

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,  
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

# Étude expérimentale de la reproductibilité spatiale du dépôt d'énergie par claquage laser sous atmosphère contrôlée d'argon par l'effet de focalisation

S. Rudz, M. Wartel, S. Pellerin, J.L. Hanus



**ISSN : 2428-8500**

**DOI : 10.18145/jitipee.v5i2.240**

*Le sujet de cet article a été présenté lors du colloque sur les arcs électriques (CAE XIV) les 19 et 20 mars 2019 à Bourges.*

*L'article publié a fait l'objet d'une expertise indépendante par deux spécialistes du domaine.*

## Étude expérimentale de la reproductibilité spatiale du dépôt d'énergie par claquage laser sous atmosphère contrôlée d'argon par l'effet de focalisation

Steve Rudz <sup>(1)</sup>, Maxime Wartel <sup>(1)</sup>, Stéphane Pellerin <sup>(1)</sup>, Jean-Luc Hanus <sup>(2)</sup>

(1) GREMI, UMR 7344, Université d'Orléans/CNRS, F-18020, Bourges Cedex, France

(2) LaMé, EA 7494, INSA CVL / Univ. Orléans / Univ. Tours, F-18020, Bourges Cedex, France

[steve.rudz@univ-orleans.fr](mailto:steve.rudz@univ-orleans.fr)

**Résumé** – Le dépôt d'énergie par claquage laser, notamment dans les gaz, est une technique utilisée en spectroscopie optique d'émission afin d'identifier certaines caractéristiques des milieux étudiés (espèces, température, densité électronique ...), et également pour l'initiation de déflagration/détonation. La collection de la lumière émise par le plasma est une condition nécessaire pour appliquer la spectroscopie optique d'émission, ce qui impose la connaissance préalable de la position spatiale du claquage laser afin d'assurer une bonne reproductibilité des essais. Malheureusement, la position spatiale du claquage laser peut légèrement se déplacer entre le point focal et la source laser le long de l'axe laser. Ce phénomène est connu mais à notre connaissance n'a jamais fait l'objet d'études spécifiques.

Le travail présenté dans cet article a pour objet l'étude de la répartition spatiale du plasma consécutif à l'apport d'énergie par une source laser (longueur d'onde de 532 nm et énergie fixée) dans une enceinte sous atmosphère contrôlée en argon pour deux conditions de focalisation différentes.

**Mots clés** : claquage laser, Nd:YAG, focalisation, reproductibilité, argon.

**DOI** : [10.18145/10.18145/jitipee.v5i2.240](http://dx.doi.org/10.18145/10.18145/jitipee.v5i2.240)

### Introduction

L'idée de focaliser la lumière émise par un faisceau laser nanoseconde afin de produire en un point de l'espace un « claquage laser » fut appliquée avec succès dès 1964 [1, 2]. Ces premiers succès ont ouvert la voie à de nombreuses recherches afin de comprendre les mécanismes mis en jeu dans ce phénomène de claquage, tant et si bien que dès la fin des années 60 des bibliographies étaient déjà publiées [3]. Le mécanisme du claquage laser y est détaillé : la première étape, l'ionisation multi-photonique, se produit lorsque les photons émis par le laser sont absorbés par des électrons libres qui, s'ils acquièrent une énergie supérieure à celle requise pour l'ionisation des espèces présentes dans le milieu, vont conduire à la deuxième étape, celle

de l'avalanche électronique qui s'observe à l'œil nu par la visualisation d'une étincelle très lumineuse appelée « claquage laser ». Le plasma ainsi créé a une température de l'ordre de  $10^5 - 10^6$  K mais se refroidit très rapidement en même temps que son volume s'accroît et qu'une onde de choc s'en détache au bout de quelques dizaines/centaines de nanosecondes après la fin de l'impulsion laser. Parmi les domaines d'applications possibles de ce phénomène, il y en a deux qui ont fait l'objet de nombreuses études : l'application à l'allumage de mélanges réactifs en phase gazeuse dans le domaine de la propulsion [4] ainsi que la caractérisation de matériaux par spectroscopie optique d'émission (SOE) [5]. La SOE avec un laser est utilisée depuis les années 60 et depuis 1981 cette technique se nomme par l'acronyme « LIBS » de l'anglais Laser-Induced Breakdown Spectroscopy [6]. La LIBS s'utilise aussi bien pour la caractérisation de matériaux sous phase solide [7] qu'en phase gazeuse [8].

Sous phase gazeuse, que ce soit pour des applications d'allumage ou de LIBS, la reproductibilité du dépôt d'énergie par claquage laser est essentielle. Cependant cette reproductibilité dépend très fortement des conditions de focalisation du faisceau laser. Il a été montré expérimentalement qu'une focalisation suffisamment « forte » permet non seulement une bonne reproductibilité du dépôt d'énergie, mais également d'obtenir une énergie seuil du laser en dessous de laquelle aucun claquage n'est observé et au-dessus duquel le claquage est systématiquement observé [9]. A contrario une focalisation « faible » ne permet pas un dépôt d'énergie reproductible et il existe deux seuils d'énergie : en dessous du premier aucun claquage n'apparaît, au-dessus du second le claquage est systématique. Mais entre les deux une plage de probabilité d'apparition du claquage doit être définie, généralement associée à une distribution de probabilité continue du type logistique ou log-logistique [10]. Pour la SOE il faut en plus de la reproductibilité du dépôt d'énergie s'assurer de la bonne collection du signal lumineux émis par le claquage laser et en conséquence avoir un dépôt d'énergie spatialement reproductible. Ce travail porte sur la reproductibilité spatiale du claquage laser par imagerie rapide à travers l'effet de focalisation pour deux configurations optiques différentes dans une atmosphère contrôlée d'argon, pour une énergie laser donnée, et une longueur d'onde du laser de 532 nm.

## 1. Méthodologie expérimentale

### 1.1. Banc d'essai

Le banc d'essai est présenté en figure 1. La source laser (1) utilisée est un Quantel Nd:YAG dont les caractéristiques principales sont les suivantes : faisceau gaussien, facteur de qualité  $M^2 = 1.5$ , durée normalisée du pulse  $\tau_{FWHM} = 6$  ns, diamètre du faisceau  $D = 9$  mm et longueur d'onde  $\lambda = 532$  nm. Le réacteur (5) est de forme sphérique et possède les fenêtres optiques nécessaires afin d'assurer le passage du faisceau laser, et, perpendiculairement à ce premier axe, de collecter la lumière émise par le plasma de claquage généré au centre de la cavité. D'autres ouvertures sont également présentes pour remplir et vider le réservoir et assurer la mesure de la pression dans la chambre. Le contrôle de la pression, à l'aide d'un manomètre, se fait avec une précision au millibar. L'imagerie rapide est obtenue par le couplage d'un spectromètre ACTON sp2750i (9) utilisé en mode miroir (fente d'entrée ouverte, réseau à l'ordre 0) et d'une caméra intensifiée (10) PI-MAX II positionnée en sortie du spectromètre (9).

Le principe de fonctionnement consiste à envoyer (1) un faisceau laser focalisé (4b) au sein du réacteur (5) et de collecter la lumière émise par le claquage (7 à 10). Selon la configuration optique utilisée le diamètre  $D$  du faisceau laser peut être agrandi ou non d'un facteur 2 à l'aide d'une paire de lentilles plano-concave (3) et plano-convexe (4a).

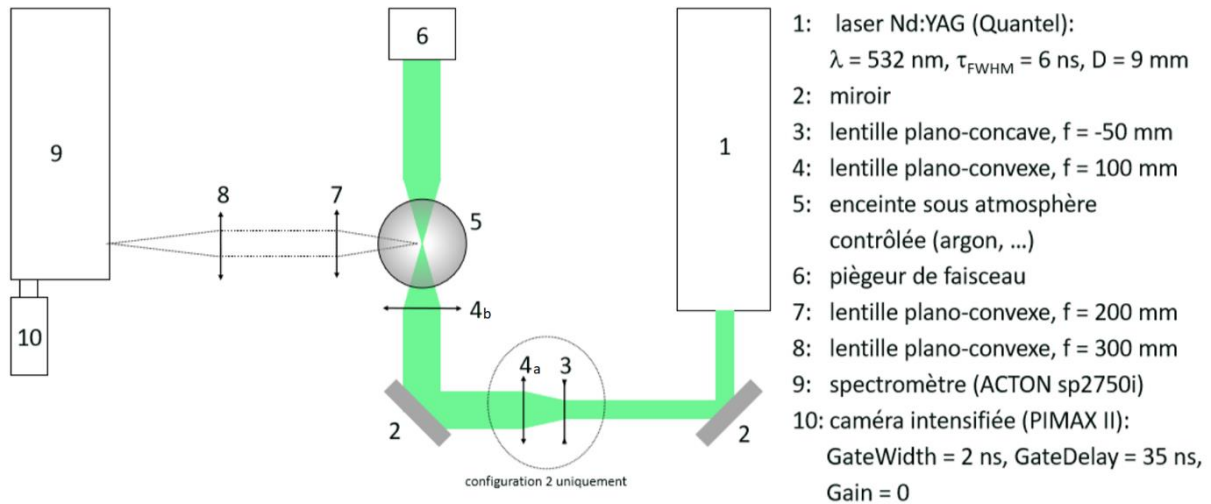


Figure 1 : Schéma détaillé du banc d'essai.

## 1.2. Configurations optiques

La focalisation laser, cf figure 2, se caractérise par le rayon au col, noté généralement  $\omega_0$  et s'exprime en  $\mu\text{m}$ . Ce paramètre est fonction des caractéristiques du faisceau laser (longueur d'onde  $\lambda$ , diamètre  $D$  et facteur de qualité  $M^2$ ), ainsi que de la longueur focale  $f$  avec laquelle il est focalisé :

$$\omega_0 = \frac{2\lambda f M^2}{\pi D} \quad (1)$$

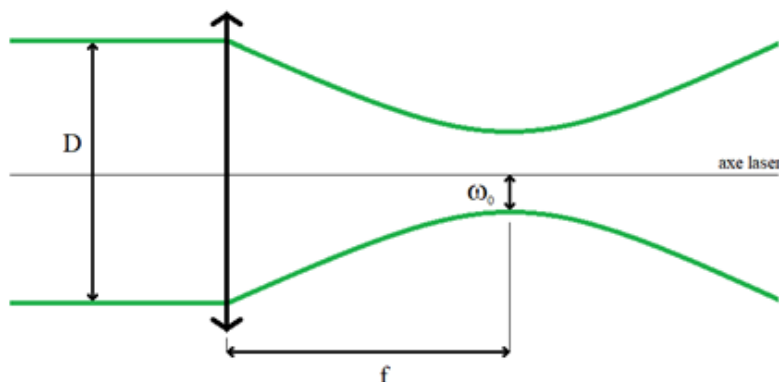


Figure 2 : schéma de la focalisation laser.

La configuration optique n°1 correspond à un diamètre  $D = 9$  mm tandis que la configuration n°2 correspond à un diamètre  $D = 18$  mm. Ces diamètres permettent d'obtenir un rayon au col théorique  $\omega_0$  de  $5,6 \mu\text{m}$  pour la configuration n°1 et de  $2,8 \mu\text{m}$  pour la n°2. Pour une énergie laser fixée, la densité d'énergie au col de la configuration n°2 est ainsi 4 fois supérieure à celle de la n°1.

### 1.3. Protocole expérimental

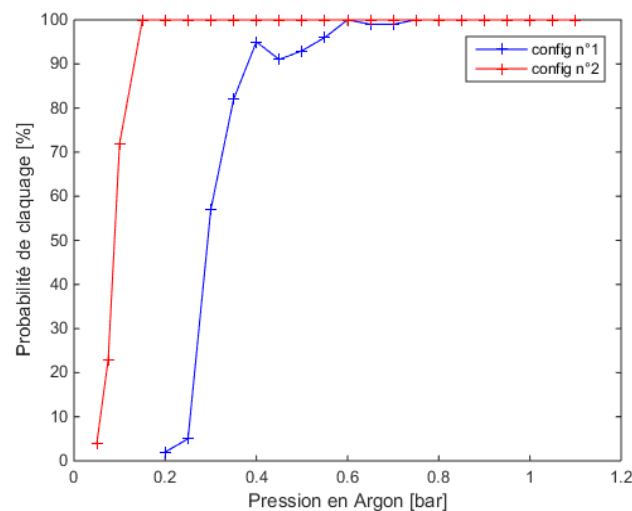
Pour chacune des configurations optiques 23 pressions d'argon ont été testées :  $P = \{0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, \dots, 1.05, 1.1\}$  bar. Les pressions sont contrôlées à l'aide d'un manomètre d'une précision de 1 mbar. Pour chaque pression 100 tirs lasers cadencés à une fréquence de 2.5 Hz ont été effectués. A chaque changement de pression un vide primaire est effectué dans le réacteur. L'image du claquage laser est acquise sur la matrice de la caméra intensifiée au premier instant de son apparition avec une durée d'ouverture de 2 ns.

## 2. Résultats et analyse

### 2.1. Probabilité de claquage

Chaque tir laser amène à un des deux événements suivants : « absence de claquage » ou « présence d'un claquage ». Dans cette série d'essais, l'évènement « présence d'un claquage » est avéré s'il existe au moins 1 pixel de la matrice de la caméra intensifiée ayant une intensité dont le rapport signal sur bruit est supérieur à 2.

La figure 3 présente le nombre d'évènements « présence d'un claquage » pour chaque pression pour les deux configurations optiques utilisées. Il apparaît clairement que la configuration optique n°2, celle permettant la plus forte densité d'énergie, est la plus performante. En effet, non seulement le nombre d'évènements positifs (« présence d'un claquage ») y est toujours supérieur à celui de la configuration n°1, mais en plus elle permet également d'observer des claquages à de plus basses pressions que la configuration optique n°1. Enfin, l'allure non-monotone de la courbe expérimentale concernant la configuration n°1 semble déjà indiquer une difficulté dans la reproductibilité des tirs.



**Figure 3** : nombre d'évènements positifs (« présence d'un claquage ») pour chacune des configurations optiques, en fonction des pressions testées.

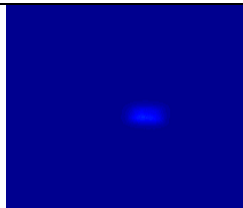
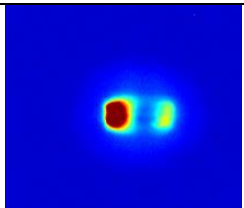
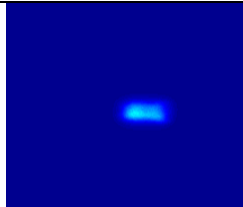
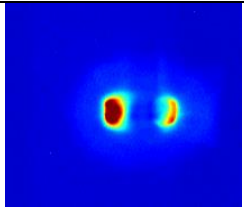
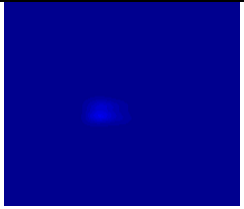
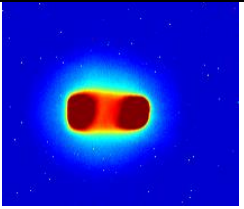
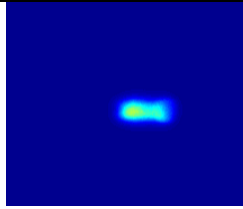
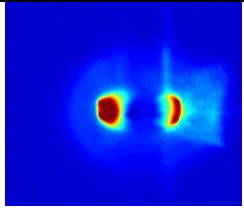
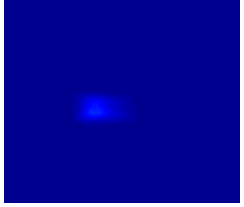
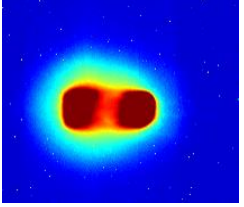
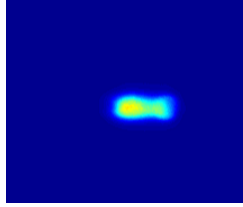
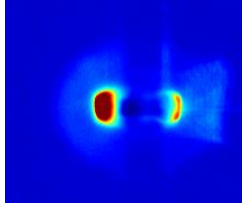
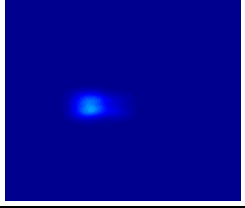
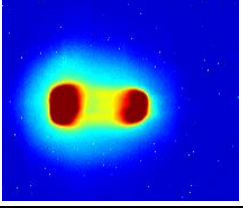
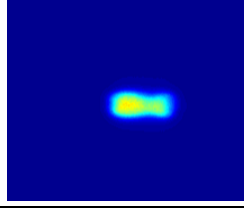
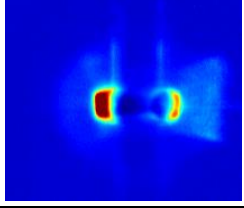
### 2.2. Moyenne et écart-type

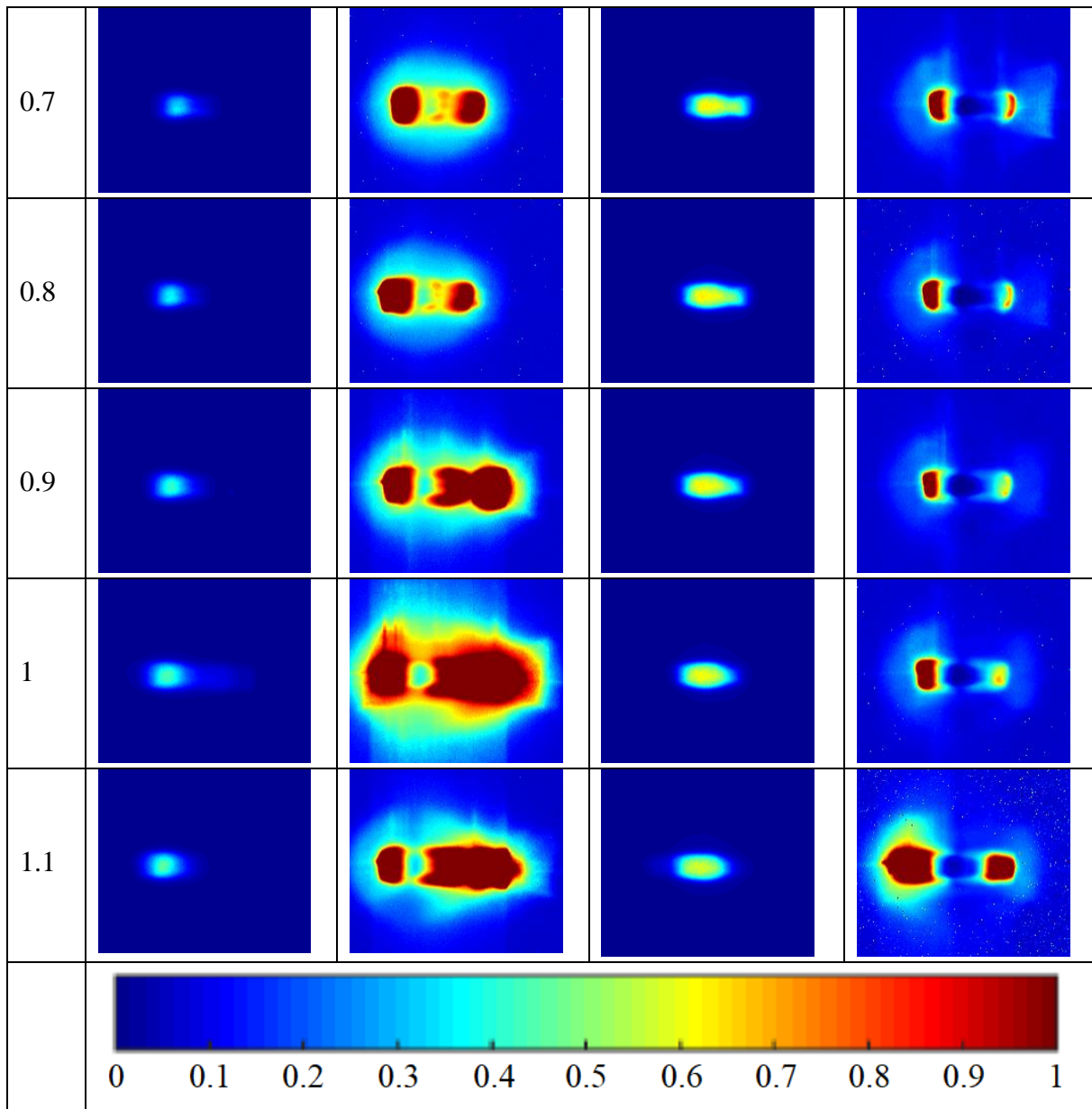
Sans effectuer de prétraitement, l'intensité moyenne locale  $\mu(x;y)$  et l'écart-type  $\sigma(x;y)$  non-biaisé en pourcentage par rapport à l'intensité moyenne locale pour chaque série de 100 tirs à chaque pression et pour chaque configuration optique, sont calculés en utilisant les intensités  $p_k(x;y)$  pour chaque pixel repéré par ses coordonnées  $x$  et  $y$  dans le plan de la matrice de la caméra (figure 4):

$$\mu(x:y) = \frac{1}{pos} \sum_{k=1}^{pos} p_k(x:y) \quad (2)$$

$$\sigma(x:y) = \frac{\sqrt{\frac{1}{pos} \sum_{k=1}^{pos} (\mu(x:y) - p_k(x:y))^2}}{\mu(x:y)} \quad (3)$$

avec  $pos$  le nombre d'évènements positifs pour une série de 100 tirs. Si  $pos$  est inférieur à 90 la cartographie n'est pas faite.

$P$ [bar]	Configuration optique n°1		Configuration optique n°2	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
0.2	-	-		
0.3	-	-		
0.4				
0.5				
0.6				

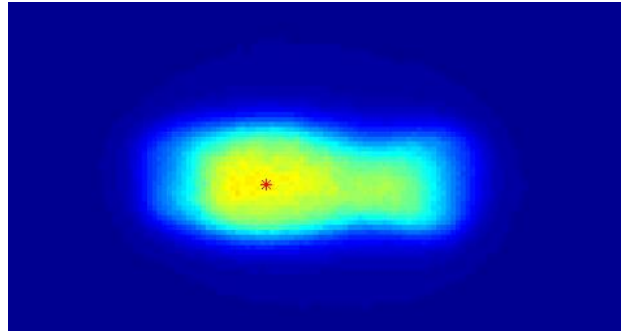


**Figure 4 :** cartographie spatiale de la moyenne  $\mu$  et de l'écart-type  $\sigma$  des évènements positifs pour chacune des configurations optiques et pour toutes les pressions testées. [Toutes les images sont à la même échelle ( $h \times l = 2.28 \text{ mm} \times 2.68 \text{ mm}$ ) et le laser vient de la gauche]

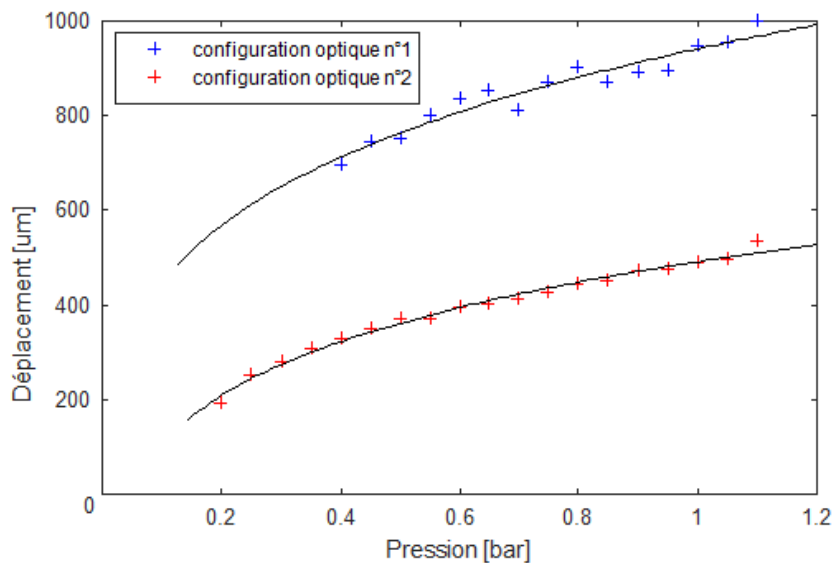
Concernant les moyennes de chaque série on constate que la focalisation la plus forte permet systématiquement d'obtenir un signal de plus forte intensité que la configuration n°1 lorsque les deux sont comparées à même pression. L'écart-type révèle qu'une focalisation plus forte permet également d'accroître la reproductibilité spatiale du claquage laser et que la zone ayant la plus forte intensité est également la zone avec le plus faible écart-type.

### 2.3. Déplacement du claquage laser

Les moyennes obtenues sur la figure 4 montrent que le claquage laser se déplace vers la source laser (vers la gauche de l'image) lorsque la pression augmente, et ce pour les deux configurations optiques. En identifiant le centre du claquage laser par un calcul barycentrique avec l'intensité mesurée en chaque pixel comme pondération (figure 5), on peut observer le déplacement du claquage laser (figure 6) depuis le point focal vers la source laser. Le déplacement d'un pixel correspond à une distance de  $12.7 \mu\text{m}$ .



**Figure 5** : barycentre pondéré pour  $P = 0.7$  bar avec la configuration optique n°2.



**Figure 6** : déplacement du barycentre pondéré en fonction de la pression pour les deux configurations optiques.

Le déplacement du claquage est plus marqué lorsque la focalisation est faible : un déplacement de  $300 \mu\text{m}$  (24 pixels) est observé entre  $P = 0.4$  bar et  $P = 1.1$  bar, alors qu'il est de  $200 \mu\text{m}$  (16 pixels) entre les mêmes pressions pour la focalisation forte (configuration 2). Ces déplacements ne sont absolument pas négligeables car ils sont du même ordre de grandeur que la zone de dépôt d'énergie la plus stable et de plus, représentent un ordre de grandeur de plus que l'ordre de grandeur d'ouverture typique de la fente d'entrée du spectromètre pour des applications de SOE.



### 3. Conclusion et perspectives

Cette série d'essais préliminaires a montré que la configuration n°2 est la plus efficace en terme de :

- Quantité de signal collecté
- Reproductibilité du signal collecté

La probabilité d'obtenir un claquage à basse pression avec la configuration n°2 est nettement supérieure à celle de la configuration n°1 : l'effet de paramétrage de la focalisation semble être un point clef pour la reproductibilité spatiale et temporelle des étincelles.

Ce travail trouvera des suites dans des applications telles que la LIBS et la diffusion Thomson qui nécessitent une bonne reproductibilité du dépôt d'énergie par laser. Il aura également des débouchés dans la génération contrôlée d'explosions sous forme de déflagration ou de détonation, étape très importante pour l'étude de leurs effets sur les structures ; volet poursuivi dans le cadre du projet APROPOR-E [11].

### Références

- [1] R.W. Terhune, P.D. Maker, (1964), « *Studies using high intensity pulsed laser beams* », Society of automotive engineers, 816B : p 1-8.  
Doi: 10.4271/640395
- [2] S.A. Ramsden, P. Savic, (1964), « *A radiative detonation model for the development of a laser induced spark in air* », Nature, 203 : p 1217- 219.  
Doi: 10.1038/2031217a0
- [3] C. DeMichelis, (1968), « *Laser Induced Gas Breakdown: A Bibliographical Review* », Quantum Electronic, 5-4 : p 188-202.  
Doi: 10.1109/JQE.1969.1075758
- [4] T.X. Phuoc, (2006), « *Laser-induced spark ignition fundamental and applications* », Optics and Lasers in Engineering, 44 : p 351-397.  
Doi: 10.1016/j.optlaseng.2005.03.008
- [5] L.J. Radziemski, (2002), « *From LASER to LIBS, the path of technology development* », Spectrochimica Acta Part B, 57 : p 1109 - 1113.  
Doi: 10.1016/S0584-8547(02)00052-6
- [6] M. Baudelet, B.W. Smith, (2013), « *The first years of laser-induced breakdown spectroscopy* », Analytical Atomic Spectrometry, 28 : p 624 - 629.  
Doi: 10.1039/C3JA50027F
- [7] L. Jolivet, M. Leprincea, S. Moncayoa, L.Sorbierb, C. P. Lienemannb, V. Motto-Ros, (2019), « *Review of the recent advances and applications of LIBS-based imaging* », Spectrochimica Acta Part B, 151 : p 41 - 53.  
Doi: 10.1016/j.sab.2018.11.008
- [8] Z. Zhang, T. Lia, S. Huang, (2019), « *Influence of the pressure and temperature on LIBS for gas concentration measurements* », Spectrochimica Acta Part B, 155 : 24 - 33.  
Doi: 10.1016/j.sab.2019.03.008

- [9] S. Rudz, P. Gillard, (2018), « *Effect of initial laser beam diameter on breakdown and ignition properties of n-decane/N<sub>2</sub> /O<sub>2</sub> mixtures* », Combustion Sciences and Technology, 191-2 : p 284-295.  
Doi: 10.1080/00102202.2018.1459585
- [10] S. Rudz, K. Chetehouna, C. Strozzi, P. Gillard, (2014), « *Minimum Ignition Energy Measurements for  $\alpha$ -Pinene/Air Mixtures* », Combustion Sciences and Technology, 186 - 10-11 : p 1597-1605.  
Doi: 10.1080/00102202.2014.935604
- [11] « APROPOR-E: Amélioration de la PROduction, du stockage et de la gestion de l'énergie : matériaux POREux et Energie », APR-IA de la Région Centre Val de Loire, GREMI, 2018-2020