel, *Eighth Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray systems* (Pasadena, CA, USA, 2000).
- [9] Y. Mizutani, A. Taki, *Mechanisms and characteristics of combustion of water-in-oil emulsion sprays*, ASME report No. 80-WA/HT-36, 2-7 (1980).
- [10] W.E. Ranz, W.R. Marshall, Jr., Evaporation from drops, *Chem. Eng. Proc.*, 48 (1952), 141-180.
- [11] C.K. Law, C.H. Lee, N. Srinivasan, Combustion characteristics of water-in-oil emulsion droplets, *Combustion and Flame*, 37 (1980), 125-143.
- [12] M. Mattiello, M. Cosmai, L. Pistone, Experimental evidence for microexplosions in water/fuel oil emulsion flames inferred by laser light scattering, *24th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute (1992), 1573-1578.
- [13] H. Xu, C.G. Zhu, Y.B. Shen, D. Poulidakos, Holographic investigation of microexplosion in an emulsified diesel oil spray, *Atomization and Sprays*, 3 (1993), 193-202.