

Comparaison expérimentale des émissions de particules issues de flammes de fioul lourd pur et en émulsion

Dominique TARLET¹, Jérôme BELLETTRE^{2*}, Mohand TAZEROUT³, Camal RAHMOUNI¹

¹Veolia Environnement R&D (CreeD)

291 av. Dreyfous Ducas – Zone portuaire de Limay 78520 LIMAY

²Laboratoire de thermocinétique de Nantes (LTN) – UMR CNRS 6607

rue Christian Pauc – BP 90604 – 44306 NANTES Cedex 03

³Ecole des Mines de Nantes – GEPEA UMR CNRS 6144

rue Alfred Kastler – BP 20722 – 44307 NANTES Cedex 03

*(auteur correspondant : Jerome.Bellettre@univ-nantes.fr)

Résumé - Brûler des combustibles comme le fioul lourd en émulsion avec l'eau permet de réduire les émissions de résidus carbonés solides (particules) par rapport au fioul pur, grâce à la « seconde atomisation » due à la vaporisation brusque (<0,1 ms) de l'eau dans l'émulsion. Cette étude est menée sur une chaudière de puissance modeste (~200 kW) alimentée en fioul lourd additivé, avec et sans émulsion d'eau. L'usage d'une émulsion permet de mesurer une baisse reproductible des émissions de particules par rapport au combustible pur, ainsi qu'une variation de leur granulométrie indicatrice de seconde atomisation.

Nomenclature

C_p	concentration en particules, $mg.m^{-3}$	T	température, K
$e\%$	excès d'air	<i>Symboles grecs</i>	
Q_f	débit de fumées humides, $m^3.h^{-1}$	μ_p	indicateur de pollution en particules
V_a	pouvoir comburivore, $m^3.kg^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
V_f'	pouvoir fumigène sec, $m^3.kg^{-1}$	i	injection

1. Introduction

Les fiouls lourds, les huiles usagées ou les graisses animales peuvent être utilisés en tant que combustibles. Brûler ces combustibles en émulsion avec l'eau permet de diminuer la longueur de flamme [1] et la formation de résidus carbonés solides (particules) [2,3] par rapport au combustible pur, monophasique. Ces effets sont dus à la micro explosion, c'est-à-dire la vaporisation rapide (<0.1 ms.) des gouttelettes d'eau internes de l'émulsion. Les gouttelettes d'eau disloquent ainsi chaque gouttelette d'émulsion en plusieurs « gouttelettes-filles » plus petites : c'est la seconde atomisation. Ainsi la durée de combustion est plus courte, et la superficie de l'interface avec l'air comburant est augmentée. L'additivation du fioul lourd avec un combustible moins visqueux comme le fioul domestique permet par ailleurs d'élargir son champ d'application : il peut alors être utilisé sur un brûleur de petite puissance (< 500 kW) avec des canalisations et une cuve qui ne sont ni chauffées, ni calorifugées. Le combustible préparé se compose de fioul lourd additivé avec 10 ou 20% en volume de fioul domestique, le tout en émulsion avec une proportion d'eau variable entre 2 et 6%. Une chaudière MONARCH expérimentale est utilisée dans ce travail à une puissance de flamme de ~200 kW. La concentration des gaz issus de la combustion (O_2 , CO_2 , CO , NO_x) est mesurée. Un granulomètre laser GRIMM E-107 utilisant le principe du *Laser Light*

Scattering permet d'effectuer une mesure relative de la granulométrie des particules émises par les flammes de différents combustibles, dans la gamme de diamètre comprise entre 0,5 et 20 μm . Ces diamètres correspondent aux *cénosphères* solides produites par pyrolyse dans la phase liquide de gouttelettes de combustible dense et visqueux comme le fioul lourd, contenant entre 3 et 15% d'asphaltènes précurseurs [4] de ces cénosphères. En particulier, le diamètre de ces cénosphères est représentatif du diamètre des gouttelettes où elles ont été produites [5]. C'est pourquoi cette granulométrie, comparée à celle du combustible sans émulsion, constitue un indicateur de seconde atomisation. L'indicateur μ_p choisi pour rendre compte des émissions globales de particules est le rapport entre le débit massique total des particules émises dans la gamme de diamètre mesurée, et le débit massique de fioul lourd entrant dans la composition du combustible injecté par le brûleur.

2. Installation d'essais et métrologie

2.1. Installations d'essais

Les essais de combustion sont réalisés sur une chaudière de puissance modeste (max. 300 kW) alimentée par une cuve d'émulsification (Figure 1, « FOD » = fioul domestique, « FOL » = fioul lourd). Le fioul lourd est chauffé à 70°C pour être amené à cette cuve d'émulsification, afin d'abaisser sa viscosité et de faciliter son écoulement ; cependant la cuve d'émulsification, composée de polymère PEHD et d'une capacité de 800 litres n'est ni chauffée, ni calorifugée. Elle est surmontée d'un mélangeur électrique (MILTON ROY MIXING) d'une puissance de 11 kW terminé par une hélice optimisée pour réaliser l'émulsification du combustible. Les composants du combustible autres que le fioul lourd (FOL) sont directement insérés dans la cuve d'émulsification (couvercle amovible). La chaudière GUILLOT est composée de tubes d'eau sur lesquels passe l'écoulement des fumées. En amont de ces tubes, la chambre de combustion est cylindrique, de longueur 1,20 m et de diamètre 0,54 m. A l'extrémité « amont » de la chambre de combustion, le brûleur RIELLO fonctionne à une puissance comprise entre 150 et 300 kW.

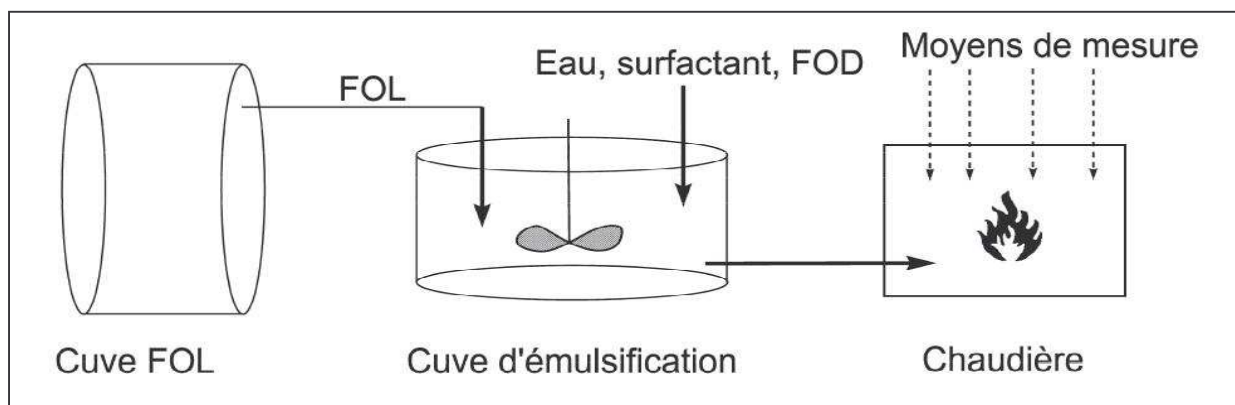


Figure 1 : Installations d'essais

2.2. Métrologie

Une baie d'analyse regroupe les mesures de concentration effectuées sur un échantillon de gaz secs issu de l'échappement de la chaudière : O_2 , CO_2 , CO , NO_x . Une incertitude relative de 5% est considérée sur ces mesures de concentration, de même pour la mesure du débit de fumées humides Q_f . L'excès d'air $e\%$ est fonction de la concentration $[\text{O}_2]$ mesurée, et calculé par l'équation 1. Le rendement est évalué par la mesure la puissance utile P_u et de la puissance de flamme P_c . La puissance utile P_u est calculée à partir de la mesure du débit d'eau

dans les tubes, ainsi que de la température de l'eau en amont et en aval de ces tubes (équation 2). Ces mesures de température d'eau (au moyen de thermocouples) et du débit d'eau résultent dans une incertitude relative inférieure à 5% pour la puissance utile. La puissance de la flamme P_c est déduite de la mesure de la consommation de combustible, sur laquelle une incertitude relative de 5% est également considérée.

$$e\% = \frac{V_f'}{V_a} \times \frac{[O_2]}{21\% - [O_2]} \quad (1)$$

$$P_U = Q_W C_{P,W} (T_{aval} - T_{amont}) \quad (2)$$

Afin de mesurer la concentration en particules (résidus carbonés solides) C_P , un échantillon de fumées humides est prélevé à l'échappement de la chaudière, et amené à un diluteur à air comprimé (2 bar) par l'intermédiaire d'une ligne chauffée à 180°C destinée à maintenir l'eau issue de la combustion à l'état de vapeur (Figure 2). Le diluteur est considéré comme une division par 9 de la concentration en particules, n'intervenant dans aucun calcul d'incertitude.

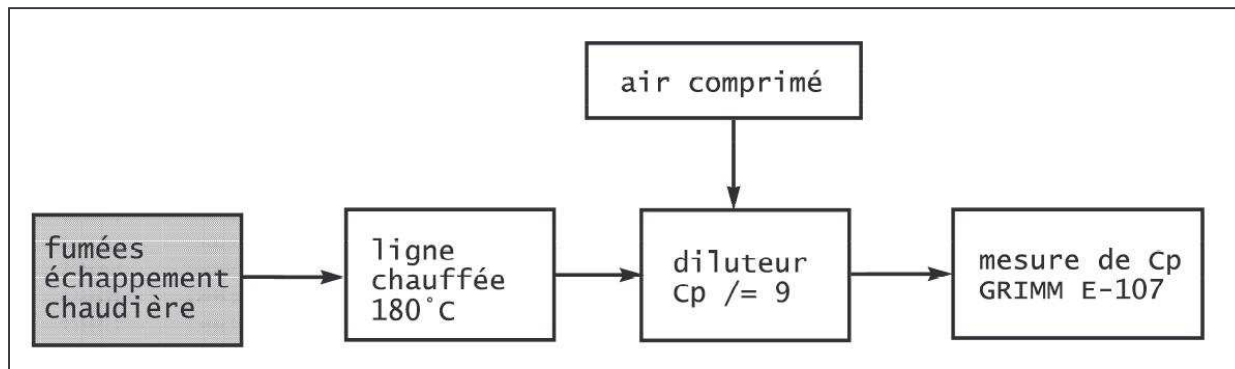


Figure 2 : Chaîne de mesure de C_P

Le granulomètre GRIMM E-107 fonctionne sur le principe du « Laser Light Scattering » permettant de compter le nombre de particules appartenant à 16 classes de diamètre entre 0,2 et 20 μm , puis de leur attribuer une concentration massique (mg.m^{-3}) à partir d'une masse volumique arbitraire appliquée à des sphères ayant ces diamètres. La somme de ces concentrations est égal à C_P . Ainsi la granulométrie des particules et leur concentration totale C_P peuvent faire l'objet d'une mesure relative à un témoin. Cette gamme de diamètres (de 0,2 à 20 μm) correspond aux particules (*cénosphères*) produites par pyrolyse en phase liquide (~95% en masse de particules formées dans la combustion d'un fioul lourd [3]). En effet, le fioul lourd contient entre 3 et 15% d'asphaltènes précurseurs [4] de ces particules.

Pour rendre compte de la pollution en particules engendrée par des combustibles additivés (de 10 à 20% de fioul domestique) et émulsionnés, l'indicateur μ_P (équation 3) est utilisé. Il exprime le ratio entre les débits massiques de particules à l'échappement, et de la fraction de fioul lourd à l'injection $Q_{C,FOL}$. Cet indicateur n'est pas intrinsèquement fonction de l'excès d'air, contrairement à la concentration en particules C_P . Il est justifié par une mesure préalable de C_P , lors de la combustion de fioul domestique pur à une puissance de 150 et 300 kW, où sa valeur s'est avérée négligeable (<1% de la valeur mesurée avec du fioul lourd).

$$\mu_P = \frac{Q_f \times C_P}{Q_{i,FOL}} \quad (3)$$

Les incertitudes relatives sur l'excès d'air $e\%$ et sur l'indicateur μ_P résultent de l'équation 4, avec les incertitudes relatives des différentes grandeurs mesurées dont ces indicateurs sont fonction, selon la notation $U = f(u_i)$.

$$\Delta U = \sum_i \left| \frac{\partial f}{\partial u_i} \right| \times \Delta u_i \quad (4)$$

3. Préparation du combustible et protocole d'essais

Le combustible est préparé dans la cuve d'émulsification (Figure 1) à l'aide du mélangeur fonctionnant entre 550 et 800 tours par minute. Les pourcentages indiqués ici pour la composition du combustible sont les fractions volumiques. Ainsi la proportion minimale de fioul lourd est de 75%, pour remplir un objectif de valorisation industrielle. L'additivation au fioul domestique (de 10 à 20%) permet d'abaisser la viscosité pour la rendre inférieure au seuil maximal spécifié sur le brûleur RIELLO (viscosité cinématique $< 152 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à 50°C). L'eau en émulsion est ajoutée à proportion de 3,5% jusqu'à 6%, en fines gouttelettes de diamètres compris entre 1 et 5 μm (mesurés par un microscope optique calibré au moyen d'une graduation). Le surfactant (*sorbitan sesquioleate* ou SPAN 83) est ajouté en proportion négligeable (« traces » $< 0,5\%$).

Pour la comparaison de la pollution émise par l'utilisation de différents combustibles, des paramètres de combustion identiques sont requis (Tableau 1). La puissance de flamme P_C est proportionnelle au débit de combustible. L'excès d'air $e\%$ est maintenu entre 35 et 50%, de manière à « encadrer » les conditions de fonctionnement industrielles. La pression P_i et la température d'injection T_i , en raison de leur influence sur la forme et la granulométrie du spray en combustion [6], sont également maintenues à des niveaux stables. Sur un injecteur de brûleur similaire, une multiplication de P_i par 5 est nécessaire à diminuer le diamètre moyen (SMD) de moitié dans le spray [7]. Au cours d'une période de fonctionnement stable d'une heure au minimum, les mesures issues des différents appareils sont réunies pour former le résultat de l'essai.

Paramètre de combustion	Intervalle observé au cours des essais
P_C	[180, 220] kW
$e\%$	[20, 50]%
P_i	[15, 20] bar
T_i	[100, 130] $^\circ\text{C}$

Tableau 1 : Paramètres de combustion

4. Résultats et interprétation

Une série de tests préliminaires à un excès d'air intermédiaire ($e\% \sim 20\%$) est approfondie par une série d'essais de reproductibilité à un excès d'air important ($e\% \sim 50\%$), de manière à « encadrer » les conditions de fonctionnement industriel. La série de tests préliminaires est menée sur la base d'un mélange (80% FOL + 20% FOD) présent au départ dans la cuve d'émulsification, avec ajout d'eau en émulsion (de 3,5% à 6%). En effet la micro explosion peut survenir dès $\sim 2,5\%$ d'eau en émulsion à condition d'être assez finement dispersée [3], comme c'est le cas ici (diamètre des gouttelettes d'eau internes de l'émulsion entre 1 et 5 μm). Le Tableau 2 regroupe les conditions de fonctionnement au cours de cette série de tests préliminaires, avec le rendement thermique μ_C de la chaudière.

Combustible	80%FOL+20%FOD	idem + 3,5% d'eau	idem + 4,5% d'eau	idem + 6% d'eau
P_C (kW)	180	220	215	217
$e\%$	28% +/- 4%	20% +/- 3%	25% +/- 4%	25% +/- 4%
Q_f ($m^3 \cdot h^{-1}$)	530 +/- 27	610 +/- 31	640 +/- 32	590 +/- 30
μ_C	89 % +/- 9%	86% +/- 9%	82% +/- 8%	80% +/- 8%
CO2 (% Vol.)	11,5 %	13,3 %	13 %	13 %
$\mu_P / \mu_{P,0}$ (%)	100 +/- 15	71 +/- 11	75 +/- 11	104 +/- 15

Tableau 2 : Série de tests préliminaires

Les résultats du Tableau 2 indiquent qu'une baisse significative des émissions de particules (29% de baisse de l'indicateur μ_P par rapport au mélange-témoin sans émulsion) est obtenue avec l'émulsification du combustible. Néanmoins, cette baisse des émissions de particules n'est plus observée avec 6% d'eau (on observe même une légère hausse de 4% par rapport au témoin). Les émissions de particules dépendant étroitement du pourcentage d'eau, notre interprétation en est l'influence d'un phénomène causé par le contenu en eau : la micro explosion. La Figure 3 permet de visualiser l'optimum de pollution en particules, observé entre 3,5 et 4,5% d'eau en émulsion dans le combustible.

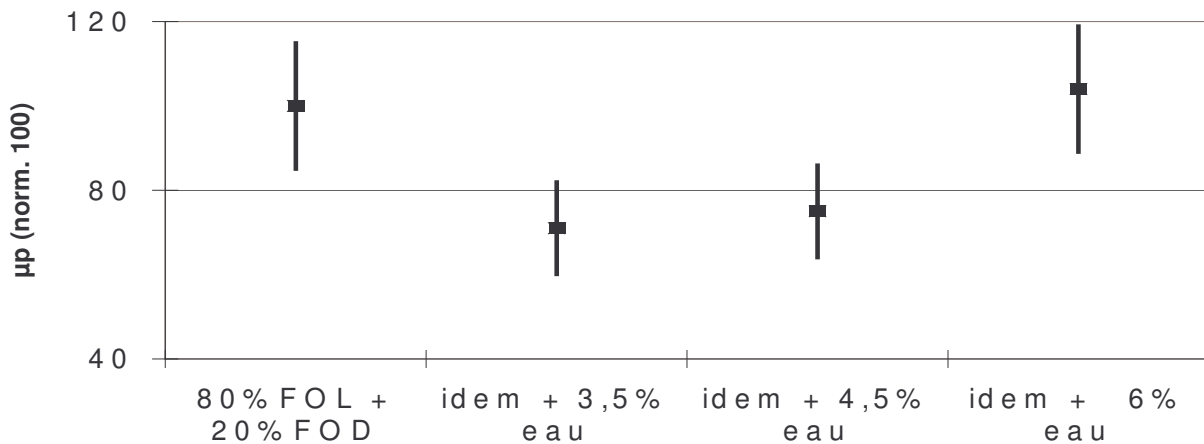


Figure 3 : Optimum de la pollution en particules (indicateur μ_P)

Après cette série de tests préliminaires, la série d'essais de reproductibilité vise à valoriser une proportion supérieure de fioul lourd (~90 %), en mettant à profit un optimum de la pollution en particules, similaire à celui détecté lors des tests préliminaires. Il convient également de vérifier qu'un excès d'air important (~50 %), en permettant une combustion plus complète des particules, ne se substitue pas aux effets de l'émulsification dans ce domaine. On constate (Tableau 3) un optimum similaire à celui observé au cours des tests préliminaires : 35 % de baisse de l'indicateur μ_P avec l'émulsion à 3,5 % d'eau, et un retour à une pollution en particules proche de celle du témoin (6 % de différence) avec 6 % d'eau. Ainsi, même à un excès d'air important (~50 %) leur offrant d'excellentes conditions de combustion, les particules émises subissent une influence significative de l'émulsification du combustible. La figure 4 montre la granulométrie des particules émises : l'augmentation drastique (relativement au témoin) de la concentration en particules de diamètre inférieur à 0,5 μm est interprétée comme des « gouttelettes-filles » qui commencent à former des cénosphères avec l'émulsion à 6% d'eau, ce qui ne serait pas le cas pour l'émulsion à 3,5% d'eau. Ceci serait un indicateur de micro explosion.

Combustible	90% FOL+10% FOD	idem + 3,5% d'eau	idem + 6% d'eau
P_C (kW)	230	200	210
$e\%$	42% +/- 6%	50% +/- 8%	49% +/- 8%
Q_f ($m^3 \cdot h^{-1}$)	700 +/- 35	650 +/- 32,5	680 +/- 34
μ_C	87% +/- 9%	93% +/- 9%	90% +/- 9%
CO2 (% Vol.)	6,3 %	6 %	6 %
$\mu_P / \mu_{P,0}$ (%)	100 +/- 15	65 +/- 10	94 +/- 14

Tableau 3 : Essais de reproductibilité

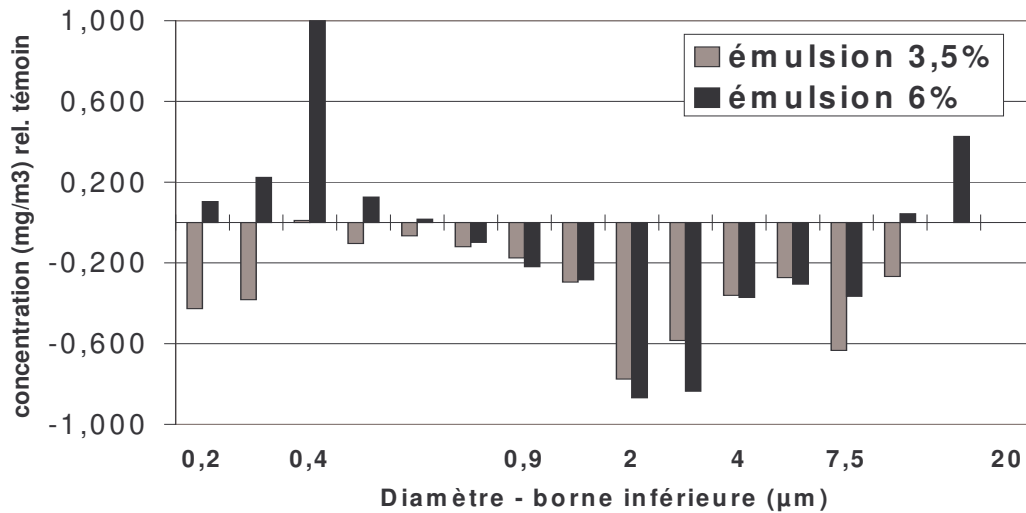


Figure 4 : Optimum de la pollution en particules (indicateur μ_P)

5. Conclusion

Le procédé d'additivation et émulsification du fioul lourd est validé sur une chaudière de puissance modeste (~200 kW) par une baisse significative des émissions de particules. De plus, un indicateur de micro explosion a pu être mis au jour, pour l'émulsion à 6% d'eau. D'autres mesures, notamment de diagnostic optique dans le spray en combustion, permettraient de mener des investigations sur les causes du minimum de pollution en particules constaté.

Références

- [1] Y. Mizutani, M. Fuchihata, M. Muraoka, In situ observation of microexplosion of emulsion droplets in spray flames, *Atomization and sprays*, 11 (2001), 521-532.
- [2] M. Mattiello, L. Cosmai, L. Pistone, Experimental evidence for microexplosions in water/fuel emulsion flames inferred by laser light scattering, *24th Symposium (International) on Combustion* (1992), 1573-1578.
- [3] A. Sjögren, Burning of water-in-oil emulsions, *16th Symposium (International) on Combustion* (1977), 297-305.
- [4] D.L. Urban, S.P.C. Huey, F.L. Dryer, Evaluation of the coke formation potential of residual fuel oils, *24th Symposium (International) on Combustion* (1992), 1357-1364.
- [5] N.J. Marrone, I.M. Kennedy, F.L. Dryer, Coke formation in the combustion of isolated heavy oil droplets, *Combustion Science and Technology*, 36 (1984), 149-170.
- [6] J.M. Ballester, C. Dopazo, Experimental study of the influence of atomization characteristics on the combustion of heavy oil, *Combustion Science and Technology*, 103 (1994), 235-263.
- [7] A.H. Lefebvre, *Atomization and sprays*, Combustion : An international series, Ed. Taylor & Francis (1996).