

Étude expérimentale et numérique de l'effet thermique d'une décharge à barrière diélectrique *Numerical and experimental study of the thermal effect of a dielectric barrier discharge*

G. Leclercq¹, F. Lusseyran², G. Dufour³, J.-M. Orlac'h¹

¹DAAA, ONERA, Institut Polytechnique de Paris, 92320, Châtillon, France

²LISN, Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique, Rue Raimond Castaing bâtiment 650, 91190 Gif-sur-Yvette

³DTIS, ONERA, Université de Toulouse, 31000, Toulouse, France

Corresponding author : jean-maxime.oralach@onera.fr

Mots clés : décharge à barrière diélectrique, thermique, contrôle d'écoulement

Keywords : dielectric barrier discharge, thermal effects, flow control

Résumé

Dans ce travail, nous présentons des résultats expérimentaux et numériques sur l'effet d'une décharge à barrière diélectrique sur un écoulement au repos. Les profils de température expérimental et numérique sont en bon accord qualitatif.

Abstract

In this work, we compare experimental measurements with numerical simulations of the effect of a dielectric barrier discharge over a quiescent flow. The experimental and numerical temperature profiles agree well qualitatively.

1 Motivation

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) ont été largement étudiées dans la littérature en vue de les appliquer au contrôle d'écoulement. Ces décharges sont généralement considérées comme des plasmas froids, ce qui conduit souvent à négliger l'aspect thermique de celles-ci. Un certain nombre de travaux existent cependant permettant de caractériser des décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique [1-4]. Aucun d'entre eux n'a proposé de modélisation numérique rendant compte du chauffage induit par la DBD en sus du vent ionique.

Dans ce travail, nous proposons une modélisation simplifiée de l'effet thermique de la DBD, que nous intégrons à un modèle CFD tenant compte de la force de Coulomb à l'origine du vent ionique. Le chauffage de l'air est induit par l'effet Joule. Nous négligeons le chauffage du diélectrique, et cependant nous parvenons à un profil de température au voisinage du diélectrique très similaire au profil de température expérimental à la surface du diélectrique.

2 Modèle numérique

Le modèle numérique repose sur un couplage à sens unique (« one-way coupling ») entre le code COPAIER, solveur plasmas froids de l'ONERA, et le code elsA, solveur CFD. Le code COPAIER [5] résout les équations de transport des espèces chargées (ions, électrons) dans l'approximation de la diffusion-dérive, couplées à l'équation pour le potentiel électrostatique :

$$\partial_t n_k + \nabla_x \cdot (n_k \mathbf{v}_k) = S_k$$
$$\nabla_x \cdot (\varepsilon \mathbf{E}) = \sum_k n_k q_k$$

où $\mathbf{v}_k = \mathbf{u} + \mu_k \mathbf{E} - D_k \nabla_x \ln n_k$.

Le solveur elsA [6] est un solveur aérodynamique, principalement dédié à l'étude des écoulements internes aux turbomachines, mais aussi appliqué aux écoulements aéronautiques externes. Il résout les équations de Navier-Stokes-Fourier :

$$\begin{aligned}\partial_t \rho + \nabla_x \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0 \\ \partial_t (\rho \mathbf{u}) + \nabla_x \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla_x p - \nabla_x \cdot \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{F}_c \\ \partial_t (\rho E) + \nabla_x \cdot (\rho H \mathbf{u} - \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{q}) &= \mathbf{F}_c \cdot \mathbf{u} + \dot{Q}_J\end{aligned}$$

où $\mathbf{F}_c = \sum_k n_k q_k \mathbf{E}$ est la force de Coulomb et $\dot{Q}_J = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} = \sum_k n_k q_k \mathbf{v}_k \cdot \mathbf{E}$ est l'effet Joule.

3 Protocole expérimental

Les expériences ont été effectuées au laboratoire LISN. On peut voir sur la figure 1 le schéma de la décharge à barrière diélectrique (DBD) [7]. Deux électrodes de cuivre de 13 mm de large et de 200 μm d'épaisseur sont collées de part et d'autre d'une plaque de PMMA de 2 mm d'épaisseur.

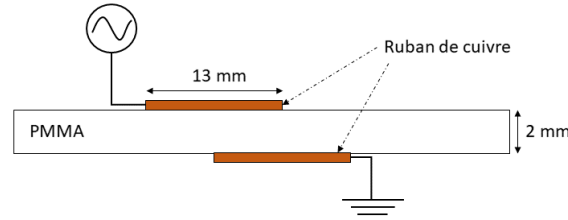


Figure 1 : Schéma de la décharge à barrière diélectrique

Le générateur électrique fournit un signal à la fréquence de 3.14kHz à l'électrode alimentée. L'amplitude du signal varie de 10 kV à 19 kV pic-à-pic. L'intensité du courant à travers la décharge est mesurée à l'aide d'une sonde à effet Hall. La tension appliquée et le courant de décharge sont visualisés au moyen d'un oscilloscope (figure (1b)).

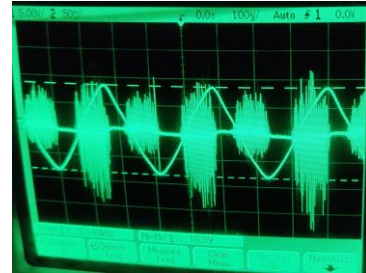


Figure 2 : (1a) Photo du montage expérimental, vue du dessus. (1b): Tension appliquée (trait continu) et courant de décharge (trait discontinu) pour une amplitude de 17 kV_{pp}

La température est mesurée à l'aide d'une caméra infrarouge FLIR avec une fréquence d'échantillonnage de 7 image par seconde. L'émissivité relative du PMMA a été fixée à $\varepsilon_r = 0,95$.

4 Résultats et discussion

Les profils de vitesse sont présentés sur la figure 3. On retrouve bien des résultats conformes aux précédentes études CFD, et en bon accord avec les mesures expérimentales disponibles (figure (2c)).

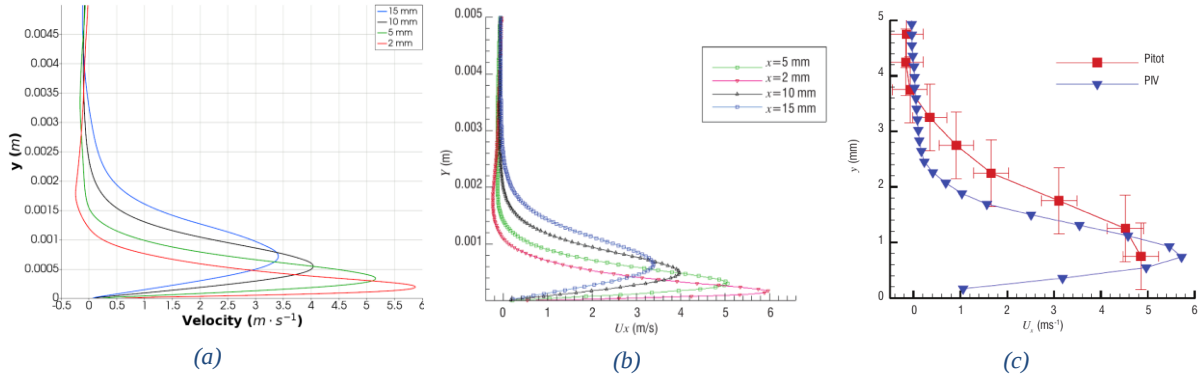


Figure 3 : comparaison du profil de vitesse obtenu avec nos simulations (a) et les calculs de la référence [5] (b) à quatre positions sur l'axe des x . Les résultats expérimentaux de S. Roy et al. sont reproduits en (c).

La figure 4 montre l'évolution temporelle de l'élévation de température mesurée à l'extrémité de l'électrode exposée, pour différentes valeurs de tension appliquées. On peut voir que la température atteint un état quasi-stationnaire au bout de quelques minutes.

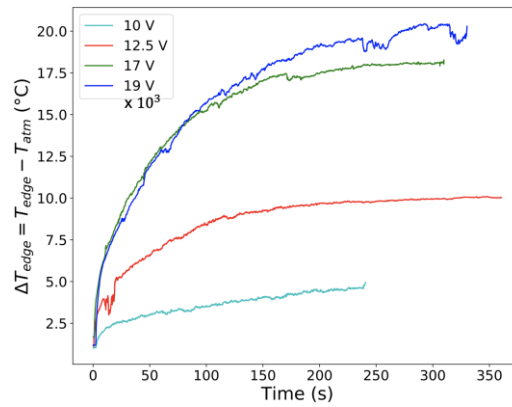


Figure 4 : Evolution temporelle de l'augmentation de température induite par la décharge à l'extrémité de l'électrode découverte.

Le profil numérique de température est comparé avec le profil expérimental à la figure 5. On voit que le profil au voisinage du diélectrique est qualitativement similaire au profil de température de surface obtenu expérimentalement. L'ordre de grandeur de delta de température est également le même. Cela est remarquable, étant donné que seul l'effet Joule dans le gaz a été pris en compte, et aucun phénomène thermique à l'intérieur du matériau n'a été modélisé. Ainsi, dans ces conditions expérimentales, l'effet Joule est responsable au moins pour une part non négligeable de l'élévation de température induite par la DBD. La comparaison ne peut être que qualitative cependant : en effet, la fréquence du générateur utilisé est limitée à quelques kHz tandis que numériquement il aurait été trop long d'effectuer des simulations à basses fréquences (< 10 kHz) dans le cadre de ce travail. Les conditions expérimentales et numériques ne sont donc pas exactement comparables.

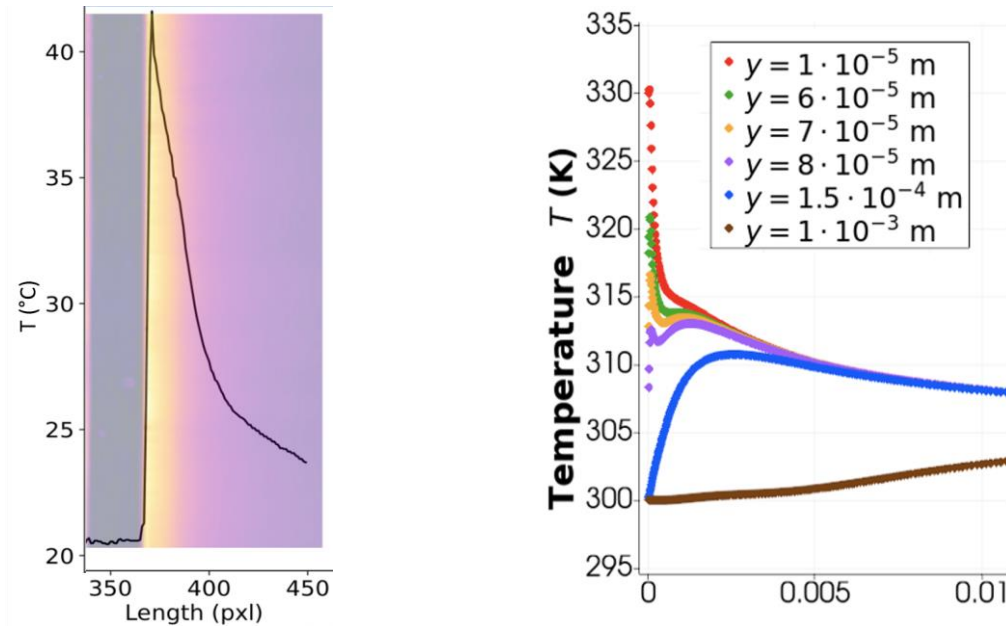


Figure 5 : (3a) Profil expérimental de température à la surface du diélectrique ($y=0$) (3b) Profil de température au voisinage du diélectrique obtenu par la simulation numérique.

5 Conclusion

La présente étude montre que l'effet Joule est responsable d'une part non négligeable des effets thermiques induits par une décharge à barrière diélectrique à pression atmosphérique. D'autres études plus quantitatives sont envisagées à l'avenir, mais les profils et les ordres de grandeur de ΔT sont d'ores-et-déjà en très bon accord entre les mesures expérimentale et numérique. Cette étude devrait également être complétée par une modélisation plus fine des processus thermiques à l'intérieur ou à la surface du diélectrique, ainsi que la prise en compte du rayonnement, afin d'affiner la compréhension des processus thermiques induits par une DBD.

Références bibliographiques

- [1] R. Jousot, D. Hong, H. Rabat, V. Boucinha, R. Weber-Rozenbaum, A. Leroy-Chesneau, "Thermal Characterization of a DBD Plasma Actuator: Dielectric Temperature Measurements using Infrared Thermography", 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAA 2010-5102 (2010).
- [2] F. Rodrigues, J. Pascoa, M. Trancossi, "Heat generation mechanisms of DBD plasma actuators", Experimental Thermal and Fluid Science, 90 55–65 (2018).
- [3] A. A. Abbasi, H. Li, X Meng, "Coupled Aerodynamic and Thermal Effects for Steady and Unsteady Plasma Actuation", AIAA JOURNAL, 58, 1, 488–495 (2020).
- [4] X Zhang, Y. Zhao, C. Yang, "Recent developments in thermal characteristics of surface dielectric barrier discharge plasma actuators driven by sinusoidal high-voltage power", Chinese Journal of Aeronautics, 36, 1, 1–21 (2023).
- [5] K. Kourtzanidis, G. Dufour, F. Rogier, "Self-consistent modeling of a surface AC dielectric barrier discharge actuator: In-depth analysis of positive and negative phases", J. Phys. D: Appl. Phys., 54, 045203 (2021).
- [6] L. Cambier, S. Heib, S. Plot, "The Onera elsA CFD software: input from research and feedback from industry", Mechanics & Industry, 14, 3, 159–174 (2013).
- [7] G. Y. Cornejo Maceda, E. Varon, F. Lusseyran, B. R. Noack, "Stabilization of a multi-frequency open cavity flow with gradient-enriched machine learning control", J. Fluid Mech., 955, A20 (2023).