

## **Impact of the cavitation of a NEXGEN burner nozzle on gaseous emissions and the dynamics of a turbulent kerosene/air flame.**

Ludovic LAMOOT<sup>1\*</sup>, Brady MANESCAU<sup>1</sup>, Khaled CHETEHOUNA<sup>1</sup>, Nicolas GASCOIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire PRISME, France*

\*Ludovic.lamoot@insa-cvl.fr

### **ABSTRACT**

In any thermal application involving a flame, it is essential that the flame is of the best possible quality to ensure optimal energy performance and minimize the carbon impact. This requires a combustion process taking place under optimal conditions. In this context, the phenomenon of cavitation can affect the mixing between fuel and oxidant, especially when it comes to developing compact systems with high energy efficiency. To study this effect, an experimental investigation was conducted using the NexGen burner, developed by the FAA (Federal Aviation Administration) and used for fire certification tests based on ISO 2685. The main objective of this study is to understand the impact of cavitation in a nozzle on the performance of a turbulent flame of kerosene/air premix. The study was conducted in two phases: The first was to develop an experimental device to highlight the appearance of the cavitation phenomenon as a function of the nozzle geometry, pressure and temperature in the tank. Piezoelectric pressure sensors and transparent nozzles made it possible to observe a greater intensity of the cavitation phenomenon with the smaller diameter nozzle (2.25 80 W). The second consisted in evaluating the impact of cavitation on flame performance. The results showed that cavitation has a direct influence on the flame temperature and heat flux density. In the presence of cavitation, the structure of the flame consisting of three distinct zones: continuous flame, intermittent flame and plume flame is modified in particular for low cavitation numbers where the disappearance of the continuous flame was observed. This observation makes it possible to demonstrate the harmful effects of cavitation on combustion in the NexGen burner. This study provides knowledge enabling a better understanding in order to improve the performance of combustion systems.

## **Impact de la cavitation d'une buse de brûleur NEXGEN sur les émissions gazeuses et la dynamique d'une flamme turbulente kérosène/air.**

**Ludovic LAMOOT<sup>1\*</sup>**, Brady MANESCAU<sup>1</sup>, Khaled CHETEHOUNA<sup>1</sup>, Nicolas GASCOIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire PRISME, France*

\*[Ludovic.lamoot@insa-cvl.fr](mailto:Ludovic.lamoot@insa-cvl.fr)

### **RESUME**

Dans toute application thermique impliquant une flamme, il est essentiel que celle-ci soit de la meilleure qualité possible pour garantir une performance énergétique optimale et minimiser l'impact carbone. Cela nécessite un processus de combustion se déroulant dans des conditions optimales. Dans ce cadre, le phénomène de cavitation peut affecter le mélange entre le carburant et le comburant, surtout lorsqu'il s'agit de développer des systèmes compacts avec une grande efficacité énergétique. Pour étudier cet effet, une investigation expérimentale a été menée en utilisant le brûleur NexGen, développé par la FAA (Federal Aviation Administration) et utilisé pour les tests de certification au feu basés sur la norme ISO 2685. L'objectif principal de cette étude est de comprendre l'impact de la cavitation dans une buse sur les performances d'une flamme turbulente de prémélange kérosène/air. L'étude s'est déroulée en deux phases : La première a été de mettre au point un dispositif expérimental permettant de mettre en évidence l'apparition du phénomène de cavitation en fonction de la géométrie de la buse, de la pression et de la température dans le réservoir. Des capteurs de pression piézoélectriques ainsi que des buses transparentes ont permis d'observer une plus grande intensité du phénomène de cavitation avec la buse de plus petit diamètre (2.25 80 W). La seconde a consisté à évaluer l'impact de la cavitation sur les performances de la flamme. Les résultats ont mis en évidence que la cavitation a une influence directe sur la température de flamme et la densité de flux thermique. En présence de cavitation, la structure de la flamme constituée de trois zones distinctes : flamme continue, flamme intermittente et flamme en panache est modifiée en particulier pour des nombres faibles de cavitation où il a été observé la disparition de la flamme continue. Cette observation permet de démontrer les effets néfastes de la cavitation sur la combustion dans le brûleur NexGen. Cette étude apporte des connaissances permettant une meilleure compréhension afin d'améliorer les performances des systèmes de combustion

### **INTRODUCTION**

Le carburant est introduit dans la chambre de combustion par l'utilisation d'injecteurs ou de buses. Ces dispositifs permettent au carburant, initialement sous forme liquide, d'être pulvérisé en fines gouttelettes afin d'optimiser la combustion. Par conséquent, l'efficacité de la combustion dépend en grande partie sur la qualité de pulvérisation de ces buses. En effet, une pulvérisation de mauvaise qualité engendre une diminution drastique des performances de combustion. Avant d'être transformé en fines gouttelettes, le carburant doit passer au travers un orifice que quelques centaines de micromètres. Cette constriction est responsable d'une accélération du carburant pouvant entraîner une chute de pression locale inférieure à la pression de vapeur saturante du carburant. Dans ce contexte, l'apparition de bulle de vapeur caractérisant le phénomène de cavitation peut alors survenir. En se déplaçant, ces bulles se retrouvent dans un milieu où la pression est supérieure à la pression de vapeur saturante. Il en résulte une implosion de ces bulles pouvant altérer la surface des injecteurs, affecter leurs performances, entraîner une diminution de la puissance de combustion et une augmentation des émissions polluantes. L'examen des surfaces d'une buse défectueuse par microscope électronique à balayage (MEB) réalisé par Asi, O en 2006 a mis en évidence l'impact néfaste de la cavitation en révélant des rugosités, des cratères microscopiques, des déformations plastiques localisées et des cavités dans les régions endommagées. Des fissures ont été initiées dans ces zones endommagées par la cavitation et se sont propagées sous forme de fissures de fatigue. L'érosion induite par cavitation a été démontrée par Moon, C.Y en 2022 en utilisant la tomographie et l'imagerie à rayons X pour mesurer la géométrie interne des orifices d'injecteurs et caractériser l'érosion induite par cavitation. Cette technique a permis de mettre en évidence la progression de l'érosion entre chaque injection produite sur les parois de l'orifice. Les résultats ont montré que le taux d'érosion ne dépend pas uniquement des propriétés du matériau, et il est probable que la géométrie de la buse soit le facteur déterminant pour la localisation de la cavitation et par conséquent de l'érosion induite.

Les travaux de He, Z en 2013 mettent en évidence l'influence du rayon de courbure à l'entrée de l'orifice. De plus, Sforzo, B en 2019 ont démontré l'importance du rôle de la géométrie de l'orifice sur le phénomène de cavitation en étudiant comment la géométrie asymétrique de la buse d'injection affecte l'apparition de la cavitation et le comportement de la pulvérisation de carburant dans des conditions telles que celles rencontrées dans un moteur. Pour étudier l'écoulement interne et proche de la buse, deux injecteurs diesel à un seul trou ont été utilisés. Le premier (Spray C) avait des contours d'entrée de trou nets et asymétriques, tandis que le second (Spray D) avait une courbure plus lisse et plus régulière. Compte tenu des différentes géométries, une cavitation a été observée à l'entrée de la buse de pulvérisation C mais pas dans la buse de pulvérisation D. D'autres travaux numériques utilisant KIVA3V par Taskiran, O en 2018 ont montré qu'une entrée arrondie permettait une cavitation de carburant moindre. De même, Yu, S en 2018 a montré que l'angle de pulvérisation des buses elliptiques augmentait plus que celle des buses circulaires. Ishak, M en 2019 a étudié numériquement l'influence de la conicité du trou en utilisant deux types d'injecteurs, l'un cylindrique et l'autre conique. De même, la longueur et le diamètre de l'orifice sont des paramètres à prendre en compte, notamment le rapport L/D. Selon Wo, H en 2013, l'augmentation du rayon d'entrée augmente le coefficient de décharge et réduit ainsi la fraction volumique de vapeur. De plus, l'augmentation du rapport L/D provoque le déplacement de la phase vapeur vers la partie centrale, ce qui est la condition la plus défavorable pour l'écoulement du carburant. L'étude menée par He, Z en 2015, sur l'influence du rapport L/D d'un trou d'injecteur sur l'écoulement de cavitation en utilisant du diesel et du biodiesel, a montré que le diesel est plus sensible à la cavitation que le biodiesel. De plus, les résultats ont montré qu'une augmentation du rapport L/D tend à réduire la cavitation à l'intérieur du trou de la buse. Il a été également observé une diminution du débit volumétrique lorsque la pression d'injection augmente causé par le phénomène de cavitation. L'impact de la configuration de l'injecteur sur la production de cavitation a été analysé par Mauger, C en 2014 en développant un dispositif utilisant de l'ombroscopie pour visualiser la cavitation à l'intérieur d'un microcanal transparent 2D simplifié. L'expérience a été menée en utilisant de l'huile d'essai à une pression inférieure à 6 MPa. Les résultats ont montré une augmentation des fluctuations de vitesse et de débit à la sortie du canal, accompagnée de la présence de vapeur oscillant entre 40 % et 50 % à l'intérieur du canal. Plusieurs autres facteurs, dont la pression dans l'orifice de la buse, la température du carburant, le type de carburant et d'autres conditions de fonctionnement, peuvent également avoir un impact sur ce phénomène. La variation brutale de pression dans l'orifice de la buse provoquée par la levée de l'aiguille d'un injecteur de moteur diesel peut générer de la cavitation comme le démontre l'étude expérimentale de Wei, Y en 2023. Les caractéristiques de pulvérisation pour différentes géométries de buses ont été étudiées par Zhang, X en 2018 pour différentes températures de carburant. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la température du carburant conduit pendant la phase d'écoulement biphasique à une augmentation rapide du degré de cavitation de la buse, suivie d'une diminution rapide du débit massique et du coefficient d'écoulement. D'autres recherches se sont intéressées à l'influence du type de carburant comme l'étude numérique sous KIVA-4 CFD de Mohan, B en 2015 en démontrant que les carburants à base d'éther cavitent plus que le diesel standard, tout en ayant une longueur de pénétration du jet plus faible en raison de leur viscosité plus faible par rapport au diesel standard. Kegl et Lešnik en 2018 ont choisi de comparer le biodiesel au diesel standard. Les résultats ont montré que le diesel avait un angle de cône plus grand et une longueur de pénétration plus courte car il a tendance à caviter plus que le biodiesel. Bang, S.H et Lee, C.S en 2010 ont étudié différents rapports de mélange d'éther diméthylque (DME) avec de l'ester méthylique dérivé du soja (biodiesel). Tous ces paramètres provoquant la cavitation ont une influence directe sur la qualité du spray. Par conséquent, les effets de la cavitation sur le comportement du spray diesel ont été particulièrement évalués. Le travail expérimental de Cao, T en 2020 a mis en évidence que le phénomène de spray creux était induit par une cavitation vortex forte et stable provenant de la surface conique de la soupape à aiguille avec une plaque plate bidimensionnelle. L'étude numérique de Sadegharani, H en 2013, basée sur le modèle de mélange turbulent multiphasé, a été appliquée pour considérer l'effet de la cavitation sur le spray de carburant diesel. Les résultats obtenus montrent que la cavitation à l'intérieur de la buse a un impact important sur l'injection de carburant et donc la qualité du spray, de même le rapport L/D est un paramètre à prendre en compte sur le comportement de la cavitation. Wang, X en 2017 ont montré que l'effet de la cavitation sur le spray diesel ne se limite pas à la rupture primaire, mais qu'il influence apparemment l'évolution globale du spray diesel. Dans ce contexte, l'étude sur la combustion homogène et pauvre de Sun Z en 2021 a mis en évidence une amélioration des performances. Pour obtenir un mélange air-carburant plus homogène pour une combustion pauvre, ce manuscrit a étudié l'application de l'atomisation par ébullition éclair dans un moteur monocylindre accessible optiquement fonctionnant dans des conditions de combustion pauvre. Il a été constaté que l'ébullition éclair améliorerait l'efficacité de combustion ainsi que les performances d'émission de PN si l'injection divisée était utilisée. Pour améliorer l'efficacité thermique des moteurs diesel, les travaux de Abdullah, M en 2019 ont utilisé une méthode appelée « delta inverse » (c'est-à-

dire, en réduisant progressivement le taux d'injection pendant la période d'injection), et les flammes de pulvérisation diesel rectangulaires conventionnelles ont été étudiées en utilisant simultanément l'imagerie à grande vitesse et le traçage de la pression du cylindre dans une combustion à volume constant. Les résultats ont montré que l'injection delta inverse a réussi à obtenir une distribution de pulvérisation plus uniforme et une dépression du mélange riche dans la pointe de pulvérisation par rapport à l'injection rectangulaire, mais son efficacité pour réduire la durée de combustion est limitée. Une étude bibliographique préliminaire menée au sein du laboratoire par Lamoot, L en 2021 a mis en évidence que peu d'études se sont intéressées à l'influence de la cavitation dans les injecteurs sur une flamme prémélangée kérosène/air. Cette étude expérimentale a été menée en deux étapes. La première étape a consisté à définir les caractéristiques en termes de pression, débit, température afin d'obtenir le phénomène de cavitation. La seconde à l'aide d'un brûleur NexGen étudié par Kao, Y en 2017 sur une étude expérimentale pour la réalisation de test normé selon la FAA (Federal Aviation Administration). Ce type de brûleur a permis de mettre en évidence l'interaction entre cavitation et combustion en utilisant les résultats obtenus à la première étape. Les résultats préliminaires de ce papier ont été publiés dans la revue internationale Experimental Thermal and Fluid Science par Lamoot, L en 2024.

### DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL : DETERMINATION DES CONDITIONS DE CAVITATION DANS UNE BUSE DE BRÛLEUR NEXGEN.

#### Caractéristiques des buses utilisées

Trois différentes buses de la marque DELAVAN sont utilisées sur ce type de brûleur, ayant chacune un diamètre d'orifice différent comme nous le montre le tableau 1. ci-dessous.

Pour mettre en évidence la cavitation dans une buse de brûleur Nexgen, il est nécessaire de connaître la pression à l'intérieur de celle-ci. C'est pourquoi des capteurs de pression doivent être installés afin de déterminer les paramètres permettant d'avoir une pression en dessous de la pression de vapeur saturante c'est à dire en présence de cavitation. Cependant, les buses commerciales ne permettent pas de réaliser ce type d'instrumentation. C'est pourquoi, il a été décidé de créer des buses en PMMA en prenant soin de respecter les dimensions interne de chaque buse. L'avantage de ces buses en Fig.1 réside sur le fait qu'elles sont transparentes et permettent ainsi une visualisation du phénomène par caméra rapide.

Tableau 1. Caractéristiques des buses utilisées

Case	Débit volumique (gallon/h)	Débit massique 8 bars (g/s)	Angle du spray (deg)	Type de buse	Diamètre de l'orifice (µm)
1	2.25	1.68	80 °	W	252
2	2.5	2.1	80 °	W	282
3	3.0	2.52	80 °	W	309

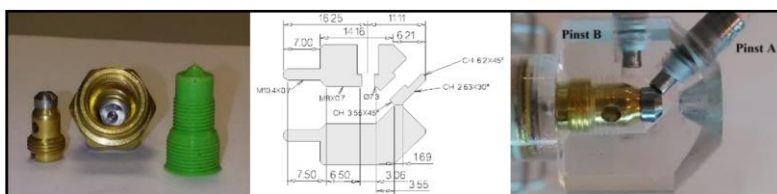


Fig. 1. Gauche : Vue de la géométrie interne de la buse avec le moule à sa droite, milieu : Plan mécanique de la buse en PMMA transparent, Droite : Buse en PMMA transparent avec capteurs de pression.

#### Pompe à carburant

L'alimentation en carburant s'effectue au moyen d'une pompe A1YA-7912B de chez Suntec pouvant délivrer 12 bars à 1725 tr/min (Fig. 2). Cette pompe peut fonctionner avec du biocarburant à hauteur de 25%. Cette pompe est couplée à un moteur triphasé dont la vitesse de rotation est pilotée par un variateur de fréquence C200 de Leroy somer.

Un dispositif fluide a été réalisé afin de définir les conditions d'apparition du phénomène de cavitation comme représenté par la Fig. 2. Le Jet A1 est stocké dans un réservoir en inox puis passe au travers une pompe à carburant entraînée par un moteur triphasé qui est piloté par un variateur de vitesse. Ensuite le carburant passe dans un débitmètre Coriolis permettant de connaître la quantité de carburant envoyée dans la buse. Une vanne de précision permet le réglage fin du débit souhaité. Finalement, le carburant passe au travers de la buse et se pulvérise dans un réservoir transparent en PMMA. Une ventilation dans la partie supérieure de la cuve permet d'évacuer le kérosène sous forme vapeur limitant ainsi, les risques d'inflammations. Une bouteille d'azote et une pompe à vide permet de varier la pression interne du réservoir inox de 20 litres entre 0.8 et 1.2 bar.

Afin de garantir le bon fonctionnement du dispositif, une vérification des débits massiques indiqués par le constructeur a été effectuée, validant ainsi la métrologie et le bon fonctionnement du dispositif expérimental.

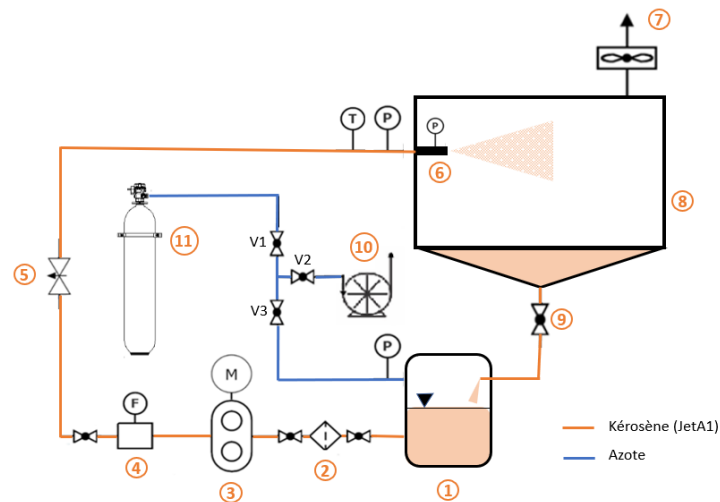


Fig. 2. Schéma du banc d'essai sur l'étude de la cavitation dans une buse DELAVAN d'un brûleur NexGen : (1) réservoir kérosène inox, (2) filtre, (3) pompe à carburant, (4) débitmètre Coriolis, (5) aiguille vanne, (6) buse, (7) extracteur d'air, (8) PMMA 1m<sup>3</sup>, réservoir, (9) vanne manuelle, (10) pompe à vide, (11) bouteille d'azote, (P) mesure de pression, (T) mesure de température, (F), mesure du débit

## DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL : BRÛLEUR NEXGEN

Le carburant utilisé est du Jet A1 stocké dans un jerrican de 20L (2) qui a été préalablement installé dans un congélateur (1) pendant une journée afin qu'il soit suffisamment refroidi entre 5 et 15°C (Fig. 3. ). Le Jet A1 est ensuite aspiré par une pompe à carburant Suntec (3) entraînée par un moteur triphasé dont la vitesse de rotation est contrôlée par un variateur C200 de chez Leroy Somer (4). Ensuite, le kérosène est envoyé au brûleur avec une pression maximale de 12 Bar (174 PSI). Le débit de kérosène dépendra du type d'injecteur utilisé et de la vitesse de rotation du moteur de la pompe. L'air est amené au brûleur par un compresseur à vis Boge C20L (9), l'air comprimé ainsi obtenu alimente un tube souple PET, PVC renforcé de diamètre 35 mm. Ce compresseur fournit un débit d'air maximum de 2,25 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> sous une pression de 8 Bars. La pression désirée est obtenue par un régulateur d'air qui peut être ajusté au moyen d'une vanne manuelle. Le tuyau d'air passe ensuite dans un serpentin (7), immergé dans du liquide de refroidissement dont la température est maintenue à moins de 5°C. Cela permet à l'air de sortir à une température maintenue entre 5 et 15°C correspondant à la norme de la FAA (Federal Aviation Administration).

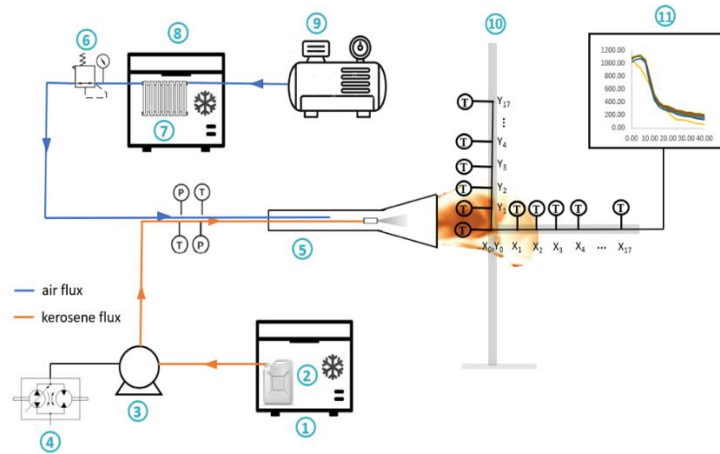


Fig. 3. Descriptif du dispositif du brûleur NexGen.

- (1) Refroidissement du kérosène, (2) Réservoir à kérosène, (3) Pompe à carburant, (4) Variateur, (5) Brûleur NexGen, (6) Régulateur d'air, (7) Échangeur à eau, (8) Congélateur à air, (9) Compresseur, (10) Arbre à thermocouples, (11) Système d'acquisition, (P) Mesure de pression, (T) Mesure de température.

## MÉTHODES DE MESURE UTILISÉES

### Détermination du nombre de cavitation critique

Dans notre étude, nous prendrons comme définition du nombre de cavitation, celle définie par Hiroyasu, A en 1991 prenant en compte la pression au point C dans la vena contracta<sup>1</sup> selon l'équation (Eq.1). En utilisant la relation de Bernoulli (Eq.2) on peut ainsi en déduire l'équation (Eq.3) utilisée dans la suite de cette étude.

$$\sigma = \frac{P_c - P_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_c^2} \quad (\text{Eq.1})$$

$$P_c + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_c^2 = P_{inj} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{inj}^2 \quad (\text{Eq.2})$$

$$\sigma = \frac{P_{mes} - P_v}{P_{inj} - P_{mes} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{inj}^2} \quad (\text{Eq.3})$$

$P_c$  : Pression vena contracta (Pa).

$P_{inj}$  : Pression d'injection (Pa).

$P_{mes}$  : Pression mesurée dans la buse (Pa).

$P_v$  : Pression de vapeur saturante du kérosène (670 Pa).

$V_c$  : Vitesse du kérosène au vena contracta (m.s<sup>-1</sup>).

$V_{inj}$  : Vitesse d'injection (m.s<sup>-1</sup>).

$\rho$  : Masse volumique du carburant (kg.m<sup>3</sup>).

$$\Psi = \frac{8 \cdot g \cdot H}{\omega^2 \cdot D^2} \quad (\text{Eq.4})$$

<sup>1</sup> Vena contracta : est le point d'un flux de fluide où le diamètre du flux est le plus petit et la vitesse du fluide est à son maximum, comme dans le cas d'un flux sortant d'une buse (orifice). (Evangéliste Torricelli, 1643). C'est un endroit où la section transversale est minimale

- $\omega$  : Vitesse angulaire (rad.s<sup>-1</sup>).
- $g$  : Accélération de la pesanteur (m.s<sup>-2</sup>).
- D : Diamètre de la pompe (m).
- H : hauteur manométrique (m).

Afin de déterminer la valeur du nombre de cavitation en dessous de laquelle le phénomène de cavitation apparaît, une courbe du coefficient d'énergie  $\Psi$  de la pompe à carburant comme défini selon l'équation Eq.4 en fonction du nombre de cavitation est tracée. La variation du nombre de cavitation est obtenue en faisant varier la vitesse de rotation de la pompe à carburant, une vanne de réglage situé en amont de la buse permet le réglage du débit désiré. Au niveau du point d'inflexion de la courbe correspond le nombre de cavitation critique en dessous duquel le phénomène de cavitation est présent comme nous le montre la fig. 4 ci-dessous.

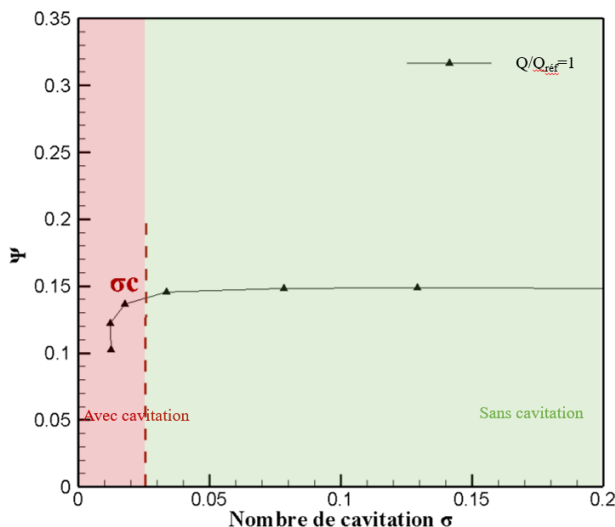


Fig. 4. Détermination du nombre de cavitation critique

**Mesure de l'angle du cône de pulvérisation.**

Pour permettre de mettre en relation la taille de l'image en taille réelle, un damier de 60\*80 cm a été utilisé possédant des carrés noirs et blancs de 1 cm de côté. Une vidéo d'une durée de quelques secondes a été réalisée à l'aide d'une caméra 4K FDR-AX43. Un programme sous Matlab permet d'établir la correspondance entre le nombre de pixels de l'image et la distance réelle en centimètres. Pour chaque essai réalisé, une vidéo de 30 secondes est traitée par un programme développé sous Matlab permettant d'obtenir les données comme montré par la fig. 5.

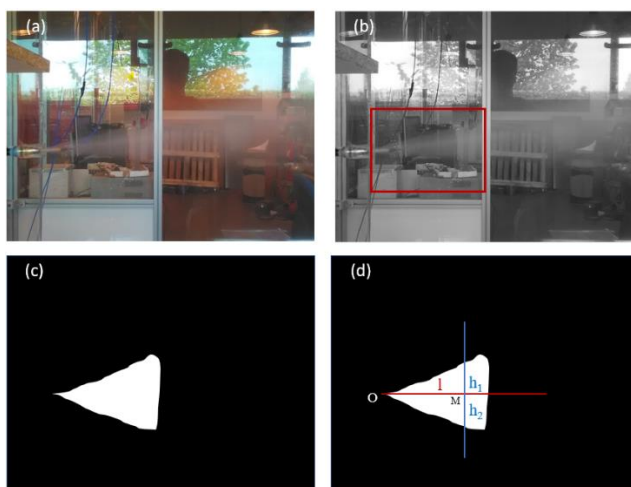


Fig. 5. Différentes étapes de traitement d'image (a) photo originale, (b) conversion en niveaux de gris et définition de la zone d'étude (c) binarisation de la zone d'étude, (d) mesure d'angle.

L'image est, dans un premier temps, convertie en niveaux de gris, puis la zone d'étude est déterminée. Le segment [OM] est défini par programmation. Le logiciel trace une droite verticale passant par M, puis calcule l'intersection de cette droite avec les premiers pixels noirs rencontrés en haut et en bas, afin de déterminer les hauteurs h1 et h2. Le calcul de l'angle est effectué à l'aide d'une formule géométrique élémentaire conformément à l'équation 5. Enfin, une moyenne est établie sur l'ensemble des valeurs obtenues.

$$\alpha = \arctan \frac{h_1 + h_2}{[OM]} \tag{Eq.5}$$

### Mesure de température

Le brûleur a un cône dont les dimensions sont de 16 cm de haut et 28 cm de large. Les points rouges correspondent aux positions de mesure de température comme indiqué sur la fig. 6. Des thermocouples de type K ont été placés dans le plan XY, tous les 2,5 cm, 17 selon l'axe horizontal X et 17 selon l'axe vertical Y, soit 35 thermocouples de type K en tenant compte le thermocouple qui correspond aux origines des axes X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, qui se situe à 10 cm du centre O du cône pour tenir compte de la norme définie par la FFA.

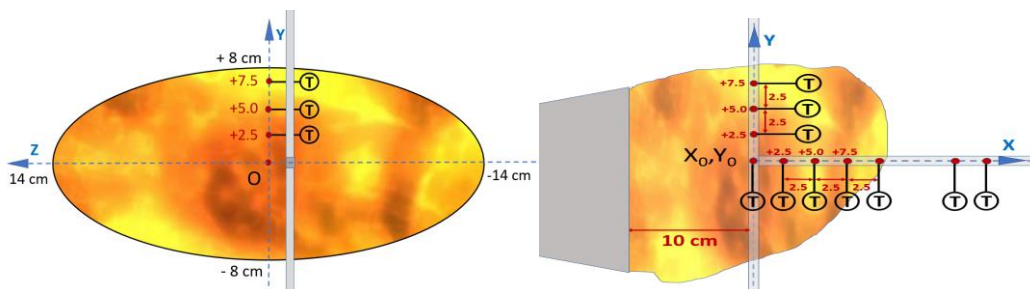


Fig. 6. Vue de l'arbre à thermocouple selon les axes Z,Y à gauche et X,Y à droite.

### Mesure du flux radiative

Les instruments de mesure du flux utilisés sont des fluxmètres de la marque Captec. Deux types de capteurs sont employés : des capteurs radiatifs et des capteurs mesurant le flux total. Ces capteurs ont été conçus sur mesure selon les exigences de notre cahier des charges. Étant donné que nous avons souhaité que ces capteurs soient placés à proximité de la flamme, ils nécessitent d'être refroidis. La Fig. 7. présente ces capteurs sans leur système de refroidissement. Ce dernier est composé d'un échangeur thermique accolé au capteur, à travers lequel circule de l'eau à une vitesse de 30 litres par heure, grâce à une pompe dédiée. L'ensemble des spécifications techniques est présenté dans le Tableau 2.

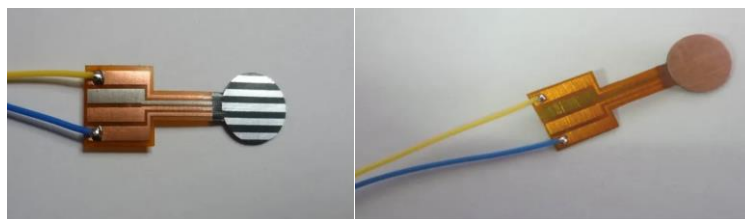


Fig. 7. Vue des capteurs de flux radiatif à gauche, total à droite  
 Tableau 2. Caractéristiques des capteurs de flux Captec

Caractéristiques	Description
Type	Radiatif et total
Plage de mesure (kW.m <sup>-2</sup> )	200
Sensibilité mV/(kW.m <sup>-2</sup> )	50
Tension de sortie max (V)	10
Débit refroidissement (l/h)	30
Dimension LxH (mm)	50x50



### Mesure de la géométrie de la flamme.

La mesure de la géométrie de la flamme est obtenue par une analyse d'image. Le but de cette analyse étant de pouvoir déterminer la longueur, la hauteur, la surface de la flamme mais également le front de flamme en fonction de la présence ou non de cavitation dans la buse. Ces tests sont effectués pour les trois buses en fonction du nombre de cavitation. Pour chaque test, un film est réalisé au moyen d'une caméra SONY 4K FDR-AX43. L'avantage de cette caméra est qu'elle est munie d'une carte de stockage SD de 1Go permettant le stockage d'environ 1h30 de vidéo qui est amplement suffisant pour nos tests. Les fichiers vidéo sont stockés en format MPEG4 qui est un format vidéo facilement utilisable par un PC moderne. Les images sont ensuite traitées par informatique dont la méthode est exposée comme le montre la fig. 8.

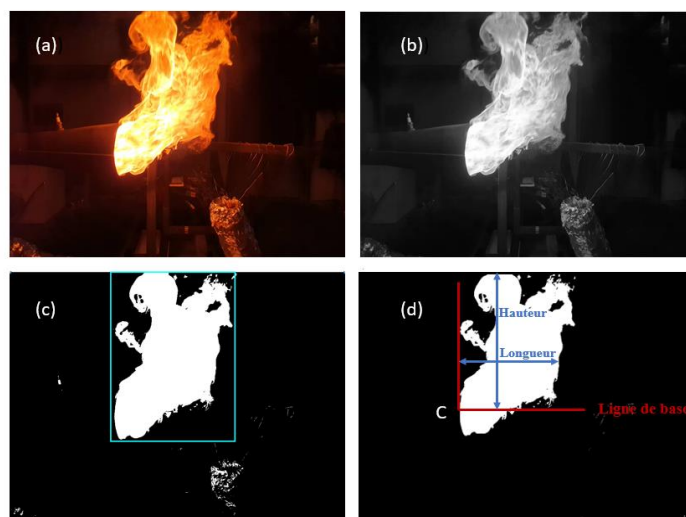


Fig. 8. Différentes étapes du traitement de l'image (a) Image originale ; (b) Image en niveau de gris; (c) Image binarisée avec détermination de la zone d'étude; (d) Création d'une ligne de base et calcul de longueur max et hauteur max.

### Mesure des émissions gazeuses

Cet analyseur de gaz ECOM J2KN parfaitement autonome possède une batterie lui permettant de ne pas avoir besoin du raccordement au secteur. De plus, il possède un clavier mobile permettant de le contrôler à distance. Ce type d'appareil est tout à fait adaptable car il possède l'ensemble des capteurs nécessaires à la mesure de gaz de combustion comme l'oxygène ( $O_2$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), les différents types d'oxyde d'azote : le monoxyde et le dioxyde d'azote ( $NO$ ,  $NO_2$ ) regroupé sous l'appellation  $NO_x$ , Le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ), ainsi que les imbrulés nommé  $C_xH_y$ . La sonde d'analyse est placée à la verticale de la flamme dans la hotte d'extraction dans le but de récupérer les gaz à analyser.

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

Au sein du laboratoire, il a été démontré que le débit de kérosène obtenu pour un fonctionnement optimale du brûleur NexGen est de  $2 \text{ g.s}^{-1}$ . Les mesures ont été réalisées pour des valeurs de débit variant de 20% autour de cette valeur de référence  $Q_{\text{réf}}$ .

#### Résultats du nombre de cavitation critique pour chaque buse

Le tableau 3 ci-dessous montre le nombre critique de cavitation déterminé pour chaque buse en fonction des différents débits de carburant. La Figure 9 illustre l'évolution du coefficient d'énergie  $\Psi$  de la pompe à carburant pour chaque buse, en fonction du nombre de cavitation et des débits étudiés. Il est observé une diminution du coefficient d'énergie  $\Psi$  lorsque le débit augmente. De plus, pour chaque buse, le nombre critique de cavitation augmente avec le débit de carburant. Cela permet de conclure, de manière générale, que l'augmentation du débit de carburant augmente le niveau de cavitation. La Figure 9 d) révèle que la buse 2.25 80W, dotée du diamètre d'orifice le plus petit (voir Tableau 1), présente le nombre critique de cavitation le plus élevé pour chaque débit testé. Ainsi, il est possible d'affirmer que le phénomène de cavitation est plus présent dans la buse ayant le plus petit diamètre d'orifice. Le Tableau 3 contient l'ensemble des valeurs du nombre critique de cavitation obtenues en fonction du débit de carburant pour chaque buse.

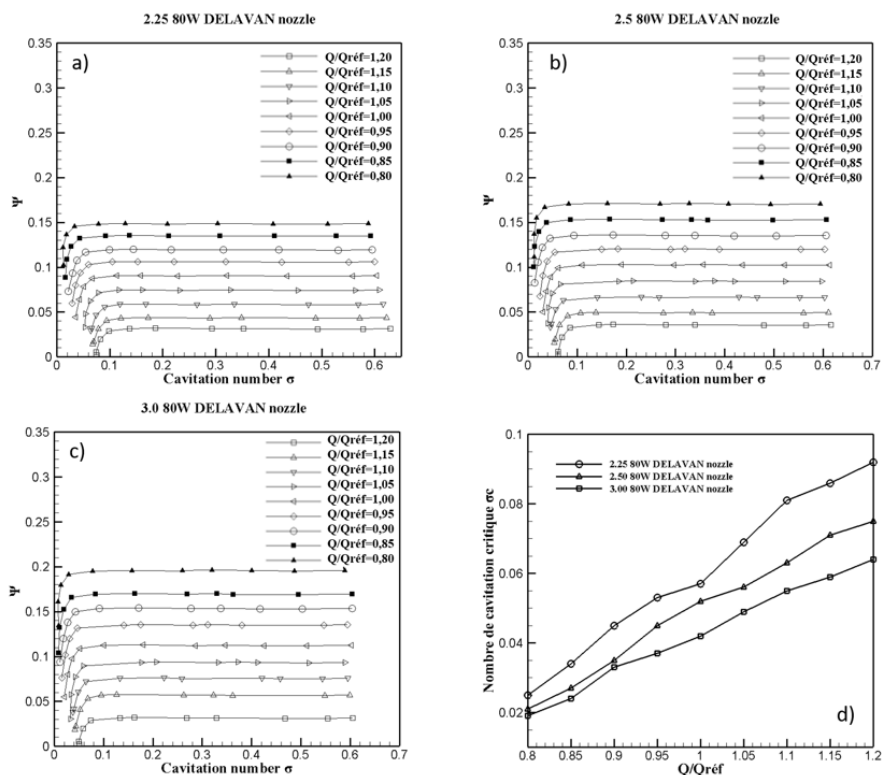


Fig. 9. Évolution du coefficient d'énergie  $\Psi$  en fonction du nombre de cavitation  $\sigma$  pour différents coefficients de débit  $\Phi$  (a) (b), (c), et le nombre de cavitation critique  $\sigma_c$  en fonction du coefficient de débit  $\Phi$  pour les trois buses (d).

Tableau 3. Détermination du nombre de cavitation critique  $\sigma_c$  pour différentes buses.

		2.25 80W	2.50 80W	3.0 80W
Flow rate (g/s)	$Q/Q_{ref}$	$\sigma_c$	$\sigma_c$	$\sigma_c$
2.4	1.2	0.092	0.075	0.064
2.3	1.15	0.086	0.071	0.059
2.2	1.1	0.081	0.063	0.055
2.1	1.05	0.069	0.056	0.049
2	1	0.057	0.052	0.042
1.9	0.95	0.053	0.045	0.037
1.8	0.9	0.045	0.035	0.033
1.7	0.85	0.034	0.027	0.024
1.6	0.8	0.025	0.021	0.019

### Effet du phénomène de cavitation sur l'angle de pulvérisation.

Afin de mettre en évidence les effets de la cavitation sur l'angle de pulvérisation, les mesures ont été réalisées avec le débit  $Q/Q_{ref}=1,2$ , soit 2,4 g.s<sup>-1</sup>. Les résultats ont été obtenus en utilisant la méthode de traitement d'image décrite ci-dessus. Les résultats ont été compilés dans le tableau 4 où l'on peut voir que lorsque le nombre de cavitation est supérieur (représenté en vert) au nombre de cavitation critique (représenté en orange), l'angle de pulvérisation ne change pratiquement pas. Par contre, dès que le nombre de cavitation est inférieur au nombre de cavitation critique, alors l'angle de pulvérisation chute (représenté en rouge). Ce phénomène est plus marqué pour la buse 2.25 80W que pour les buses 2.50 80W et 3.00 80W. Ainsi, la cavitation dans les buses a un effet néfaste sur la qualité d'atomisation du carburant. Cette chute de l'angle de

pulvérisation provoquée par la cavitation dans la buse peut être la cause d'une mauvaise combustion dans le brûleur.

Tableau 4. Valeur de l'angle de pulvérisation pour chaque buse pour différentes valeurs du nombre de cavitation

<b>2.25 80W</b>	<b>Nombre cavitation</b>	0.072	0.074	0.080	0.092	0.098	0.157	0.186	0.293	0.353	0.492	0.578	0.629
	<b>Angle spray</b>	65	68	70	75	77	78	78	77	78	78	79	78
<b>2.50 80W</b>	<b>Nombre cavitation</b>	0.061	0.063	0.069	0.075	0.085	0.144	0.173	0.281	0.343	0.479	0.565	0.616
	<b>Angle spray</b>	68	70	73	75	77	77	78	78	78	79	78	79
<b>3.00 80W</b>	<b>Nombre cavitation</b>	0.050	0.053	0.058	0.064	0.074	0.133	0.162	0.269	0.329	0.468	0.554	0.605
	<b>Angle spray</b>	73	75	76	76	78	78	79	78	79	79	79	78

### Résultats sur le flux radiatif

Dans cette section, le brûleur Nexgen sera employé. Comme illustré dans la partie dédiée à l'analyse fluïdique, la buse au plus petit diamètre d'orifice tend à favoriser la cavitation. Par conséquent, ce type de buse sera utilisé pour la suite de cette étude. Étant donné que le dispositif fluïdique est identique à celui du brûleur en termes de pompe à carburant et de longueur des tuyaux, il est possible de vérifier la présence de cavitation dans la buse en reproduisant les conditions décrites dans la section fluïdique. Il ressort de la Figure 10 que, en présence de cavitation, la densité de flux thermique diminue proportionnellement à l'intensité de la cavitation. Cela démontre que la cavitation influence l'intensité du flux thermique de la flamme.

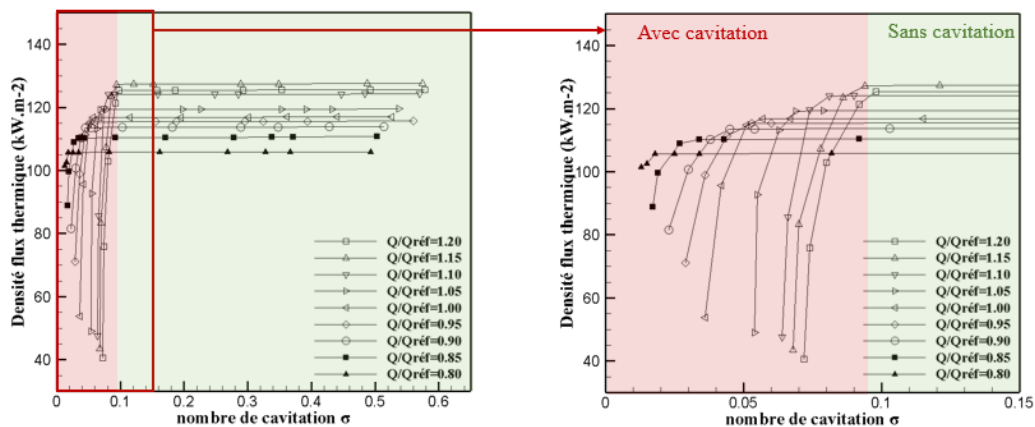


Fig. 10. Densité du flux thermique en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

### Résultats sur la géométrie de la flamme

Dans cette étude l'objectif est de mettre en relation l'influence de la cavitation sur la géométrie de la flamme. Pour ce faire, un traitement d'images a été mené selon la méthode décrite plus haut permettant d'obtenir la longueur, la hauteur et la surface de la flamme. Ces mesures ont été réalisées en utilisant la buse ayant le plus petit diamètre d'orifice. Les figures 11 à 13 illustrent la longueur, la hauteur et la surface de la flamme pour différents débits de combustible, respectivement. Les résultats révèlent qu'une augmentation du débit a un impact significatif sur la géométrie de la flamme. En présence de cavitation, la longueur, la hauteur et la surface de la flamme diminuent. Ce phénomène est particulièrement prononcé pour les débits de combustible les plus élevés, où l'effet de cavitation est le plus intense. Il est évident que la cavitation influence la géométrie de la flamme en réduisant ses caractéristiques.

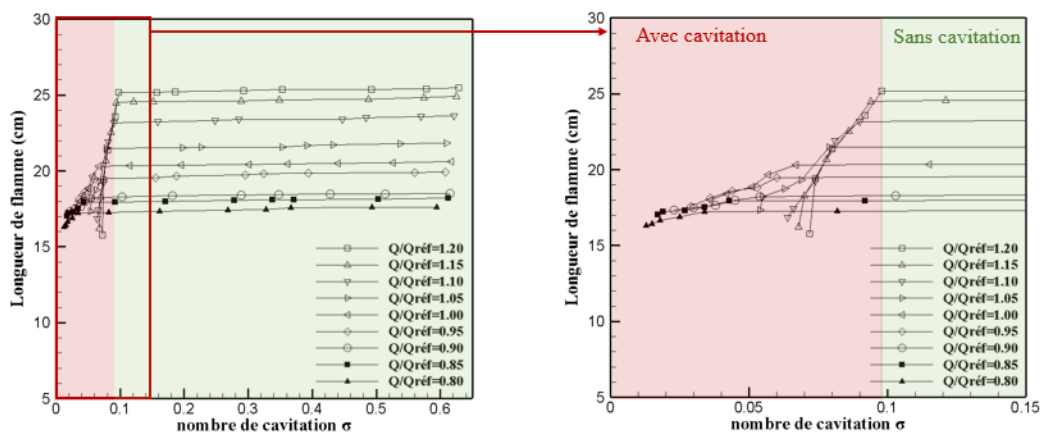


Fig. 11. Longueur de flamme en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

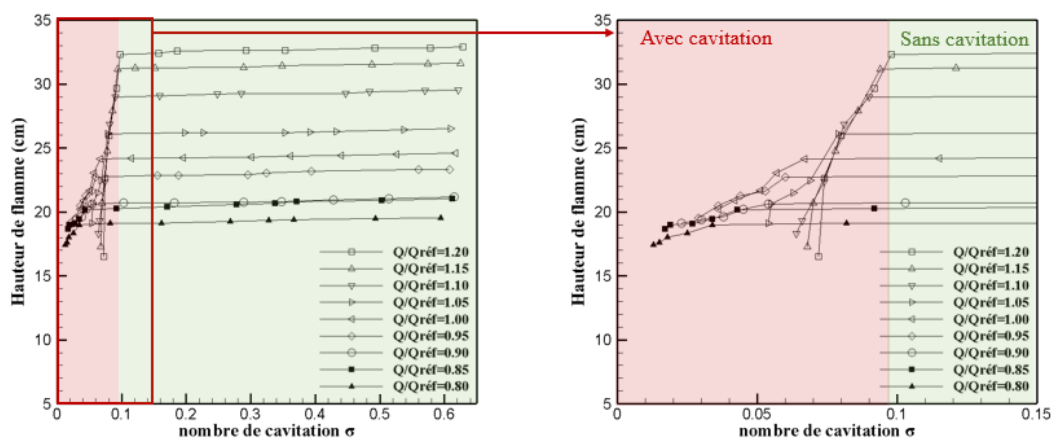


Fig. 12. Hauteur de flamme en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

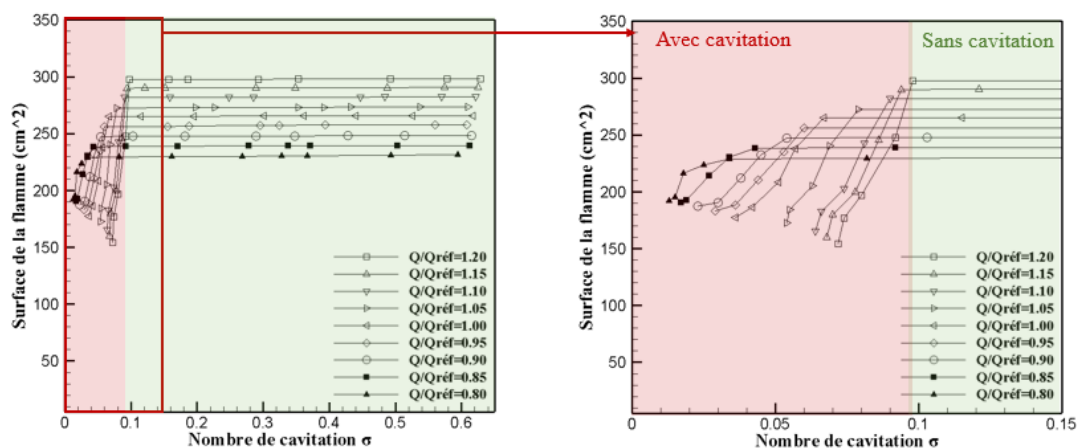


Fig. 13. Surface de la flamme en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

### Résultats sur les émissions gazeuses

La qualité de la combustion est étroitement corrélée aux gaz émis. En effet, une combustion idéale ne devrait produire que du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ). L'objectif de cette étude est de mettre en lumière les effets du phénomène de cavitation sur la qualité de la combustion. À cet effet, une mesure a été effectuée avec la buse présentant le risque le plus élevé de cavitation, à savoir celle dotée du plus petit diamètre d'orifice (2.25 80W). Ces mesures ont été réalisées pour chaque valeur du nombre de cavitation à différents débits de carburant. Les résultats de ces mesures ne reflètent pas les quantités réelles de gaz émis par la flamme, car la hotte aspirante, dans laquelle se trouve la sonde de l'analyseur de gaz, ne peut pas

différencier les gaz émis par la flamme de l'air ambiant. En conséquence, il y a une dilution des gaz émis par la flamme avec l'air environnant. Néanmoins, ces mesures permettent de dégager une tendance quant à la variation des quantités de gaz. Les figures 14 à 18 illustrent le fait qu'en présence de cavitation, le taux d'oxygène augmente dans les gaz émis résultant d'une baisse de la consommation d'oxygène. De plus, le taux de dioxyde de carbone diminue ce qui indique une diminution de la combustion. La diminution des concentrations de NOx observée en présence de cavitation dans la buse est liée à une réduction de la température des flammes, également constatée en présence de cavitation (Fig. 19). Enfin, l'augmentation des gaz imbrûlés témoigne sans conteste d'une combustion incomplète. L'ensemble de ces résultats mettent en évidence que la cavitation dans une buse de brûleur exerce une influence significative sur la qualité de la combustion.

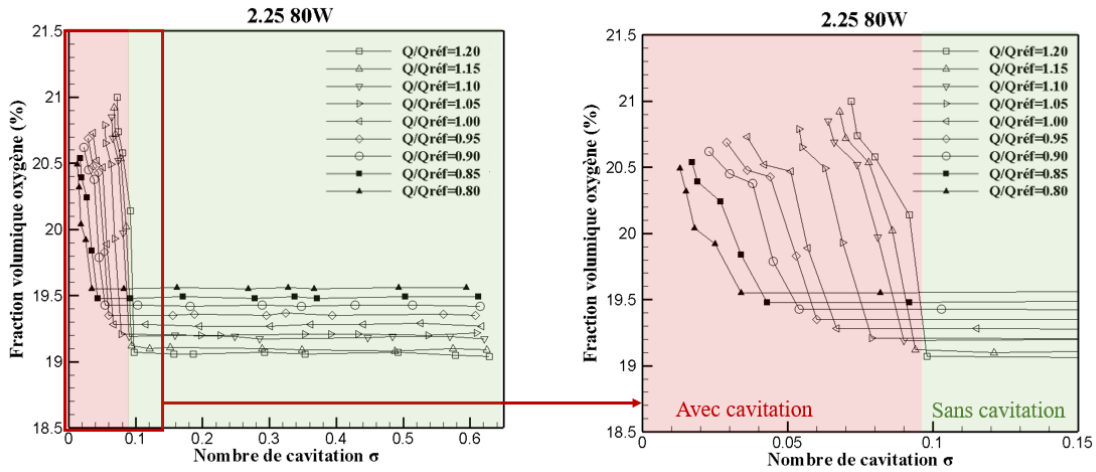


Fig. 14. Fraction volumique d'oxygène en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

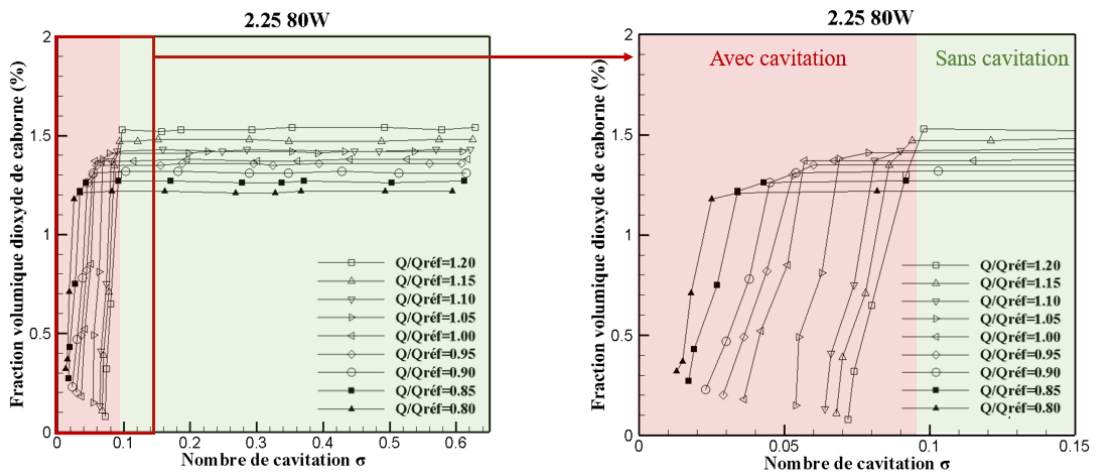


Fig. 15. Fraction volumique de dioxyde de carbone en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

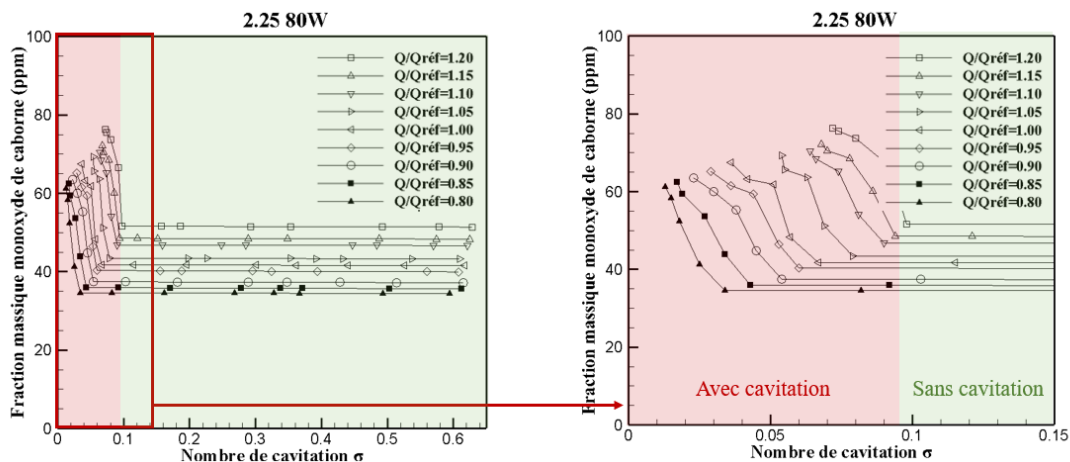


Fig. 16. Fraction massique de monoxyde de carbone en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

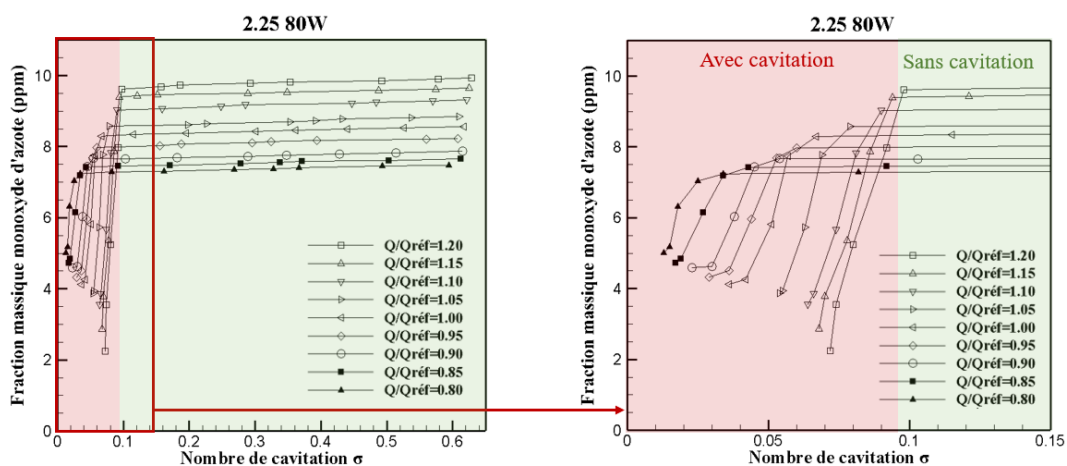


Fig. 17. Fraction massique de monoxyde d'azote en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

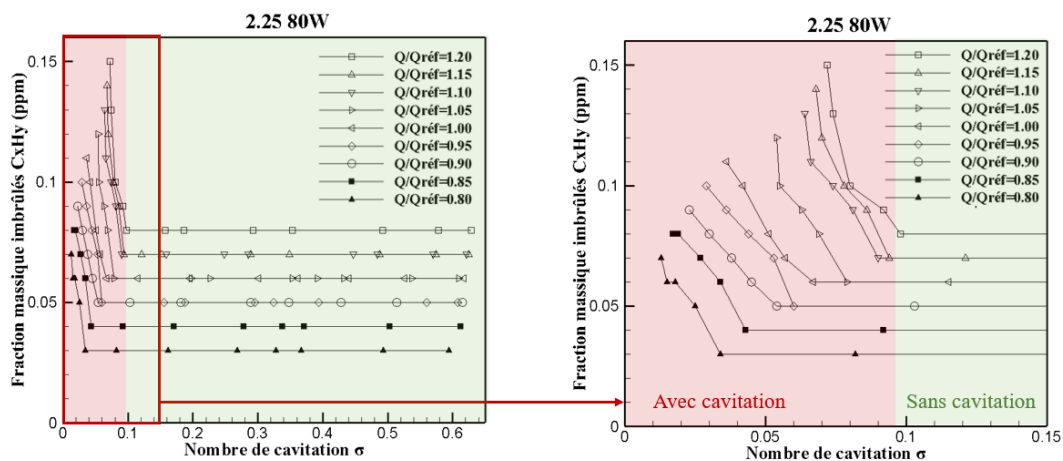


Fig. 18. Fraction massique d'imbrûlés  $C_xH_y$  en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

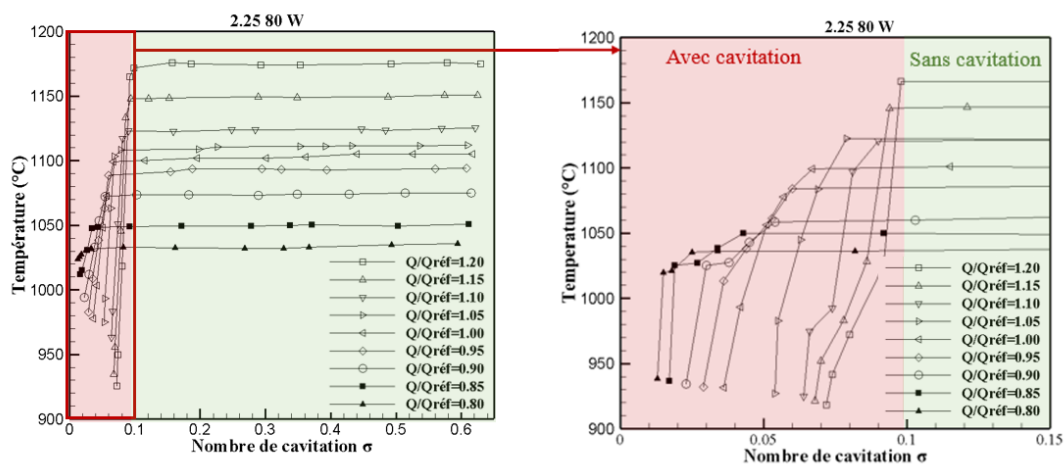


Fig. 19. Température de flamme au point origine O en fonction du nombre de cavitation pour la buse 2.25 80W.

## CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence le niveau de la cavitation pour trois buses ayant des orifices de tailles différentes. Les effets de la cavitation sur les performances des buses de brûleur et la qualité de la combustion, ont été analysés. Les résultats obtenus montrent que l’augmentation du débit de carburant a un effet notable sur le niveau de cavitation en augmentant la valeur du nombre critique de cavitation. La buse ayant le plus petit diamètre d’orifice (2.25 80W) se caractérise par un nombre critique de cavitation plus élevé pour chaque débit testé, soulignant que les buses à orifice plus réduit sont plus susceptibles de développer des problèmes de cavitation. Les mesures réalisées sur la géométrie de la flamme montrent une diminution de la longueur, la hauteur et la surface de la flamme en présence de cavitation. De plus, il a été montré que la densité du flux thermique diminuait en présence de cavitation. En ce qui concerne la qualité de la combustion, les mesures réalisées des gaz émis mettent en évidence que la cavitation a un effet important sur la consommation d’oxygène, la diminution du dioxyde de carbone, la réduction des NOx due à la chute de la température de la flamme, l’augmentation des imbrulés attestant d’une combustion incomplète. Tous ces résultats montrent clairement que la cavitation a un effet néfaste sur la qualité de la combustion. Il serait intéressant de prendre en compte ces résultats afin d’optimiser la conception des buses et d’améliorer la performance des brûleurs.

## MOTS-CLES DU THEME

*Performance, combustion, cavitation.*

## MOTS-CLES LIBRES

*Brûleur NexGen, buse, cavitation critique, flamme de combustion.*

## RÉFÉRENCES

- Abdullah, Mohd Fareez Edzuan Bin, Shinobu Akiyama, Tomoki Kinoshita, Taizo Shimada, and Tetsuya Aizawa. 2019. “Investigation of Inversed-Delta Injection Rate Shaping Diesel Spray Flame Structure and Combustion Characteristics towards Thermal Efficiency Improvement.” *Applied Thermal Engineering* 160(June): 113986. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.113986.
- Asi, Osman. 2006. “Failure of a Diesel Engine Injector Nozzle by Cavitation Damage.” *Engineering Failure Analysis* 13(7): 1126–33. doi:10.1016/j.engfailanal.2005.07.021.
- Bang, Seung Hwan, and Chang Sik Lee. 2010. “Fuel Injection Characteristics and Spray Behavior of DME Blended with Methyl Ester Derived from Soybean Oil.” *Fuel* 89(3): 797–800. doi:10.1016/j.fuel.2009.10.009.
- Cao, Tianyi, Zhixia He, Han Zhou, Wei Guan, Liang Zhang, and Qian Wang. 2020. “Experimental Study on the Effect of Vortex Cavitation in Scaled-up Diesel Injector Nozzles and Spray Characteristics.” *Experimental Thermal and Fluid Science* 113(December 2019): 110016. doi:10.1016/j.expthermflusci.2019.110016.

- He, Zhixia, Zhuang Shao, Qian Wang, Wenjun Zhong, and Xicheng Tao. 2015. "Experimental Study of Cavitating Flow inside Vertical Multi-Hole Nozzles with Different Length-Diameter Ratios Using Diesel and Biodiesel." *Experimental Thermal and Fluid Science* 60: 252–62. doi:10.1016/j.expthermflusci.2014.09.015.
- He, Zhixia, Wenjun Zhong, Qian Wang, Zhaochen Jiang, and Zhuang Shao. 2013. "International Journal of Thermal Sciences Effect of Nozzle Geometrical and Dynamic Factors on Cavitating and Turbulent Flow in a Diesel Multi-Hole Injector Nozzle." *International Journal of Thermal Sciences* 70: 132–43. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2013.03.008.
- Hiroyasu, H., M. Arai, and M. Shimizu. 1991. "Break-up Length of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle." *NIST Special Publication* (813): 275–82.
- Ishak, M. H.H., Farzad Ismail, Sharzali Che Mat, M. S. Abdul Aziz, M. Z. Abdullah, and Aizat Abas. 2019. "Numerical Study on the Influence of Nozzle Spray Shape on Spray Characteristics Using Diesel and Biofuel Blends." *Biofuels* 0(0): 1–13. doi:10.1080/17597269.2019.1583717.
- Kao, Yi Huan, Samir B. Tambe, Robert Ochs, Steve Summer, and San Mou Jeng. 2017. "Experimental Study of the Burner for FAA Fire Test: NexGen Burner." *Fire and Materials* 41(7): 898–907. doi:10.1002/fam.2429.
- Kegl, Breda, and Luka Lešnik. 2018. "Modeling of Macroscopic Mineral Diesel and Biodiesel Spray Characteristics." *Fuel* 222(February): 810–20. doi:10.1016/j.fuel.2018.02.169.
- Lamoot, L., B. Manescau, K. Chetehouna, and E. Obame. 2024. "Experimental Study on the Cavitation Phenomenon Effect on the Efficiency of a Turbulent Premixed Flame Kerosene/Air." *Experimental Thermal and Fluid Science* 154(May 2023): 111170. doi:10.1016/j.expthermflusci.2024.111170.
- Lamoot, Ludovic, Brady Manescau, Khaled Chetehouna, and Nicolas Gascoin. 2021. "Review on the Effect of the Phenomenon of Cavitation in Combustion Efficiency and the Role of Biofuels as a Solution against Cavitation." *Energies* 14(21): 0–35. doi:10.3390/en14217265.
- Mauger, C., L. Méès, M. Michard, and M. Lance. 2014. "Velocity Measurements Based on Shadowgraph-like Image Correlations in a Cavitating Micro-Channel Flow." *International Journal of Multiphase Flow* 58: 301–12. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.10.004.
- Mohan, Balaji, Wenming Yang, Wenbin Yu, Kun Lin Tay, and Siaw Kiang Chou. 2015. "Numerical Simulation on Spray Characteristics of Ether Fuels." *Energy Procedia* 75: 919–24. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.243.
- Moon, Chi Young, Gina M. Magnotti, Brandon A. Sforzo, Aniket Tekawade, Alan L. Kastengren, and Christopher F. Powell. 2022. "Experimental Investigation of Cavitation-Induced Erosion Using X-Ray Imaging and Tomography." *Frontiers in Mechanical Engineering* 8(May): 1–10. doi:10.3389/fmech.2022.869165.
- Sadegharani, H., M. Haghshenasfard, and J. Salimi. 2013. "Numerical Study on the Effect of Cavitation on Flow and Diesel Fuel Atomization Characteristics." *Chemical Engineering and Technology* 36(3): 474–82. doi:10.1002/ceat.201200454.
- Sforzo, Brandon A, Katarzyna E Matusik, Christopher F Powell, Alan L Kastengren, Shane Daly, Emre Cenker, Lyle M Pickett, Cyril Crua, and Julien Manin. 2019. "Fuel Nozzle Geometry Effects on Cavitation and Spray Behavior at Diesel Engine Conditions." *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018)*: 474–80. doi:10.1115/1.861851\_ch90.
- Sun, Zhe, Mingli Cui, Chang Ye, Shangze Yang, Xuesong Li, David Hung, and Min Xu. 2021. "Split Injection Flash Boiling Spray for High Efficiency and Low Emissions in a GDI Engine under Lean Combustion." 38: 5769–79. doi:10.1016/j.proci.2020.05.037.
- Taskiran, Ozgur Oguz. 2018. "Investigation of the Effect of Nozzle Inlet Rounding on Diesel Spray Formation and Combustion." *Fuel* 217(August 2017): 193–201. doi:10.1016/j.fuel.2017.12.031.
- Wang, Xiang, Zhiqiang Han, and Wanhua Su. 2017. "Numerical Study of the Impact on High-Pressure and Evaporating Spray Behavior of Nozzle Cavitation at Typical Diesel Engine Conditions." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 81: 175–82. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.12.020.
- Wei, Yunpeng, Hanwen Zhang, Liyun Fan, Bo Li, Xianyin Leng, and Zhixia He. 2023. "Experimental Study on Influence of Pressure Fluctuation and Cavitation Characteristics of Nozzle Internal Flow on near Field Spray." *Fuel* 337(November 2022). doi:10.1016/j.fuel.2022.126843.
- Wo, Hengzhou, Xianguo Hu, Hu Wang, and Yufu Xu. 2013. "Cavitation of Biofuel Applied in the Injection Nozzles of Diesel Engines." *Wear of Advanced Materials*: 119–61. doi:10.1002/9781118562093.ch4.
- Yu, Shenghao, Bifeng Yin, Weixin Deng, Hekun Jia, Ze Ye, Bin Xu, and Huaping Xu. 2018. "Experimental Study on the Spray Characteristics Discharging from Elliptical Diesel Nozzle at Typical Diesel Engine Conditions." *Fuel* 221(February): 28–34. doi:10.1016/j.fuel.2018.02.090.



Zhang, Xin, Zhixia He, Qian Wang, Xicheng Tao, Zhen Zhou, Xinglan Xia, and Wenquan Zhang. 2018. "Effect of Fuel Temperature on Cavitation Flow inside Vertical Multi-Hole Nozzles and Spray Characteristics with Different Nozzle Geometries." *Experimental Thermal and Fluid Science* 91: 374–87.  
doi:10.1016/j.expthermflusci.2017.06.006.