



HAL
open science

Étude de l'interaction d'une décharge électrique avec un écoulement laminaire par diagnostics optiques

C. Lacour, A. Lo, J Marrero, Franck Lefebvre, P. Vervisch, A. Cessou,
Bertrand Lecordier

► To cite this version:

C. Lacour, A. Lo, J Marrero, Franck Lefebvre, P. Vervisch, et al.. Étude de l'interaction d'une décharge électrique avec un écoulement laminaire par diagnostics optiques. Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2016, Sep 2016, Toulouse, France. hal-01852217

HAL Id: hal-01852217

<https://hal.science/hal-01852217v1>

Submitted on 1 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude de l'interaction d'une décharge électrique avec un écoulement laminaire par diagnostics optiques

C. Lacour¹, A.Lo², J.Marrero¹, F.Lefebvre¹, P.Vervisch¹, A.Cessou¹, B.Lecordier¹

1: CORIA UMR 6614 CNRS – Normandie Université, (BP12), F-76801 Saint Etienne du Rouvray Cedex

2: Laboratoire EM2C, CNRS École Centrale Paris, 92295 Châtenay-Malabry Cedex, France

Résumé

Les technologies récentes mises au point en moteur à allumage commandé et injection directe essence sont tournées vers le downsizing et la combustion diluée par EGR. Ces modes de combustion sont prometteurs pour la réduction des émissions CO₂ mais restreignent fortement la stabilité de l'allumage, particulièrement pour les mélanges pauvres. L'allumage par décharge électrique présente un fort potentiel pour répondre à ces contraintes, à condition de maîtriser les couplages existants entre la décharge plasma et les mécanismes d'initiation de la combustion. Une caractérisation des propriétés physico-chimiques de la décharge ainsi que l'étude de la topologie de l'arc et de l'écoulement environnant sont réalisées par diagnostics optiques. La décharge électrique est générée par une bobine crayon (Marque Audi) entre deux électrodes placées en configuration pointes-pointes et écartées de 3 mm dans l'air à pression atmosphérique. Les évolutions temporelles du courant et de la tension délivrés aux électrodes sont mesurées pour évaluer l'énergie maximum qui peut être déposée dans le gaz. Les résultats obtenus apportent des éléments de compréhension des mécanismes de couplage entre une décharge électrique et l'écoulement mais constituent également une base de données pour la validation de simulation numérique.

1. Introduction

Le potentiel des systèmes d'allumage par arc électrique reste à optimiser par une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lors dans l'interaction d'une décharge électrique avec un écoulement gazeux turbulent. Le volume et la durée de la décharge, ainsi que l'évolution temporelle du dépôt d'énergie doivent être maîtrisés pour identifier des paramètres clés qui permettront l'optimisation des systèmes d'allumages à venir.

La décharge étudiée est générée par une bobine commerciale entre deux électrodes placées en configuration pointe-pointe. Le dépôt d'énergie est réalisé à pression atmosphérique à la sortie d'une soufflerie laminaire, laissant la possibilité d'étudier la décharge dans un écoulement au repos mais également dans un écoulement laminaire avec différentes vitesses de sorties allant jusqu'à 15m/s. La topologie de l'écoulement gazeux et de la décharge elle-même sont analysées à l'aide de diagnostics optiques avancés telles que la Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) et l'imagerie haute cadence intensifiée. Ces résultats sont complétés par une caractérisation physico-chimique de la décharge s'appuyant sur la mesure de la température du gaz autour de la décharge obtenue par Diffusion Raman Spontanée (SRS). Pour chaque condition opératoire, l'évolution temporelle de la tension et du courant sont mesurées de manière à évaluer l'énergie maximum disponible aux électrodes. Ces propriétés électriques de la décharge sont des données essentielles pour la modélisation et la simulation numérique de tels procédés d'allumage.

2. Dispositif expérimental et diagnostics optiques

Le dispositif expérimental est représenté sur la Figure 1. Les électrodes sont placées en configuration pointes-pointes à la sortie d'une soufflerie laminaire produisant un jet d'air de 20 mm de diamètre. La soufflerie est constituée de lits de billes de verre et de nid d'abeille. Elle a été conçue avec un double profil convergent et un rapport de section 1:100 pour garantir un jet laminaire uniforme et stable avec une turbulence résiduelle très faible. Les électrodes cylindriques de 1.6mm de diamètre sont conçues en acier inoxydable et présentent un profil parabolique avec une courbure de 150 μ m à la pointe. La distance inter-électrode est fixée à 3mm, une distance suffisamment grande pour garantir une forte résolution spatiale des mesures optiques. Ce cas de référence sera comparé par la suite aux résultats obtenus avec une distance inter-électrodes de 0.8mm, plus représentative de la géométrie de bougie commerciale.

La haute tension appliquée aux électrodes est fournie par une bobine crayon de marque Audi alimentée par un générateur 12V DC de 25A. La durée du créneau de commande permettant la charge de la bobine est fixée à 4ms pour être représentatif des conditions de fonctionnement en moteur.

L'interaction de l'arc électrique avec l'aérodynamique de l'écoulement gazeux environnant est réalisée par Vélocimétrie par Image de Particule (PIV) avec des adaptations spécifiques. Le système d'acquisition est constitué d'une camera MicroMax Roper (1280x1024@12 bits) équipée d'un objectif 105 mm macro (Nikon 105mm f/2.8 AF-D). La zone de visualisation est fixée à 8 mm x 6 mm avec une résolution 165 px.mm⁻¹. Un laser Quantel Nd:YAG double cavité 532 nm Twins Ultra (25 mJ) est utilisé comme source d'excitation. La nappe laser est formée grâce à une lentille sphérique convergente (f = 600 mm) et une cylindrique divergente (f = -100 mm), elle est focalisée dans le plan central de sortie de la soufflerie. La nappe laser est diaphragmée pour réduire son épaisseur à 500 μ m par des lames ajustables. Les électrodes ont été orientées avec un angle de 20° par rapport à la direction de la nappe laser de manière à faire passer cette dernière au plus proche de l'espace inter-électrode sans provoquer d'intense diffusion sur la pointe des électrodes (Fig.1). L'absence d'influence de la position des électrodes sur les propriétés électriques de l'arc (évolution temporelle du courant et de la tension) ainsi que sur la topologie de la décharge a été vérifiée.

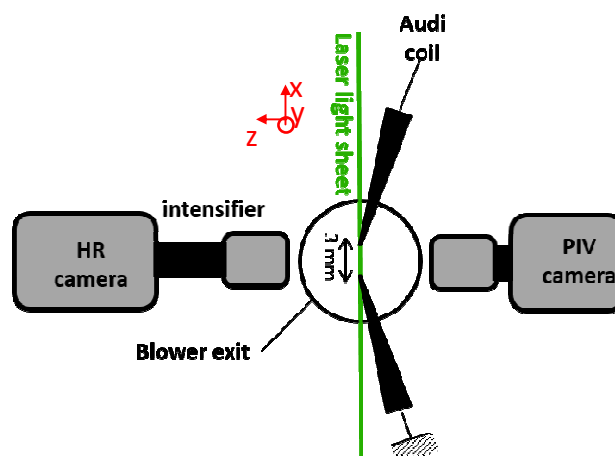


Fig. 1: Représentation du dispositif expérimental (vue de dessus)

Les principales difficultés rencontrées sont liées à la petite taille de la zone de visualisation mais plus particulièrement à l'obtention de mesures en phase avec le déclenchement du breakdown.

En effet, une incertitude temporelle de quelques microsecondes entre l'instant de la décharge et le signal de commande est inhérente à l'utilisation d'une bobine commerciale pour la génération de l'étincelle. Un système de synchronisation original a été développé pour réaliser des mesures précises en phase avec le breakdown. La lumière émise lors de la phase de breakdown est collectée par un photomultiplicateur (PMT) couplé à une fibre optique. Le signal de sortie du PMT est converti en TTL pour déclencher un générateur de délai qui contrôle la séquence d'acquisition. Pour cette synchronisation, les éléments ont été choisis avec soin pour obtenir un temps de réponse global inférieur à 200ns et ainsi permettre des mesures en phase avec le breakdown aussi précises que possible.

La température des gaz environnant la décharge est mesurée par Diffusion Raman Spontanée (SRS). Le dispositif expérimental est décrit brièvement dans ce papier et les détails sont disponibles dans la littérature (Ajrouche et al. 2014, 2015). La température du gaz est obtenue par une régression des moindres carrés des spectres Raman expérimentaux sur les spectres théoriques. La modélisation des spectres Raman et le traitement des résultats expérimentaux sont détaillés par Lo et al. et Ajrouche et al; (Lo et al., 2012, Ajrouche et al., 2014).

La déformation et l'élongation de la décharge dans l'écoulement sont analysées par imagerie intensifiée rapide à l'aide d'une caméra rapide Phantom V10 équipée d'un intensificateur Hamamatsu double étage et d'un objectif UV Cerco 100 mm. La résolution spatiale est de 20 μ m/px. La fréquence d'acquisition est fixée à 10kHz avec une porte d'intensification de 3 μ s pour permettre un niveau de signal suffisant et un temps d'intégration court. Le spectre d'émission du plasma généré entre les électrodes est très intense dans l'UV. Un filtre passe-bande UG5 a été placé devant l'objectif pour réduire l'émission autour de 300 nm. Cependant le signal émis lors des premiers instants de la décharge correspondant au breakdown reste très intense et sature le capteur. Cette difficulté a été surmontée en plaçant une lame de verre absorbante dans l'UV devant les électrodes de manière à réduire fortement l'émission pendant les premiers instants de la décharge sans dégrader le signal collecté plus tardivement lorsque l'arc est transporté avec l'écoulement en aval des électrodes.

3. Caractérisation électrique de la décharge

Maly et ses co-auteurs ont été les premiers à décrire la décharge comme une succession de 4 étapes (Maly & Vogel, 1979, 1981, Albrecht et al. 1977, Ziegler et al. 1985). La première est appelée *pré-breakdown* ou propagation de streamer. Lors de cette étape, la tension augmente très rapidement pour permettre la formation d'un canal de gaz ionisé entre les électrodes. Ensuite, pendant la phase de breakdown, qui dure quelques nanosecondes, l'augmentation de courant (100A) et de tension (10kV) est très intense. Le gaz entre les électrodes est alors assimilé à un plasma dont la température peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de Kelvin. La troisième phase est appelée *arc* et caractérisée par une chute de tension en quelques microsecondes. L'intensité de la décharge est alors très importante. La dernière étape, dite de *glow*, est la plus longue et a une durée de plusieurs millisecondes qui est principalement liée à la durée de charge de la bobine.

Dans cette étude, la tension U et le courant total I sont mesurés aux électrodes respectivement à l'aide d'une sonde haute tension (Tektronix P6015A, de résistance 100 M Ω et de bande passante 75 MHz) et d'une sonde de courant résistive 0.05 Ω (T&M Research SNBC-5-5 de bande passante 800 MHz). Les résultats sont présentés sur la Figure 2 pour une décharge réalisée dans l'air au repos sous pression atmosphérique. Le temps de charge de la bobine est fixé à 4ms. La résolution temporelle de la mesure est adaptée pour la phase de breakdown (Fig. 2 (a)) et pour la phase de glow (Fig 2(b)).

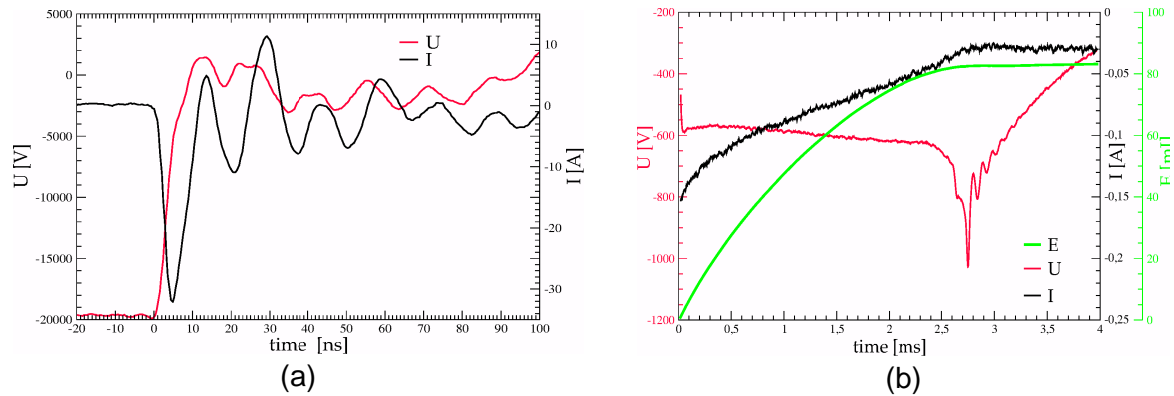


Fig. 2: Evolution temporelle de la tension et du courant au cours de la phase de breakdown (gauche) et de glow (droite) pour une décharge dans l'air au repos à pression atmosphérique.

Le pic de tension atteint 20kV et le pic de courant 30A pendant la phase de breakdown (Fig. 2. (a)). Les pics de courant et de tension sont négatifs pour être représentatifs de la situation en moteur. La phase de breakdown ne dure que quelques dizaines de nanosecondes. Au cours de la phase de glow Fig.2 (b), la tension atteint 0.6 kV et l'étincelle persiste pendant 2,8ms après le breakdown. L'énergie délivrée pendant cette phase est obtenue par intégration temporelle du produit du courant et de la tension après un « recalage » temporel des mesures des deux sondes. Un exemple est présenté par la courbe verte sur la figure 2 (b). Durant la phase de breakdown, l'énergie est obtenue à partir de la capacité du système et de la tension de claquage en utilisant l'équation (eqn. 1):

$$E = \frac{1}{2} C U_{peak}^2 \quad (1)$$

La capacité du système est estimée à partir de la montée de courant et de tension pendant la phase de pré-breakdown. La capacité est estimée à 9pF pour ces conditions et le pic de tension est mesuré à 20 kV (Fig.2(a)), l'énergie disponible aux électrodes lors de la phase de breakdown est alors évaluée à 1.3 mJ. La décharge ainsi caractérisée électriquement est ensuite étudiée dans de l'air au repos puis dans un écoulement d'air laminaire de vitesse variable.

4. Caractérisation de la décharge dans l'air au repos

La décharge est tout d'abord déposée dans un écoulement pratiquement au repos. Une très faible vitesse de sortie de la soufflerie est toutefois conservée pour maintenir un ensemencement suffisant et réaliser des mesures de vitesse autour de l'arc par PIV. Le champ de vitesse mesuré sans la présence de l'arc montre que les vitesses sont inférieures à 0.2 m/s avec un profil plat et des fluctuations inférieures à 0.1m/s entre les deux électrodes. Des zones de sous vitesse sont observées derrière les électrodes dans leur sillage.

La figure 3 présente les champs de vitesses moyennes obtenus autour de la décharge pour des instants fixés après le breakdown. Les vecteurs sont colorés par leur norme et les images de particules sont superposées aux champs de vitesse, laissant apparaître en noir la zone de gaz chaud correspondant à l'évaporation des particules d'huile qui constituent l'ensemencement. Le champ de vitesse du gaz est fortement impacté par la présence de la décharge. Les premiers

instants témoignent de l'expansion rapide de l'onde de choc. Puis à $41 \mu\text{s}$ des entrées d'air importantes sont mesurées le long des électrodes en direction de la zone centrale avec des vitesses atteignant 7m/s . Ce flux d'air est induit par la chute de pression derrière l'onde de choc (Borghese, Sforzo et al., 2015, Bane et al., 2015). Après ces instants, la vitesse décroît rapidement et l'écoulement est soumis à des instabilités hydrodynamiques induites par les gradients de pression et de densité dans l'écoulement post-étincelle (Borghese et al., 1989, Schneider, 2006). Les profils de vitesses transverses (d) présentent une symétrie dans les premiers instants, puis témoignent de l'entrée de gaz latéral à $41\mu\text{s}$. Pour des temps plus longs les profils présentent une dissymétrie et les vitesses décroissent rapidement.

5. Transfert de chaleur au gaz induit par la décharge

Pour les mêmes conditions expérimentales (air au repos et à pression atmosphérique), la chaleur transférée au gaz environnant la décharge est évaluée par la mesure de température en utilisant la Diffusion Raman Spontanée (SRS). La figure 4 présente l'évolution temporelle de la température moyenne pour des profils verticaux à $x=0\text{mm}$. Le profil extrait à $x=0\text{mm}$ et $y=0,75\text{mm}$ (position représentée par le point rouge sur la figure 3(e)) montre deux pics successifs de température. Le premier a lieu $100\mu\text{s}$ après le breakdown et il est attribué à un chauffage convectif induit par l'expansion rapide du canal de gaz chaud qui suit l'expansion de l'onde de choc. A $500\mu\text{s}$ les gaz sont refroidis, probablement sous l'effet de l'onde de raréfaction qui suit l'onde de choc (Maly, 1984). Un second pic de température est observé après $1000\mu\text{s}$ et atteint plus de 2500K à 2ms et est attribué à un chauffage par conduction pendant la phase de glow. La température décroît ensuite progressivement mais atteint encore 1000K à 4ms alors que l'arc est totalement éteint.

Les profils de température extraits pour des positions en aval dans l'écoulement, $y=1 \text{ mm}$ à $1,75 \text{ mm}$ indiquent que le gaz n'est pas chauffé avant $50\mu\text{s}$, comme visualisé par la présence de particule à ces positions pour ces instants (Fig.4 (a), (b) and (c)).

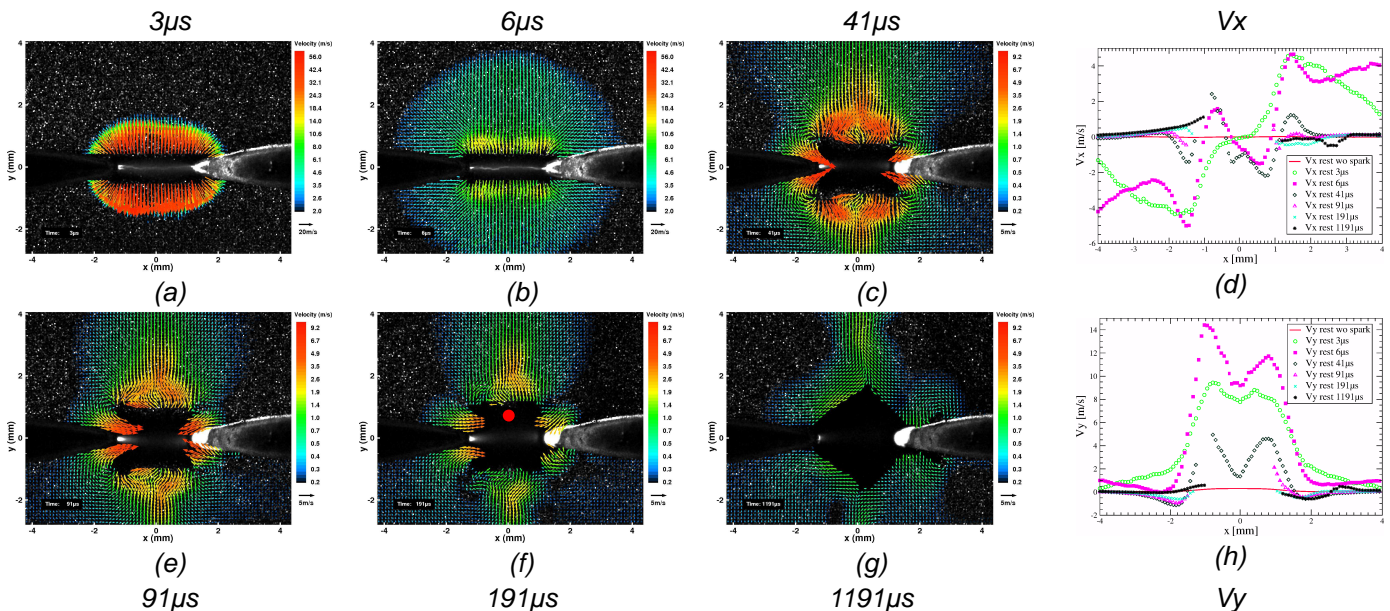


Fig.3: Champ de vitesse autour de l'étincelle après le breakdown dans un écoulement au repos. Les vecteurs sont colorés par leur norme et les images de particules sont superposées.

Profils de vitesses associés à $y=1\text{mm}$ (d), (h).

La zone de gaz chaud en expansion derrière l'onde choc atteint la position $y=0,75\text{mm}$ à $50\mu\text{s}$. Le gaz est ensuite chauffé pour des positions supérieures et à des températures moins élevées.

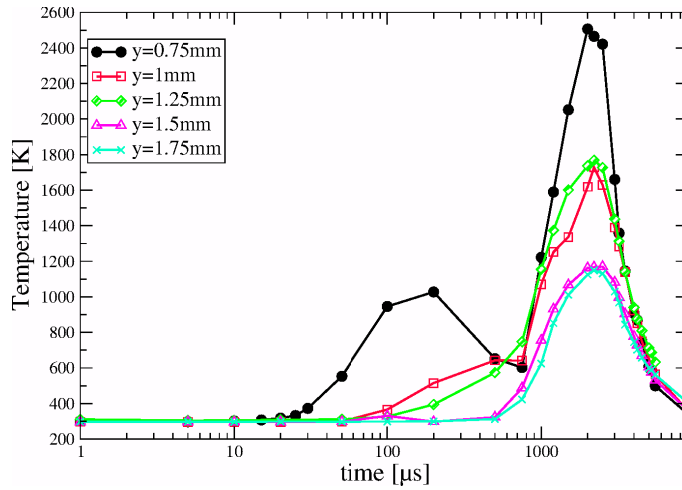
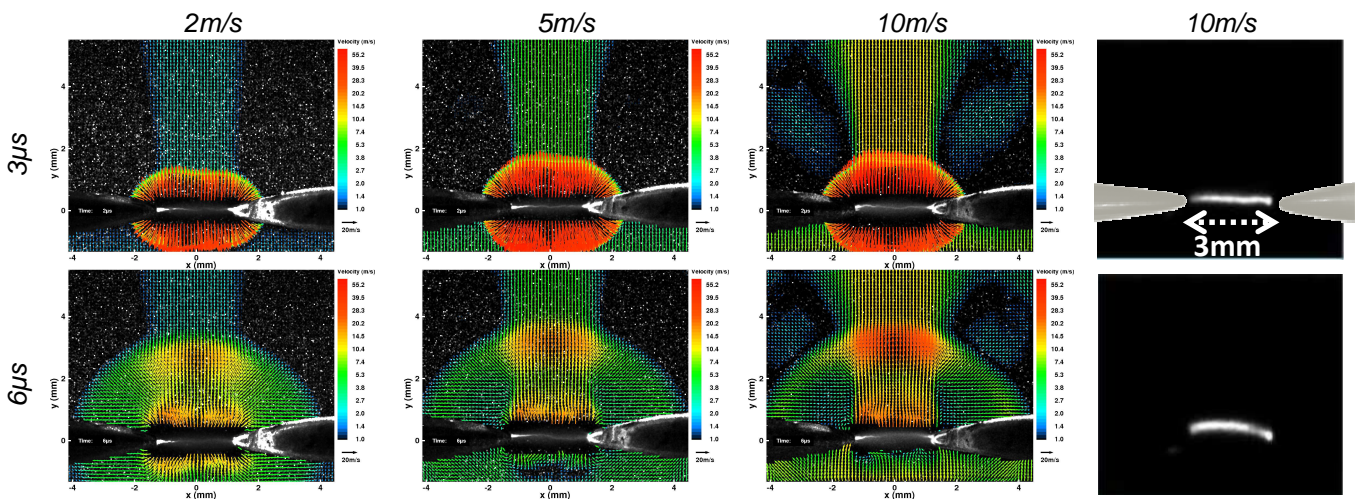


Fig.4: Profil temporel de température à $x=0\text{ mm}$ pour plusieurs positions transverses ($y=0.75$ à $y=1.75\text{mm}$)

6. Caractérisation de la décharge dans un écoulement laminaire

La décharge est déposée à la sortie de la soufflerie laminaire dans des conditions de vitesse de 2, 5 et 10 m/s. La figure 5 présente les champs de vitesse obtenus pour différents instants après le breakdown. Les résultats obtenus avec un écoulement de 2m/s, 5m/s et 10 m/s sont synthétisés respectivement dans première (a), la deuxième (b) et la troisième (c) colonnes. Pour les premiers instants de l'étincelle ($3\mu\text{s}$) la symétrie horizontale de l'écoulement induit par l'expansion rapide de l'onde de choc est observable pour les trois vitesses d'écoulements. Dès $6\mu\text{s}$, l'écoulement est modifié par le flux transverse et la symétrie est perdue. En particulier à $41\mu\text{s}$, de fortes vitesses le long des électrodes en direction de la zone transverse sont toujours mesurées mais cette entrée de gaz dans la zone centrale est fortement modifiée par l'écoulement laminaire. Probablement dû à un effet convectif, l'écoulement est alors accéléré par un facteur 2 à l'aval de l'étincelle par rapport au flux amont. Pour des temps plus longs, la zone de gaz chauds est transportée en aval des électrodes et l'écoulement est soumis aux effets des instabilités hydrodynamiques.



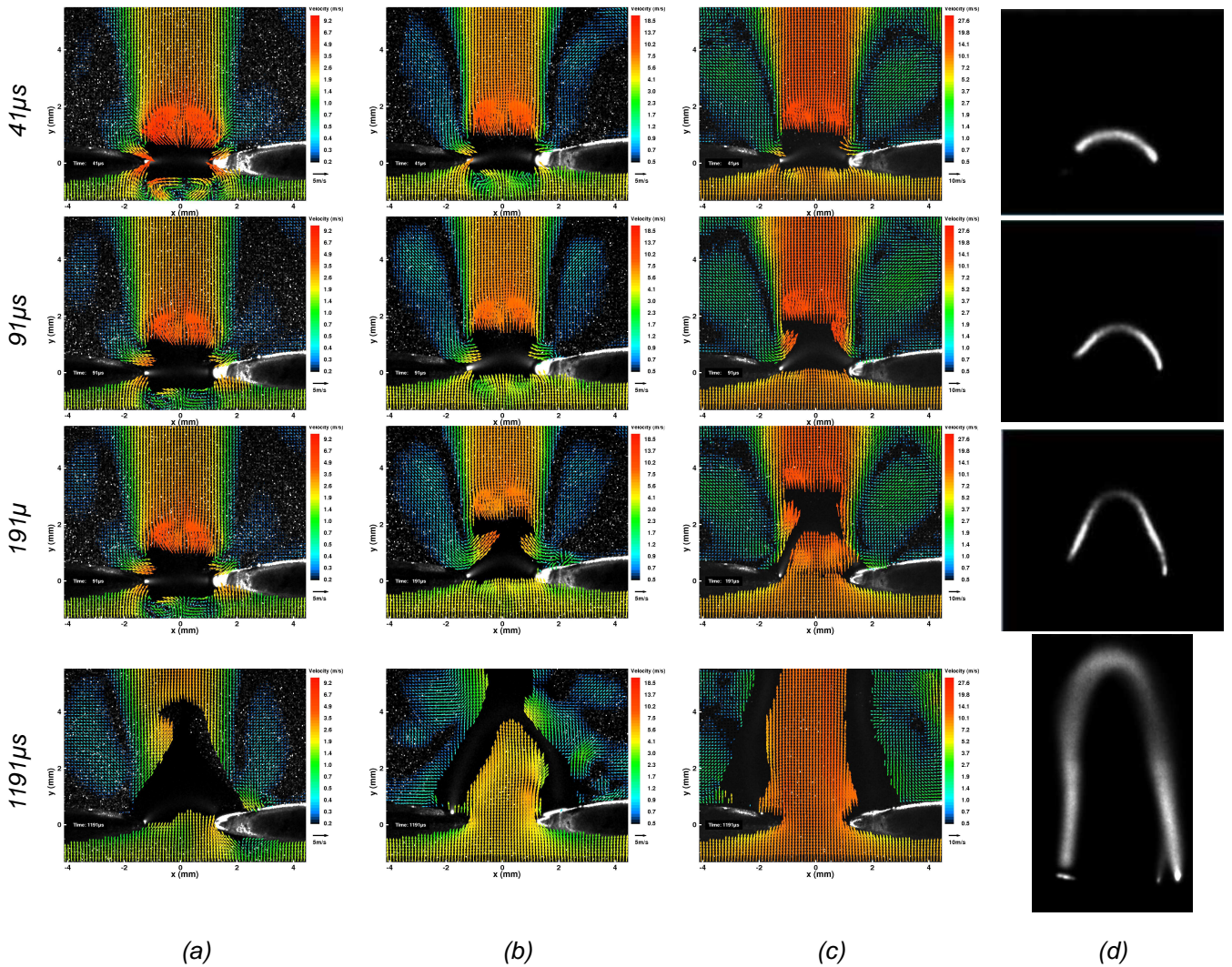


Fig.5: Champ de vitesse du gaz environnant la décharge pour un écoulement laminaire de 2m/s (a), 5 m/s (b) and 10m/s (c). Image d'émission moyenne de la décharge (d) écoulement à 10m/s.

La déformation et l'étirement de l'arc sont analysés par de l'imagerie haute cadence intensifiée avec une porte très courte. A titre d'illustration les résultats obtenus pour un écoulement transverse de 10m/s sont présentés sur la Figure 5 (d). Pour les premiers instants ($3\mu\text{s}$) l'arc n'est pas perturbé par l'écoulement est resté confiné entre les deux électrodes puis, il est étiré dans la direction de l'écoulement. La longueur de l'arc a été extraite de ces images et analysée en fonction du temps pour les différentes vitesses d'écoulement. Les résultats ont montré que plus la vitesse de l'écoulement est importante, plus l'arc est étiré rapidement.

L'effet de ces importantes modifications de topologie de l'arc sur l'énergie déposée dans l'écoulement est un point important et a été analysée grâce aux mesures de courant et de tension. L'énergie déposée pendant la phase de glow est obtenue par intégration temporelle du courant et de la tension, ces résultats sont présentés sur la figure 6 en fonction de la vitesse d'écoulement imposée. Avec ces mesures, on constate que l'énergie augmente progressivement avec la vitesse de l'écoulement pour atteindre 110mJ à 15m/s. L'élongation importante et rapide de l'arc dans l'écoulement (Figure 5(d)) induit une augmentation de la résistance électrique entre les deux pointes mais également une diminution de la durée de l'étincelle, comme le montre la Figure 6. La combinaison de ces deux effets, conduit à une diminution des pertes par effet Joule au secondaire qui se traduit par un dépôt d'énergie aux électrodes plus important.

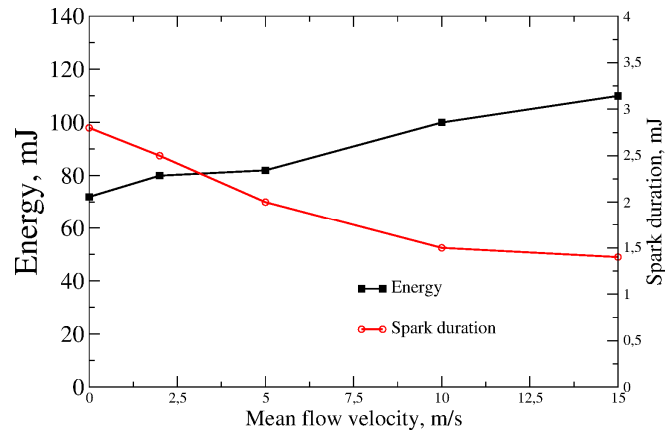


Fig.6: énergie déposée et durée de l'étincelle pour différentes vitesses d'écoulement.

Conclusion

Une décharge électrique générée par une bobine commerciale entre deux électrodes pointes-pointes a été générée dans l'air au repos puis dans un écoulement laminaire dont la vitesse a été progressivement augmentée jusqu'à atteindre 15m/s. L'interaction de l'étincelle avec l'écoulement est analysée à l'aide de diagnostics optiques (PIV, Diffusion Raman Spontanée et imagerie rapide intensifiée). Les évolutions temporelles du courant et de la tension ont été également enregistrées pour ces différentes conditions afin d'évaluer l'énergie totale disponible aux électrodes.

Dans un écoulement laminaire de vitesse croissante, l'énergie disponible augmente tandis que la durée de l'étincelle diminue. La forte élévation de l'arc dans ces conditions induit une augmentation de résistance aux bornes des électrodes et une consommation plus rapide de l'énergie délivrée par la bobine.

Les champs de vitesses obtenus par PIV ont montré des entrées d'air importantes le long des électrodes après le passage de l'onde de choc ainsi que des fortes perturbations hydrodynamiques pour des temps plus longs. Les mesures par SRS de l'évolution temporelle de la température du gaz environnant la décharge présente deux pics qui correspondent à un premier chauffage convectif dû à l'expansion rapide du canal de gaz chaud créé dans les premiers instants entre les électrodes et un deuxième chauffage par conduction dû au dépôt d'énergie pendant la phase de glow sur des temps plus longs.

Ces résultats permettent d'apporter des éléments de compréhension sur l'interaction d'une décharge électrique avec un écoulement transverse et de validation pour les modèles numériques d'allumage.

Remerciements

Ces travaux sont financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) no. ANR 12 VPTT-0002, FAMAC.

Références

Ajrrouche H., Lo A., Vervisch P. and Cessou A (2014) 1D single-shot thermometry in flames by Spontaneous Raman Scattering through a fast electro-optical shutter, *17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2014*

Ajrrouche H., Lo A., Vervisch P. and Cessou A. (2015), Assessment of a fast electro-optical shutter for 1D spontaneous Raman scattering in flames, *Measurement Science and Technology*, 26, 075501.

Lo A., Cléon G., Vervisch P., Cessou A., (2012) Spontaneous Raman scattering: a useful tool for investigating the afterglow of nanosecond scale discharge in air. *Appl.Phys B* 107 229-42.

Maly R., Vogel M., (1979) Initiation and propagation of flame fronts in lean CH₄-air mixtures by three modes of ignition spark, *Symposium (International) on Combustion*, 17(1), 821–831, [http://doi.org/10.1016.s-10082-0784\(79\)80079-X](http://doi.org/10.1016.s-10082-0784(79)80079-X)

Maly R., Vogel M., (1981) Initiation model for spark discharges and the early phase of flame front growth, *Symposium (International) on Combustion*, 18(1), 1741–1754.

Albrecht H., Bloss W. H., Herden W., Maly R., Saggau B., Wagner E, (1977) New Aspect on spark ignition, SAE technical paper, Warrendal, PA, SAE Technical paper 770853.

Ziegler G.F.W., Wagner E.P., Malt R., (1985) Ignition of lean methane air mixtures by high pressure glow and ARC discharge, *Symposium (International) on Combustion*, 20(1), 1817–1824.

Mantel, T., Contribution à la modélisation de la combustion dans les moteurs à allumage commandé avec prise en compte de la phase d'allumage, PhD, , Université de Rouen, 1993

Ternel, C. Contribution au développement de l'allumage par laser pour les moteurs à combustion interne. PhD, Université de Rouen, 2006.

Borghese A, D'Alessio A, Diana M and Venitozzi C (1989), Development of hot nitrogen kernel, produced by a very fast spark discharge *Symposium (International) on Combustion*, 22, 1651–1659

Sforzo B., A Lambert , J Kim, J Jagoda, S Menon, J Seitzman (2015) Post discharge evolution of a spark igniter kernel, *Combustion and Flame* Volume 162, pp 181 - 190

Bane S.P.M., Ziegler J.L., Shepherd J.E., (2015) Investigation of the effect of electrode geometry on spark ignition, *Combustion and Flame*, Volume 162, Issue 2, pp 462–469.

Schneider M N (2006) Turbulent decay of after-spark channels, *Phys. Plasmas* 13 073501

Maly, R. Spark Ignition: Its Physics and Effect on the Internal Combustion Process' Chapter 3. *Fuel Economy in Road Vehicles Powered By Spark Ignition Engines*. s.l. : Plenum Press, 1984.