

# Etude expérimentale de l'influence de la taille des gouttelettes d'eau dispersées dans le phénomène de micro-explosion d'une goutte d'émulsion d'eau dans l'huile.

Ernesto MURA<sup>1</sup>, Christophe JOSSET<sup>2</sup>, Khaled LOUBAR<sup>1</sup>, Jérôme BELLETTRE<sup>2\*</sup>.

<sup>1</sup> GEPEA, UMR 6144 CNRS, EMN, 4, rue Kastler, 44307 Nantes cedex 3.

<sup>2</sup> LTN, UMR 6607 CNRS, Univ-Nantes, rue Pauc, 44306 Nantes cedex 3.

\* (auteur correspondant : [jerome.bellettre@univ-nantes.fr](mailto:jerome.bellettre@univ-nantes.fr))

**Résumé** - La combustion des produits émulsionnés avec l'eau est une méthode propre de valorisation des produits huileux grâce à un phénomène connu sous le nom de *micro-explosion*. L'objectif de ce travail est de trouver expérimentalement la relation entre la taille des gouttelettes d'eau dispersées dans l'émulsion et les caractéristiques des gouttes d'huile fragmentées après la micro-explosion, en utilisant une technique de capture d'image par camera rapide. Les résultats montrent que la taille des gouttelettes d'eau dispersées joue un rôle très important sur le phénomène de micro-explosion et les effets mettent en évidence l'existence d'un optimum.

## Nomenclature

$E(R)$	énergie de formation en fonction de $R$ , $J$	$V$	volume, $m^3$
$P$	pression, $Pa$	$D_{32}$	diamètre moyen de Sauter, $m$
$P'$	pression du vapeur, $Pa$	$D_{32H_2O}$	$D_{32}$ des gouttes d'eau dispersées, $m$
$K_T$	compressibilité isotherme, $Pa^{-1}$	$D_0$	diamètre initial de la goutte d'émulsion, $m$
$R$	rayon, $m$		
$R_{crit}$	rayon critique, $m$		
$T$	température, $K$		
			<i>Symboles grecs</i>
		$\sigma$	tension superficielle, $Nm^{-1}$

## 1. Introduction

La combustion des produits émulsionnés avec l'eau est considérée comme une méthode efficace pour la valorisation des produits de basse qualité comme les déchets huileux d'origine industrielle ou agroalimentaire [1]. L'avantage offert par l'utilisation des émulsions d'eau dans l'huile (W/O) est représenté par une nette réduction des émissions des  $NO_x$  et des particules dans les fumées après la combustion. Cette propriété est strictement liée à la présence de la vapeur d'eau pendant le processus de combustion et à un phénomène connu sous le nom de *micro-explosion* ou de *deuxième atomisation*.

Quand une goutte d'émulsion W/O est chauffée, dans une flamme par exemple, un processus de coalescence implique les gouttes d'eau dispersées dans la matrice huileuse [2] [3]. Ce processus, normalement spontané à température ambiante, est accéléré, grâce au fort gradient de température, par les collisions entre les gouttes produites par l'écoulement convectif et par la réduction de la viscosité et de l'efficacité du surfactant. Le résultat est une séparation entre les deux produits qui peut être plus ou moins complète.

Pendant cette première phase de coalescence, la température de la goutte augmente et, en fonction de plusieurs variables (température d'ébullition, pression, quantité d'eau dans

l'émulsion), elle peut dépasser la température d'ébullition sans que l'eau contenue dans la goutte change de phase [4]. Cette condition est appelée état métastable. Dans un plan (P,V) on peut définir l'état métastable comme la région comprise entre la courbe de saturation et la limite spinodale, où un fluide peut subsister sans changer de phase. Pour un fluide pur, cette limite peut être définie, en termes de quantités mesurables, à l'aide d'un critère portant sur la compressibilité isotherme :

$$\left( -\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T = \frac{1}{VK_T} > 0 \quad (1)$$

La rupture de cet état pourra survenir, sous l'action d'une petite perturbation, pour des températures inférieures ou égales à celles définies par la limite de stabilité (courbe spinodale :  $(\partial P/\partial V)_T=0$ ), avec la germination de noyaux de vapeur [5].

Cette germination se vérifie grâce à la nucléation de petits embryons de vapeur dans la phase liquide par un processus qui peut être de nature homogène ou hétérogène, en fonction de la présence d'éléments extérieurs comme des impuretés, des cavités présentes dans une surface adjacente ou par la présence de gaz dissout dans le liquide.

En considérant une nucléation homogène, on peut définir la quantité d'énergie  $E$  nécessaire à la formation d'une sphère de vapeur en fonction de son rayon  $R$  comme :

$$E(R) = \frac{4}{3} \pi R^3 (P - P') + 4\pi R^2 \sigma \quad (2)$$

$E(R)$  représente la compétition entre l'énergie de formation volumique et l'énergie de formation d'une surface. Quand la taille du noyau atteint une dimension telle que sa croissance devient spontanée, on dit que le noyau a dépassé son rayon critique ( $R_{crit}$ ) :

$$\frac{dE(R)}{dR} = 0 \Rightarrow R_{crit} = \frac{2\sigma}{(P' - P)} \quad (3)$$

Le résultat final de cette évolution est une importante croissance du taux de nucléation, en fonction d'une petite variation de la température, qui ramène l'eau à une violente expansion de la phase vapeur [6] [7]. L'énergie libérée à ce moment rompt la coquille d'huile distribuée autour de l'eau en causant sa fragmentation en plusieurs petites gouttelettes. Il s'agit alors du phénomène connu sous le nom de *micro-explosion*.

La réduction de la taille des gouttelettes d'huile dans la flamme conduit à un processus de vaporisation de l'huile efficace générant ainsi une combustion complète.

Les nombreux travaux sur ce sujet restent incomplets sur les aspects relatifs aux causes du déclenchement de la micro-explosion et surtout à ses conséquences. L'objectif de ce travail est de trouver expérimentalement la relation existant entre la taille des gouttelettes d'eau dispersées dans l'émulsion et les caractéristiques des gouttes d'huile fragmentées après la micro-explosion.

## 2. Installation et méthode expérimentale

L'installation est composée par une plaque chauffante dotée d'une petite surface circulaire en aluminium d'un diamètre de 5,71 mm, chauffée électriquement, sur laquelle la goutte d'émulsion est placée, figure 1. La surface de la plaque chauffante est maintenue à la

température de 636K pour garantir un effet *Leidenfrost*, c'est-à-dire la lévitation sur sa propre vapeur des gouttes d'émulsion en ébullition. On réduit ainsi au maximum l'éventualité de nucléations hétérogènes par l'effet du contact de la goutte avec la surface [8]. La taille des gouttes d'émulsion est comprise dans la gamme 2,28 et 3,05 mm. L'installation est aussi dotée d'un système d'acquisition d'images composé d'une camera rapide et d'une source lumineuse halogène de 650W. La fréquence d'acquisition de la caméra peut varier de 7,2 à 13,5 kHz.

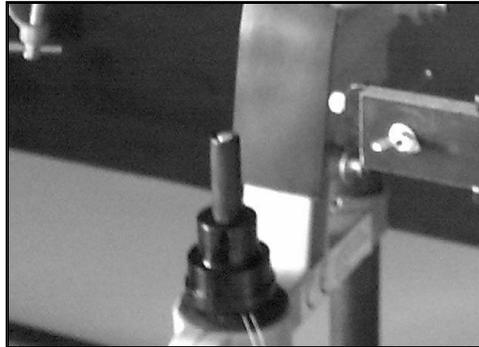


Figure 1: Image de la plaque chauffante

Les émulsions, préparées en utilisant de l'huile de tournesol, de l'eau et du surfactant (Span83), ont été divisées en deux groupes : A) Emulsions *Iso-eau*, avec une fraction moyenne constante d'eau (30% en masse) ; B) Emulsions *Iso-surfactant* avec un contenu constant de surfactant (5% en masse). Une fois évaluée la stabilité dans le temps, les émulsions sont été classées en fonction de la granulométrie des gouttes d'eau dispersées dans la matrice huileuse, par microscope. La taille des gouttes, caractérisées par le Diamètre Moyen de Sauter ( $D_{32H_2O}$ ) [9] est comprise entre un minimum de 2,56 et un maximum de 17,39  $\mu\text{m}$ , Tableau 1.

Huile [%]	67,5	60	62,5	70	65	67,5	62,5	60
Surfactant [%]	2,5	5	5	5	5	5	7,5	10
Eau [%]	30	35	32,5	25	30	27,5	30	30
$D_{32H_2O}$ [ $\mu\text{m}$ ]	17,39	12,85	7,22	7,17	4,7	4,16	3,83	2,56

Tableau 1 : Caractéristiques des émulsions testées en fonction de leur composition massique

### 3. Résultats

Lorsque la goutte d'émulsion est placée sur la surface de la plaque chauffante, du fait de l'effet *Leidenfrost*, elle garde une forme sphéroïdale. A partir de cet instant, le processus de coalescence interne à la goutte commence et l'eau, grâce à la différence de densité avec l'huile, tend à se placer dans la partie basse de la goutte. A la rupture de la condition de métastabilité, on assiste au phénomène de la micro-explosion et la violente vaporisation de l'eau fragmente la coquille d'huile en plusieurs petites gouttes *filles*.

En analysant les images enregistrées à 10 kHz pendant les expériences, on détecte des différences quantitatives entre les émulsions en fonction de la taille des gouttes d'eau dispersées, comme on peut le voir sur la figure 2. Ces différences sont illustrées par l'étude de

trois caractéristiques importantes concernant les gouttes d'huile fragmentées (la taille et le nombre des gouttes ainsi que la vitesse d'avancement des gouttes filles).

Les images obtenues montrent l'existence d'un optimum relatif au phénomène de micro-explosion pour l'émulsion avec un  $D_{32H_2O} = 4,7\mu\text{m}$ . Cet optimum porte à la fois sur le nombre, la taille et la vitesse d'avancement des gouttes détectées. Comme on peut le voir dans la figure 3, concernant la dimension des gouttes fragmentées après la micro-explosion en fonction du temps, la réduction de la taille des gouttes d'huile est plus remarquable pour les émulsions avec un petit  $D_{32H_2O}$ , et il présente un optimum pour  $D_{32H_2O} = 4,7\mu\text{m}$ . Au dessous de cet optimum, les tailles des gouttelettes *filles* ont tendance à augmenter.

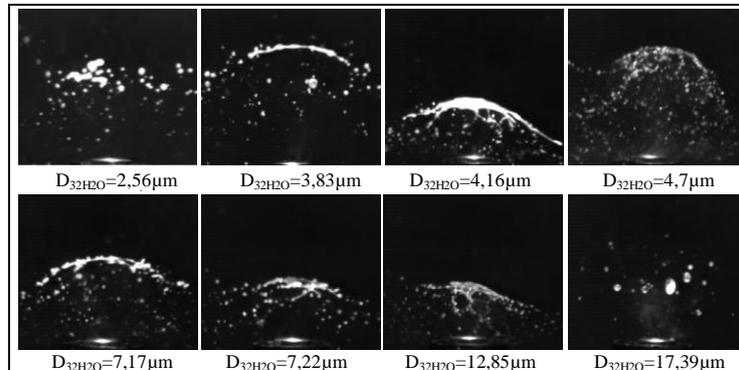


Figure 2 : Images au moment de la fragmentation maximale.

Pour mettre en évidence la relation entre la taille des gouttes d'eau dispersées et la micro-explosion, on peut se référer au maximum du nombre de gouttes détectées en fonction de  $D_{32H_2O}$ . La figure 4 montre clairement la tendance des effets de fragmentation et l'existence d'un maximum.

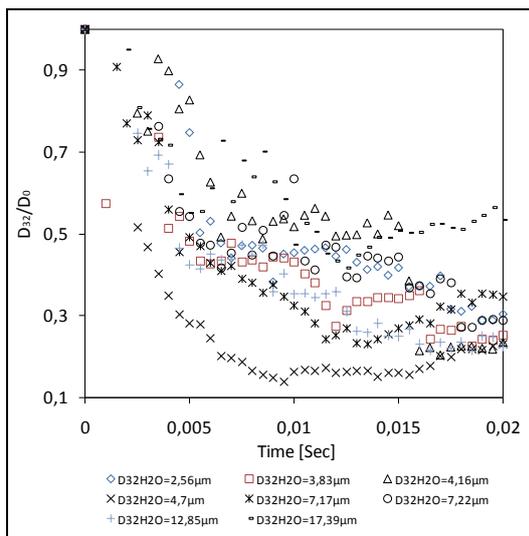


Figure 3: Taille adimensionnelle  $[D_{32}/D_0]$  des gouttes d'huile filles après la micro-explosion en fonction du temps.

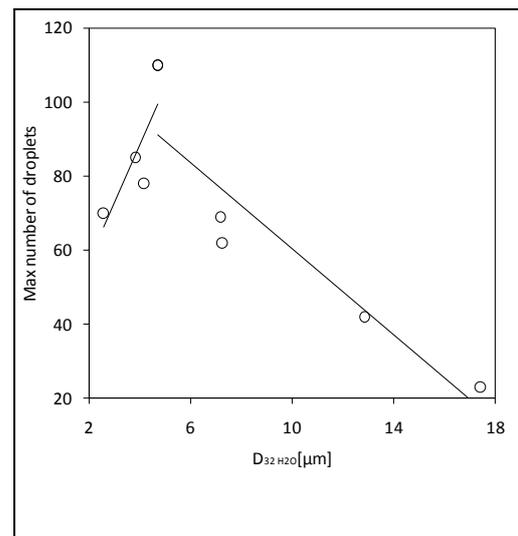


Figure 4: Nombre maximale des gouttes d'huile filles détectées après la micro-explosion en fonction  $D_{32H_2O}$ .

Ce résultat est qualitativement vérifié par le modèle proposé par Fu & al. [10], qui montre que, pour différentes conditions fixées, il existe une taille des gouttes d'eau dispersées dans l'huile pour laquelle un optimum est obtenu.

Un autre outil permet également d'évaluer le comportement de chaque échantillon. Il s'agit d'examiner les diagrammes polaires de la vitesse d'avancement des gouttes filles. En effet, dans ces diagrammes sont indiquées les vitesses moyennes des gouttes fragmentées après la micro-explosion qui se déplacent, dans le plan perpendiculaire à l'axe focale de la camera rapide. La figure 5 montre la forme des lignes d'Iso-vitesse relatives aux émulsions *Iso-eau*, et cela pour trois instants. L'émulsion avec  $D_{32H_2O} = 4,7\mu\text{m}$  est celle qui donne les valeurs de vitesse les plus élevées, en accord avec la tendance montrée précédemment.

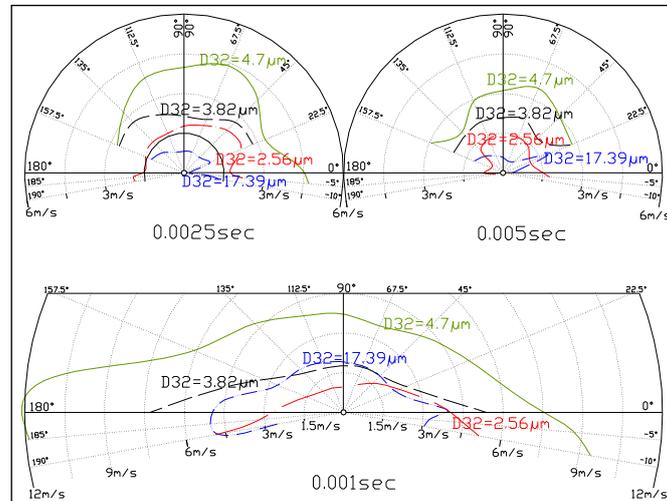


Figure 5 : Vitesse du front d'huile pour les émulsions *Iso-water* pendant les temps  $t=1\text{ms}$  ;  $2,5\text{ms}$  ;  $5\text{ms}$  après la micro-explosion.

On peut expliquer cette tendance en considérant le phénomène de séparation des phases avant la micro-explosion. En effet, les émulsions qui ont donné les effets de micro-explosion les plus intenses ont été celles pour les quelles une nette séparation a été observée. On peut voir sur la figure 6 que les effets de la micro-explosion, concernant la goutte avec une nette séparation (a), correspond à une fragmentation efficace.

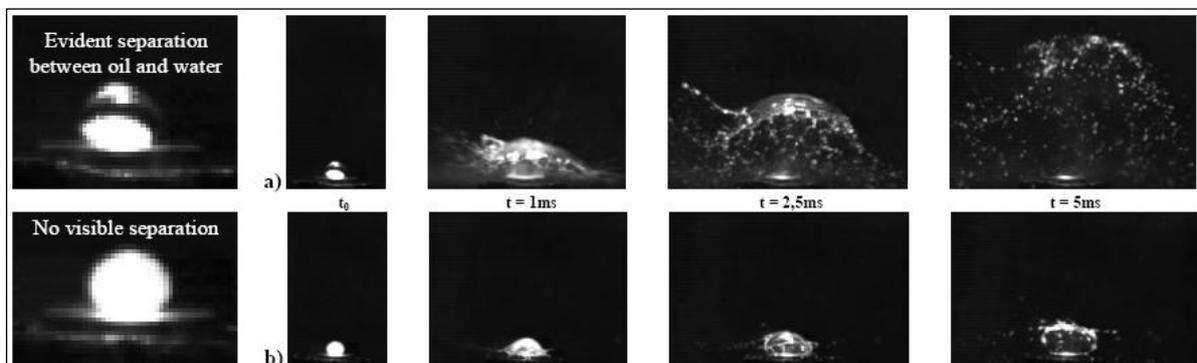


Figure 6: Séquences pour deux émulsions avec deux niveaux de séparation entre eau et huile.

#### 4. Conclusions

Dans ce travail, une étude expérimentale a été réalisée concernant le phénomène de micro-explosion pour des émulsions W/O, en utilisant une technique d'acquisition rapide d'image. Les résultats montrent quantitativement que la taille des gouttelettes d'eau dispersées joue un

rôle très important sur les effets de la micro-explosion. L'analyse des données nous donne une tendance : en réduisant la taille des gouttes d'eau dispersées, l'efficacité de la fragmentation augmente progressivement jusqu'à un maximum correspondant à  $D_{32H_2O}=4,7\mu\text{m}$ , puis décroît. Cette tendance semble liée au degré de coalescence atteint par les gouttes d'eau juste avant la micro-explosion. Les travaux futurs se focaliseront notamment sur l'étude du phénomène de coalescence précédant la micro-explosion.

## Références

- [1] M.Senthil Kumar, A.Kerihuel, J.Bellettre, M.Tazerout. *Effect of Water and Methanol Fractions on the Performance of a CI Engine Using Animal Emulsion as Fuel*. J.Power and Energy, Proc.IMECHE, (2005), Vol.219 Part A./pp.583-592
- [2] D.Segawa, H.Yamasaki, T.Kadota, H.Tanaka, H.Enomoto, M.Tsue. *Water-Coalescence in an Oil-in-Water Emulsion Droplet Burning under Microgravity*. Proceedings of the Combustion Institute, (2000), Vol 28, pp.985-990.
- [3] D.Segawa, H.Tanaka, H.Enomoto, T.Kadota, H.Yamasaki. *Phase-Separation Inside a Burning Droplet of Oil-in-Water Emulsion*. Proc ISME Tokyo, (2000), Vol.2, pp.511-516.
- [4] T.Kadota, H.Tanaka, D.Segawa, S.Nakaya, H.Yamasaki,. *Microexplosion of an Emulsion Droplet During Leidenfrost Burning*. Proceedings of the Combustion Institute, (2007), Vol 31, pp.2125-2131.
- [5] P.G. Debenedetti. *Metastable Liquids, Concepts and Principles*. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, (1996)
- [6] C.Caupin, E.Herbert. *Cavitation in Water: a Review*. C.R. Physique, (2006), Vol.7, pp.1000-1017.
- [7] G.J. Brereton, R.J. Crilly, J.R.Spears. *Nucleation in Small Capillary Tubes*. Chemical Physics, (1998) Vol.230, pp.253-265.
- [8] K.Kymoto, Y.Owashi, Y.Omae. *The Vaporizing Behavior of the Fuel Droplet of Water in Oil Emulsions on the Hot Surface*. Bulletin of JSME, (1986), Vol.29, N° 258, pp. 4247-4255.
- [9] D.L.Urban, F.L.Dryer. *New results on coke formation in the combustion of heavy fuel droplets*. International Symposium on Combustion, (1990), pp. 1437-1443.
- [10] W.B.Fu, L.Y.Hou, L.Wang, F.H.Ma. *A Unified Model for the Micro-Explosion of Emulsified Droplets of Oil and Water*. Fuel Processing Technology, (2002), Vol. 79, pp.107-119.