

Contrôle d'un écoulement subsonique par utilisation de décharges surfaciques

Pierre Magnier^{1*}, Dunpin Hong², Jean-Michel Povesle², Annie Leroy-Chesneau¹, Jacques Hureau¹

¹Laboratoire de Mécanique et d'Energétique
8 rue Léonard de Vinci 45072 Orléans Cedex 2
²GREMI, UMR 6606 CNRS / Université d'Orléans
14 rue d'Issoudun 45072 Orléans Cedex 2
*pierre.magnier@univ-orleans.fr

Résumé :

Dans cet article, des décharges électriques ont été étudiées dans l'air ambiant, afin d'agir sur des écoulements subsoniques. Les écoulements induits par une décharge couronne continue et une Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) alternative ont été mesurés avec le système PIV. On montre ainsi la topologie de l'écoulement pour ces deux configurations, avec une vitesse maximale de 3,75 m/s. Ces décharges ont été utilisées sur des profils d'ailes dans des souffleries subsoniques. Des écoulements totalement décollés ont été ré-attachés par la décharge couronne pour des nombres des Reynolds allant jusqu'à 267 000 et 15°. Un actionneur constitué d'une succession de DBD a permis de retarder la séparation de l'écoulement de 8% pour un nombre de Reynolds de 800 000.

Abstract :

In this paper, electric discharges were studied in atmospheric air in order to modify subsonic airflows. The flows induced by a DC surface corona discharge and an AC Dielectric Barrier Discharge were measured with the PIV system. They show the flow topology for these two configurations, with a maximum of velocity of 3.5 m/s. These discharges were used on airfoils in subsonic wind tunnels. Fully separated flows were re-attached by a DC corona discharge for Reynolds numbers up to 267 000 and 15°. The flow separation was delayed of 8% by a multiple DBD actuator for a Reynolds number of 800 000.

Mots-clefs : Contrôle d'écoulement, plasma, électroaérodynamique

1 Introduction

Les décharges haute tension, établies entre deux électrodes métalliques, ionisent le gaz alentour neutre. Des ions et des électrons sont créés par collisions dans le plasma, et la migration des ions dans l'espace inter-électrode induit le mouvement des molécules neutres par transfert de moment. Cet écoulement induit est généralement appelé « vent ionique » (Robinson (1961)).

L'ajout d'énergie ou l'injection de gaz sont utilisés depuis des décennies pour modifier des écoulements subsoniques, le contrôle d'écoulement étant d'une très grande importance pour les groupes industriels. Les actionneurs électroaérodynamiques (EAD) sont étudiés dans ce but depuis le milieu des années 90 en utilisant l'écoulement induit par le plasma. L'énergie électrique est directement convertie en énergie mécanique, sans éléments mécaniques mobiles additionnels. La capacité de contrôler un écoulement avec les décharges électriques a été

montrée par de nombreuses expériences, notamment sur les cylindres (Artana *et al.* (2001)) ou encore les profils d'aile. Deux sortes d'actionneurs ont été développés pour cette application : les décharges couronnes continues (Léger *et al.* (2001), Moreau *et al.* (2006)) et les décharges à barrière diélectrique alternatives (Roth *et al.* (1998), Corke *et al.* (2004)).

Le travail présenté dans ce papier est l'étude de décharges électriques : une décharge couronne surfacique continue et une décharge à barrière diélectrique sinusoïdale. Dans un premier temps, leur principe et leur configuration géométrique seront présentés. Ensuite l'écoulement induit par chacune de ces décharges sera mesuré. Enfin ces deux actionneurs seront positionnés sur des profils d'aile en soufflerie afin de caractériser leur capacité d'agir sur un écoulement.

2 Action d'une décharge couronne surfacique

2.1. Montage expérimental

Dans un premier temps, nous avons développé un actionneur EAD consistant en une décharge couronne surfacique continue, établie entre deux bandes de cuivre (170 mm de long, 25 mm de large, 35 μm d'épaisseur) placées de chaque côté du bord d'attaque circulaire d'une plaque plane en PVC (200 mm de long, 250 mm de large, 15 mm d'épaisseur), comme cela est indiqué en Fig 1.

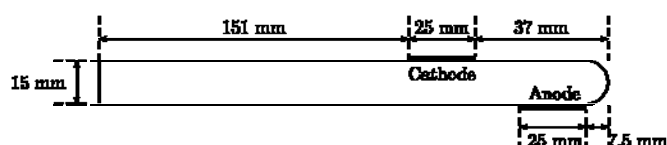


FIG. 1 – Configuration de la décharge couronne.

L'anode est reliée à une alimentation haute tension positive et continue (SPELLMAN SL300, 0-60 kV, 5mA), la cathode est reliée à la masse.

2.2. Mesures de l'écoulement induit

En appliquant une différence de potentiel de 40 kV entre les deux électrodes, un plasma s'établit. Des ions positifs sont alors créés et se déplacent dans l'espace inter-électrode, repoussés par l'anode positive vers la cathode. Ce mouvement contourne le bord d'attaque à la surface de la plaque et entraîne les molécules neutres du gaz. La plaque a ainsi été placée dans un environnement clos sans écoulement extérieur, le seul écoulement étant celui induit par la décharge électrique. Les mesures des champs de vitesse avec le système Particle Image Velocimetry (PIV) montrent la topologie de l'écoulement en Fig 2 pour différents courants de décharge.

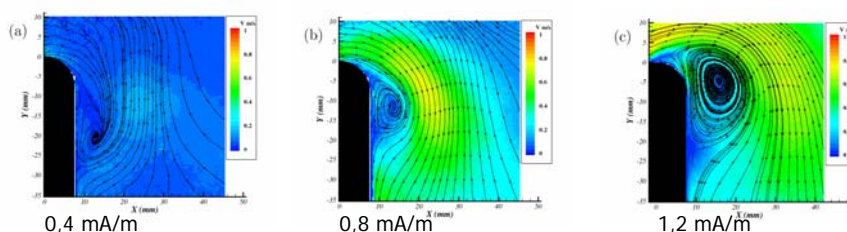


FIG. 2 – Champ de vitesse moyen de l'écoulement induit par une décharge couronne de 40 kV, et (a) 0,4 mA/m, (b) 0,8 mA/m et (c) 1,2 mA/m.

L'écoulement induit présente ainsi (1) une séparation au niveau de l'anode (avec un maximum de vitesse, d'environ 1 m/s), (2) une zone de recirculation sur le dessus de la plaque et (3) un ré-attachement et une accélération de l'écoulement (environ 0,6 m/s). Ensuite l'écoulement est parallèle à la surface de la plaque après la cathode.

L'étude paramétrique sur le courant de décharge montre que plus le courant est élevé, plus la zone de recirculation est proche du bord d'attaque et plus la vitesse est élevée. En effet, plus de particules sont ionisées par un champ électrique plus intense, donc le mouvement des ions entraîne plus de molécules neutres. L'énergie mécanique augmente avec la courant de décharge (jusqu'au régime d'arcs).

2.3. Actionneur sur le bord d'attaque d'un profil NACA 0015

Les électrodes sont placées de la même façon sur un profil NACA 0015 (300 mm d'envergure, 20 mm de corde, 30 mm d'épaisseur maximale), de chaque côté du bord d'attaque. Des essais ont été menés avec le système PIV dans une soufflerie subsonique (0-50 m/s, section d'essai carrée de 500 mm x 500 mm) pour différentes incidences (12,5°-17,5°) et vitesses d'écoulement (5-25 m/s).

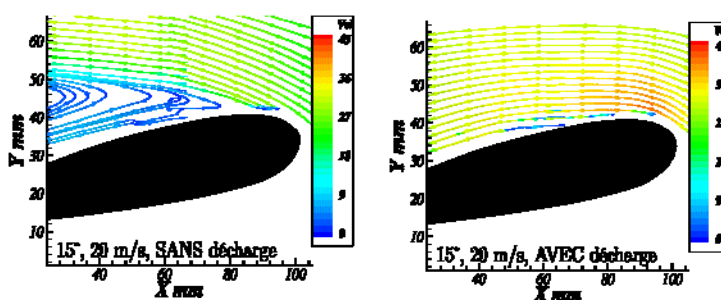


FIG. 3 – Champs de vitesse sans et avec décharge couronne établie au bord d'attaque d'un profil NACA 0015 (40 kV, 0.8 mA/m, 20 m/s, 15°).

L'actionneur EAD a permis de réduire la séparation de l'écoulement en bord d'attaque du profil, et a même empêché le décollement dans certaines configurations, par exemple à 15° et 20 m/s (Fig. 3). L'efficacité de l'actionneur dépend du régime d'écoulement autour du profil : des décollements légers de bord d'attaque ont été complètement ré-attachés par action de la décharge (pour 15° pour des nombres de Reynolds compris entre 67 000 et 267 000), mais les forts décollements n'ont été que réduits (pour 17,5° et Re compris entre 67 000 et 300 000). Ces valeurs de nombre de Reynolds sont supérieures à celles utilisées par Léger *et al.* (2001) avec également une décharge couronne continue. Cependant ces valeurs sont inférieures à celles étudiées avec des décharges pulsées par Corke *et al.* (2003) (307 000) ou encore Opaitis *et al.* (2005) (450 000). La comparaison de nos résultats avec la littérature montre que les décharges continues sont moins efficaces que les décharges alternatives et pulsées.

3 Développement d'une décharge à barrière diélectrique alternative

3.1. Montage expérimental

Malgré une action nette sur les écoulements, la décharge couronne continue a une utilisation limitée : notre configuration ne peut être utilisée qu'aux extrémités du profil, la décharge est fortement dépendante des conditions climatiques, des arcs électriques peuvent

endommager le matériel. De plus les perspectives d'utilisation semblent être restreintes par rapport à d'autres décharges. Ainsi nous avons développé un actionneur constitué d'une succession de Décharges à Barrière Diélectrique (DBD) sinusoïdales, représenté en Fig 4.

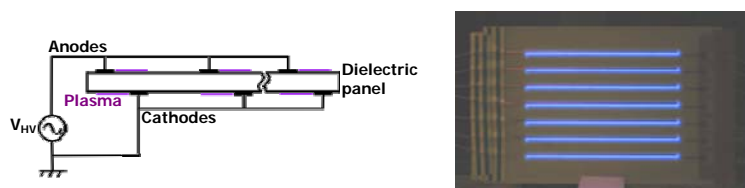


FIG. 4 – Configuration géométrique des électrodes d'une décharge à barrière diélectrique

L'actionneur est un panneau en époxy (160 mm de large, 100 mm de long et 0,8 mm d'épaisseur) sur lequel sont gravées des électrodes en cuivre (100 mm de large, 1 mm de long, 35 μm d'épaisseur). Elles sont placées de part et d'autre du support diélectrique, avec un espacement de 1 mm. Chaque couple d'électrodes permet d'établir un plasma, et chaque couple est séparé de 7 mm.

Les anodes sont reliées à une alimentation haute tension sinusoïdale (essais compris entre 0 et 22 kV, 0,3 et 6 kHz), les cathodes à la masse.

3.2. Mesures de l'écoulement induit

Sans écoulement externe, la vitesse de l'écoulement induit par l'actionneur a été mesurée par une sonde de pression en verre pour différentes tensions et fréquences de signal appliqué aux anodes, en une position fixe (hauteur de 0,4 mm au niveau de la dernière électrode). Ces courbes sont représentées en Fig 5. La vitesse augmente avec la tension et avec la fréquence, jusqu'à 3,75 m/s pour 20 kV d'amplitude et 2 kHz.

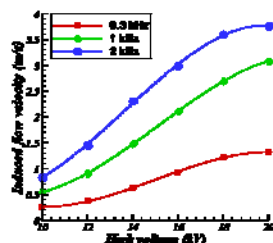


FIG. 5 – Evolution de la vitesse de l'écoulement induit en fonction de la tension et de la fréquence du signal appliqué aux anodes.

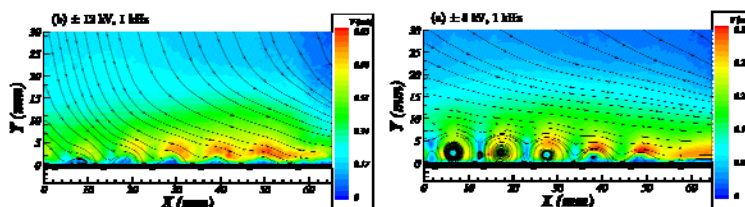


FIG. 6 – Champs de vitesse de l'écoulement induit par la décharge à barrière diélectrique (± 12 kV et ± 5 kV à 1 kHz).

Les mesures PIV en Fig 6 montrent que l'écoulement induit est accéléré à chaque passage d'un couple d'électrodes, car chaque DBD induit un écoulement qui s'ajoute à celui induit par la DBD précédente (Magnier *et al.* (2006)). Ces champs de vitesse montrent également la présence de tourbillons dans l'espace inter-électrodes dont la taille diminue après chaque couple

d'électrodes. De plus, pour une même fréquence de 1 kHz, l'écoulement est plus rapide et la taille des tourbillons est fortement réduite pour la plus haute tension.

3.3. Effet sur des profils en soufflerie

Cet actionneur avec de multiples DBD établies ensemble a été monté au bord d'attaque d'un profil éolien (Fig 7). Le profil a une envergure de 1,10 m et une corde de 1m. L'actionneur, placé à 3% de corde, mesure 90 cm de long pour 10 cm de large, avec 10 couples d'électrodes.



FIG. 7 – Photographies du profil avec actionneur.

Les mesures PIV, réalisées dans la soufflerie Lucien Malavard du Laboratoire de Mécanique et d'Energétique, ont montré que la séparation a lieu à 4% de corde sans décharge, et à 12% de corde avec action de l'actionneur (12 kV d'amplitude, 1 kHz), pour une vitesse de 12 m/s ($Re = 800\,000$) et une incidence de 13° . A notre connaissance, cette valeur de nombre de Reynolds est la plus élevée à laquelle un actionneur plasma a pu agir sur un écoulement.

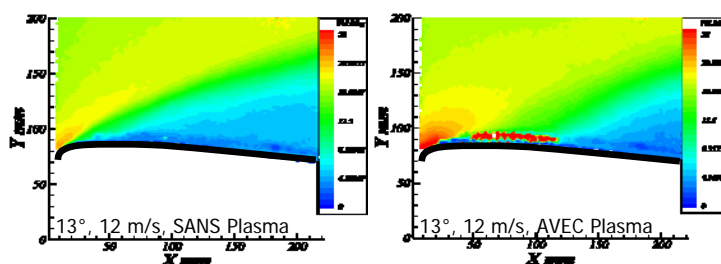


FIG. 8 – Champs de vitesse de l'écoulement sans et avec plasma, pour une vitesse de 12 m/s et une incidence de 13° .

4 Conclusions

Ce papier décrit l'utilisation de deux configurations d'actionneurs électroaérodynamiques pour le contrôle d'écoulement subsonique. Dans un premier temps, une décharge couronne surfacique a été développée, au bord d'attaque d'un profil d'aile, puis dans un deuxième temps un actionneur à multiples décharges à barrières diélectriques a été testé.

Les mesures avec le système PIV et une sonde de pression en verre ont permis de caractériser l'écoulement induit dans ces deux configurations par les collisions des ions générés dans le plasma avec les molécules neutres du gaz alentour. La décharge couronne en bord d'attaque induit un écoulement présentant une zone de recirculation, de vitesse maximale 1 m/s. L'actionneur DBD induit un écoulement avec des tourbillons, de vitesse maximale 3,75 m/s, selon la tension et la fréquence appliquées.

Ces actionneurs plasma ont été montés sur des profils d'ailes en souffleries subsoniques. Ces essais ont montré la capacité de ces décharges électriques d'agir sur des écoulements séparés. La décharge couronne en bord d'attaque a ré-attaché un écoulement naturellement séparé en bord d'attaque, jusqu'à un nombre de Reynolds de 267 000. L'actionneur DBD a permis de retarder la séparation de l'écoulement pour un nombre de Reynolds de 800 000.

Cette étude sera suivie d'essais avec une balance aérodynamique (6 composantes) et le développement d'actionneurs plus efficaces (moins de puissance consommée, action plus intense et plus localisée).

Références

- Artana, G., DiPrimio, G., Desimone, G., Moreau, E., Touchard, G. 2001 Electrohydrodynamic actuators on a subsonic air flow around a circular cylinder, *AIAA Paper*, 2001--3056.
- Corke, T.C., He, C., Patel, M.P. 2004 Plasma flaps and slats: an application of weakly-ionized plasma actuators, *AIAA Paper*, 2004-2127.
- Leger, L., Moreau, E., Artana, G., Touchard, G. 2001 Influence of a DC corona discharge on the airflow along an inclined flat plate, *J Electrostat.*, **51-52**, 300-306.
- Magnier, P., Dong, B., Hong, D., Bauchire, J.M., Hureau, J. 2006 Dielectric Barrier Discharge for airflow control, Proceedings of International Symposium on Electrohydrodynamics, Buenos Aires (Argentina), December 4-6, 2006, 63-66.
- Moreau, E., Léger, L., Touchard G. 2006 Effect of a DC surface corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25 m/s, *J. Electrostat.*, **64** (3-4), 215-225.
- Opaitis, D.F., Roupasov, D.V., Starikovskaia, A.Y., Zavalov, I.N., Saddoughi, S.G. 2005 Plasma control of boundary layer using low-temperature non equilibrium plasma of gas discharge, *AIAA Paper*, 2005-1180.
- Robinson, M. 1961 Movement of air in the electric wind of the corona discharge, *AIEE Transactions*, **80**, 143-150.
- Roth, J.R., Sherman, D.M., Wilkinson S.P. 1998 Boundary layer flow control with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge surface plasma, *AIAA Paper*, 98-0328.