

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Etude du vent électrique et de la vitesse particulaire acoustique au sein d'une décharge électrique de type pointe-grille

Philippe Béquin, James Blondeau, Thibault Le Magueresse, Alain Brunet

LAUM, CNRS, Université du Maine, F-72085 Le Mans (France)

Les décharges électriques de type pointe - grille ayant une distance inter électrodes de quelques millimètres peuvent être utilisées comme actionneurs acoustiques. A cette fin, il est utile de comprendre et de modéliser les divers phénomènes électriques, mécaniques et acoustiques associés à leur fonctionnement. Dans cette présentation, seules la vitesse du vent électrique (ou ionique) et la vitesse particulaire acoustique sont étudiées ; cette dernière est obtenue par une modulation sinusoïdale du courant électrique d'une décharge électrique créée entre une pointe et une grille - une haute tension négative étant appliquée sur la pointe. Ainsi pour différentes configurations géométriques (distances inter- électrodes) et électriques (courants électriques) de décharges, ces vitesses sont mesurées en divers points de l'espace inter électrodes au sein du gaz ionisé en faisant usage d'un banc de mesure d'Anémométrie Laser Doppler et de programmes de traitement du signal adaptés. Les valeurs ainsi obtenues (profils de vitesses) sont comparées à celles déduites de modèles simples construits à l'aide de considérations issues de la physique des gaz ionisés, de la mécanique des fluides et de l'acoustique.

1 Introduction

Les haut-parleurs à gaz ionisé sont des actionneurs électro-acoustiques qui assurent la conversion d'un signal électrique en signal acoustique à l'aide d'un volume d'air ionisé. Ce gaz est créé au moyen d'une décharge électrique de type couronne négative [1, 2] obtenue par application sur la pointe d'un potentiel négatif élevé (figure 1). Sous l'influence du champ électrique des électrons sont produits près de la pointe (processus d'ionisation) et ils sont ensuite en partie recombinaison aux particules neutres pour former des ions négatifs (processus d'attachement). Ces particules chargées s'écoulent de la pointe vers la grille et elles interagissent avec les particules neutres du gaz lors des nombreuses collisions. C'est ainsi que le gaz ionisé possède, près de la pointe, un mouvement désordonné - une agitation thermique - et au-delà un mouvement essentiellement ordonné - le vent électrique ou ionique. En conséquence, dans l'espace inter électrodes les phénomènes d'interaction entre particules conduisent principalement soit à un transfert d'énergie thermique (source de chaleur) des particules chargées vers les particules neutres du gaz soit à un transfert de quantité de mouvement (source de force).

La modulation aux fréquences acoustiques du courant électrique associé à cet écoulement de particules chargées entraîne une modulation des interactions entre les diverses particules du gaz ionisé donnant ainsi naissance à une perturbation acoustique se propageant de proche en proche à l'air environnant [3, 4].

La première partie de ce papier est consacrée à l'étude de la vitesse du vent électrique mesurée par Anémométrie Laser Doppler au sein d'une décharge électrique de type pointe-grille constituant l'actionneur acoustique. La seconde partie est dédiée à la mesure de la vitesse particulaire acoustique obtenue par la modulation du courant électrique de la décharge.

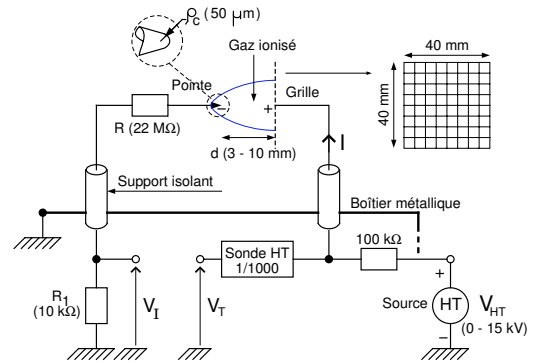


FIG. 1: Représentation schématique de l'actionneur pointe-grille fixé sur son boîtier de mesure. V_{HT} , I , R , d et ρ_c sont respectivement la haute tension appliquée, le courant électrique, une résistance, la distance inter électrodes et le rayon de courbure de la pointe. V_T et V_I sont les tensions images de la haute tension appliquée aux bornes du système pointe-grille et du courant I porté par les particules chargées.

2 Mesures électriques

L'actionneur électro-acoustique, utilisé dans cette étude (figure 1), est constitué

- d'une résistance électrique $R = 22 M\Omega$ associée à une aiguille en acier avec une pointe dont le rayon de courbure ρ_c est estimé approximativement à $50 \mu m$;
- d'une grille placée à une distance d de la pointe : cette grille d'une surface totale $S \simeq 40 \times 40 mm^2$ possède un maillage $(1,2 \times 1,2 mm^2)$ de fils de diamètre $0,5 mm$.

Pour la mesure des caractéristiques électriques de la décharge, l'actionneur pointe-grille est alimenté par une source de hautes tensions nécessaire à la génération du gaz ionisé et il est fixé rigidement sur un boîtier métallique

protégeant un système électronique de mesure. Ce système délivre une tension V_T - via une sonde d'atténuation - proportionnelle à la haute tension appliquée et une tension V_I - mesurée aux bornes d'une résistance R_1 - image du courant I qui s'écoule à travers la décharge [5].

La mesure de ces deux tensions permet d'accéder, après traitements, à des courbes courant-tension (figure 2) qui caractérisent le comportement de la décharge électrique dans son environnement : l'air aux conditions atmosphériques ambiantes dans le cas de cette étude.

Une relation, déduite des lois de l'électrostatique, exprime la dépendance quadratique du courant I avec la haute tension V_{HT} [2] sous la forme :

$$I = C \cdot \mu_i \cdot V_{HT} (V_{HT} - V_s) \quad (1)$$

Où C est un facteur dépendant uniquement de la configuration géométrique de l'actionneur et où $\mu_i \simeq 1,8 \cdot 10^{-4} m^2 V^{-1} s^{-1}$ et V_s sont respectivement la mobilité des ions négatifs et la tension de seuil.

Les grandeurs C et V_s peuvent être déduites des paramètres d'une droite de régression linéaires associées à la relation $I/V_{HT} = C \cdot \mu_i (V_{HT} - V_s)$.

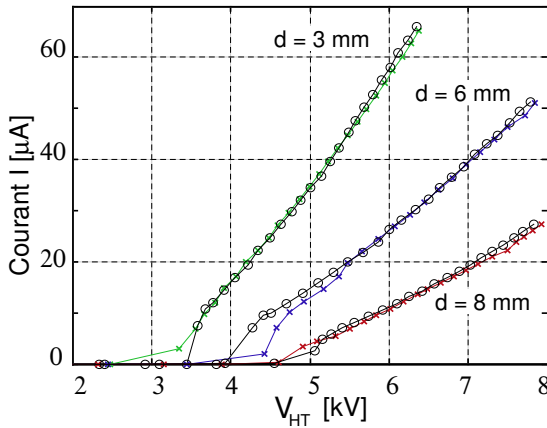


FIG. 2: Caractéristiques courant - tension mesurées pour différentes distances inter électrodes d . (○) avec et (×) sans fumée.

3 Vent électrique

Cette partie est consacrée à la mesure des profils de vitesse d'écoulement du gaz ionisé dans l'espace inter électrodes à l'aide d'une sonde d'Anémométrie Laser Doppler (ALD) et cela pour différentes distances inter électrodes d et pour différents courants électriques I de décharges.

3.1 Sonde de mesure et ensemencement

Pour la mesure des profils de vitesses, il est fait usage de l'Anémométrie Laser Doppler (figure 3), une méthode optique qui est basée sur l'effet Doppler ; elle utilise de fines particules comme traceurs traversant un réseau de franges créés par deux faisceaux issus d'un même laser (le volume de

mesure est de quelques millimètres cube). Ces particules diffractent une partie de la lumière qui est captée par un photo-détecteur ; ce dernier fournit un signal modulé à la fréquence Doppler fonction de la vitesse de la particule. Les signaux issus de l'analyseur dédié (Burst Spectrum Analyser - BSA) font l'objet d'un traitement adapté afin d'obtenir, in fine, une valeur de vitesse représentative de l'ensemble des vitesses des particules d'ensemencement utiles à la mesure. La direction de la vitesse étant perpendiculaire aux franges du volume de mesure (intersection des faisceaux laser). La sonde ALD (FlowLite 1D Low Power - Dantec Dynamics) est fixée sur un système de déplacement trois axes permettant ainsi de déplacer ce volume de mesure dans tout l'espace inter électrodes.

Le gaz ionisé est ensemencé à l'aide de particules provenant d'une fumée de bois de hêtre, cette dernière présente la particularité de peu perturber le comportement électrique de la décharge comme le montre les caractéristiques courant-tension mesurées avec et sans fumée dans l'espace inter électrodes (figure 2). Ce choix de fumée de bois de hêtre, comparée à la fumée constituée de particules d'eau et d'alcool utilisée auparavant (voir la figure 4 de [6]), réduit le caractère intrusif du moyen de mesure dans le fonctionnement de la décharge électrique.

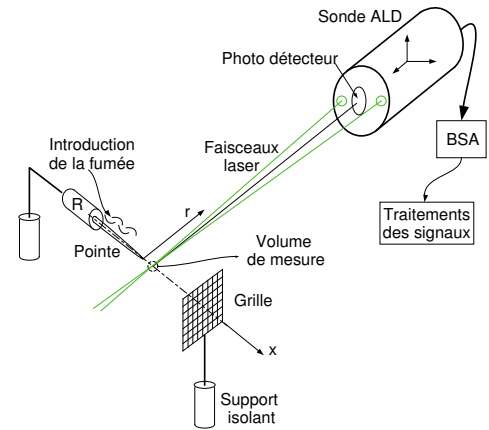


FIG. 3: Représentation schématique du montage associé à la mesure des profils de vitesses, avec l'actionneur électro-acoustique, La sonde ALD (FlowLite 1D Low Power - Dantec Dynamics), l'analyseur de signaux (Burst Spectrum Analyser - BSA). La fumée est introduite près de la pointe.

3.2 Modèle et mesures de la vitesse sur l'axe de l'actionneur

3.2.1 Modèle

La particule de fumée est supposée arriver dans l'espace inter électrodes près de la pointe avec une vitesse nulle. Cette particule est d'une part percutée par les particules chargées qui s'écoulent de la pointe vers la grille dans un champ électrique décroissant, et d'autre part freinée (frottement) par les molécules de l'air. Ainsi l'équation de la dynamique associée à cette particule s'écrit

$$m_f \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} = F_f + F_e \quad (2)$$

dans laquelle m_f représente la masse de la particule de fumée, F_f est la force de frottement proportionnelle à la vi-

tesse U de cette particule (formule de Stokes [7]). F_e est la force résultante des collisions avec les particules chargées ; c'est une force d'entraînement qui est proportionnelle à la vitesse des particules chargées dans le champ électrique dont l'évolution spatiale est considérée en première approximation linéairement décroissante. Finalement l'évolution de la vitesse de la particule de fumée U sur l'axe x de la décharge entre la pointe et la grille (figure 3) peut être modélisée par l'équation suivante

$$\frac{\partial U(x,t)}{\partial t} + \frac{U(x,t)}{\tau} = -Ax + B \quad , \quad (3)$$

avec τ , A et B des paramètres à déterminer.

Sachant que $U = \frac{dx}{dt}$ et que la condition initiale sur la pointe est $U(x=0, t=0) = 0$, la solution de l'équation différentielle (3) peut s'écrire sous la forme paramétrique [8]

$$x(t) = \frac{B}{A} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \frac{\sin(zt + \varphi)}{\sin \varphi} \right]$$

$$U(t) = \frac{B}{\Delta} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin zt$$

avec $\tan \varphi = 2\tau z = \sqrt{4A\tau^2 - 1}$. (4)

3.2.2 Mesures de la vitesse sur l'axe de l'actionneur

La figure 4 montre les vitesses mesurées sur l'axe de la décharge électrique de distance inter électrodes $d = 9\text{ mm}$ pour différents courant I ainsi que les courbes issues du modèle (eq.4) obtenues en ajustant les grandeurs B/A et τ ; leurs valeurs sont regroupées dans la table 1.

Près de la pointe, la vitesse augmente pour atteindre une valeur maximale en x_M/d et ensuite elle décroît linéairement avec la distance x . Cette chute de vitesse U de la particule de fumée est la conséquence d'une prédominance croissante de la force de frottement de l'air (pertes) sur la force liée à l'action des particules chargées évoluant dans un champ électrique de plus en plus faible (gain). L'analyse du modèle montre que cette décroissance possède une pente approximativement égale à $-\frac{1}{2\tau}$ avec $\tau = \frac{m_f}{6\pi\eta R_f}$ où m_f et R_f sont respectivement la masse et le rayon d'une particule de fumée "moyenne" représentative de l'ensemble des particules utiles à la détermination des vitesses ; η étant la viscosité dynamique du gaz ionisé.

Quel que soit le courant électrique I appliqué, les pentes des courbes sont observées identiques sur la figure 4, ceci tend à montrer que les caractéristiques des particules de fumée ainsi que la viscosité du gaz ionisé évoluent peu. Cette figure 4 montre aussi que la vitesse maximale U_M (voir la table 1) atteinte dans l'espace inter électrode augmente avec le courant I et que sa position x_M/d (associée à B/A) se déplace vers la grille.

Pour des distances inter électrodes plus faibles $d = 6$ et 3 mm (figures 5 et 6), l'action des particules chargées sur les particules de fumée domine les effets dus aux frottements qui ne peuvent s'exprimer pleinement sur ces courtes distances.

Par ailleurs, le modèle du vent électrique développé initialement par Robinson [9] donne la vitesse U proportionnelle à $\sqrt{I}$, une évolution qui est globalement retrouvée dans

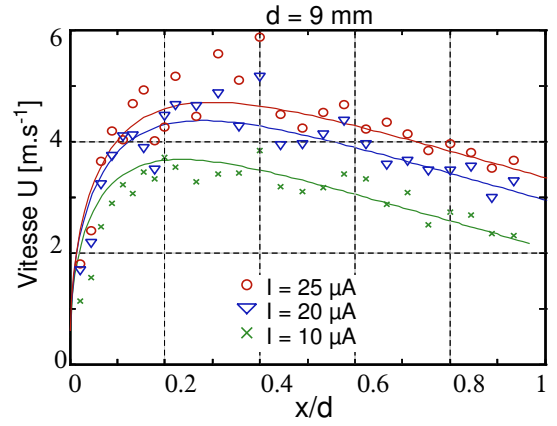


FIG. 4: Vitesses mesurées sur l'axe d'un système pointe-grille de distance inter électrodes $d = 9\text{ mm}$ pour trois courants électriques I ($\circ$, ∇ , $\times$). Courbes de vitesses déduites des équations (4) (—).

d [mm]	I [μA]	V_{HT} [kV]	τ [s]	B/A [m] $\times 10^{-3}$	x_M/d [.]	U_M [m.s ⁻¹]
9	10	5,9	0,25	16,8	0,23	3,8
	20	7,1	0,25	20	0,28	4,4
	25	7,6	0,25	21,5	0,3	4,7
6	20	5,6	0,25	21,5	0,45	4,7
	30	6,4	0,25	25,5	0,53	5,6
	45	7,4	0,25	29	0,61	6,3
3	20	4,2	0,25	22	0,92	4,8
	30	4,8	0,25	26	1,09	5,7
	45	5,5	0,25	29	1,2	6,3

TAB. 1: Données associées aux courbes des figures 4, 5 et 6 issues du modèle (éq.4).

cette étude (voir la table 1).

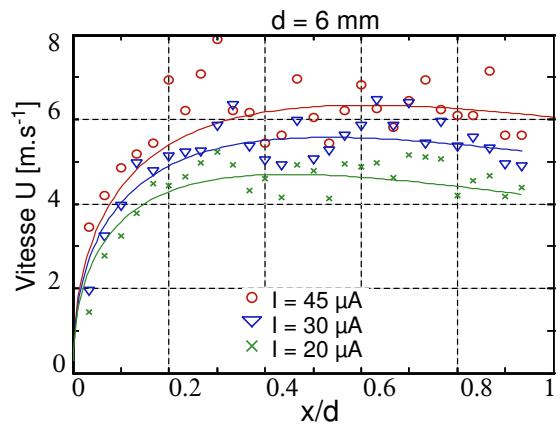


FIG. 5: Vitesses U mesurées sur l'axe d'un système pointe-grille de distance inter électrodes $d = 6\text{ mm}$ pour trois courants électriques I ($\circ$, ∇ , $\times$). Courbes de vitesses déduites des équations (4) (—).

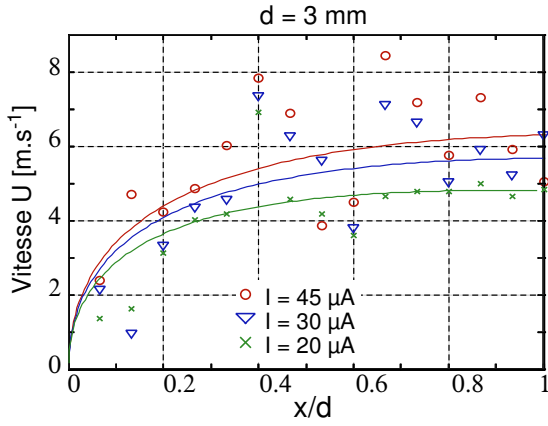


FIG. 6: Vitesses U mesurées sur l'axe d'un système pointe-grille de distance inter électrodes $d = 3 \text{ mm}$ pour trois courants électriques I ($\circ$, ∇ , $\times$). Courbes de vitesses déduites des équations (4) (—).

3.3 Mesures des profils de vitesse

Avec la sonde ALD des profils de vitesse sont obtenus en déplaçant le volume de mesure suivant r à une position x donnée (figure 3). La décharge présentant une symétrie de révolution axisymétrique seuls des "demi profils" ($r \geq 0$) sont mesurés dans les sections droites de la décharge. De plus, seule la décharge électrique de distance inter électrodes $d = 3 \text{ mm}$ a fait l'objet d'une étude expérimentale.

Les figures 7, 8 et 9 montrent que le maximum de la vitesse n'est pas situé sur l'axe ($r = 0$) de la décharge pointe-grille mais à une distance approximative $r \simeq 0,5 \text{ mm}$. En régime établi, un écoulement d'air se crée autour de la pointe et pour des vitesses suffisantes il donnent naissance à des tourbillons. La pointe est donc un obstacle qui se comporte vis-à-vis de l'écoulement de fumée comme un puits de quantité de mouvement [10] (figure 7). A distance suffisante de cette pointe, la diffusion moléculaire et la présence de l'écoulement des particules chargées tendent progressivement à réduire ce déficit de vitesse sur l'axe (figures 8 et 9).

Pour le plus faible courant électrique de décharge $I = 20 \mu\text{A}$, les profils de vitesses associés (pour les trois positions x) présentent une forme plus élargie ainsi qu'une vitesse maximale la plus éloignée de l'axe ($r = 0$) comparés aux profils obtenus pour des courants I plus élevés et pour lesquels une forme identique est observée quel que soit le courant électrique. Cette évolution du profil de vitesse vers une forme constante au-delà d'une certaine valeur du courant électrique $I \geq 20 \mu\text{A}$ (pour $d = 3 \text{ mm}$) pourrait être attribué à l'apparition de tourbillons autour de la pointe.

4 Vitesse particulaire acoustique

Cette dernière partie est consacrée à la mesure de la vitesse particulaire acoustique dans le volume de gaz ionisé d'une décharge électrique de distance inter électrodes $d = 6 \text{ mm}$ pour une valeur unique de courant électrique $I = 33 \mu\text{A}$.

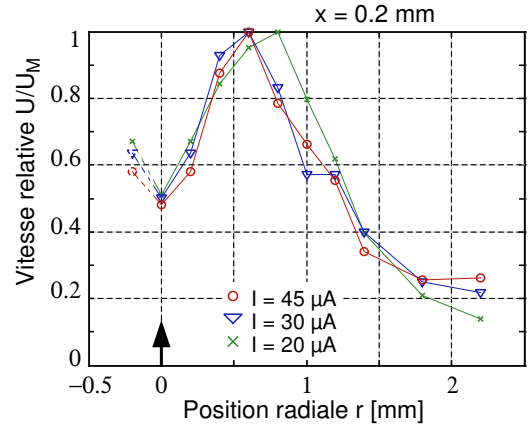


FIG. 7: Profils de vitesses relatives $U(r)/U_M$ mesurés sur un axe perpendiculaire à l'axe du système pointe-grille ($d = 3 \text{ mm}$) à une distance $x = 0,2 \text{ mm}$ de la pointe pour trois courants électriques I ; avec $U_M(\times) = 4,9 \text{ m.s}^{-1}$, $U_M(\nabla) = 5,9 \text{ m.s}^{-1}$ et $U_M(\circ) = 7,3 \text{ m.s}^{-1}$.

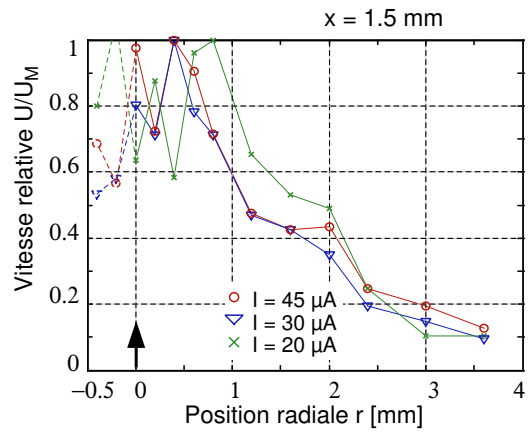


FIG. 8: Profils de vitesses relatives $U(r)/U_M$ mesurés sur un axe perpendiculaire à l'axe du système pointe-grille ($d = 3 \text{ mm}$) à une distance $x = 1,5 \text{ mm}$ de la pointe pour trois courants électriques I ; avec $U_M(\times) = 4,6 \text{ m.s}^{-1}$, $U_M(\nabla) = 7 \text{ m.s}^{-1}$ et $U_M(\circ) = 7,5 \text{ m.s}^{-1}$.

4.1 Montage expérimental

Une tension électrique, possédant une composante continue V et une composante modulée $\tilde{v}$ à la fréquence acoustique f choisie, est appliquée à l'entrée d'un amplificateur de transconductance (figure 10). Ce dernier délivre un courant électrique continue I de quelques dizaines de microampères nécessaire à la génération du gaz ionisé et du vent électrique U et un courant modulé $\tilde{i}$ à l'origine de la vitesse particulaire acoustique $\tilde{u}$ [11].

La mesure des vitesses est réalisée à l'aide de la même sonde d'Anémométrie Laser Doppler (ALD) mais en faisant usage de programmes spécifiques de traitement du signal adaptés à l'estimation de la composante continue de la vitesse U et de sa composante variable $\tilde{u}$ [12]. La figure 11 donne un exemple de représentation temporelle des vitesses mesurées; l'ensemble des données ont été ramenées sur une période acoustique unique.

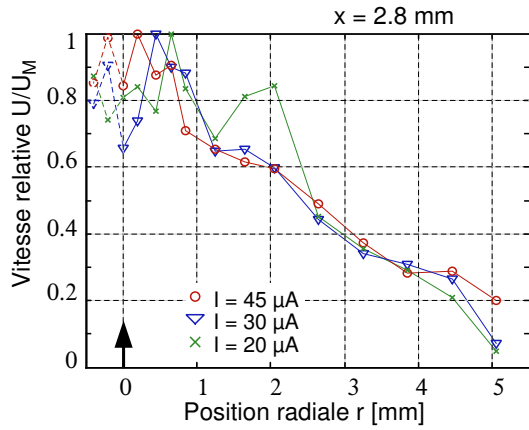


FIG. 9: Profils de vitesses relatives $U(r)/U_M$ mesurés sur un axe perpendiculaire à l'axe du système pointe-grille ($d = 3 \text{ mm}$) à une distance $x = 2,8 \text{ mm}$ de la pointe pour trois courants électriques I ; avec $U_M(\times) = 4,6 \text{ m.s}^{-1}$, $U_M(\nabla) = 5,8 \text{ m.s}^{-1}$ et $U_M(\circ) = 6,1 \text{ m.s}^{-1}$.

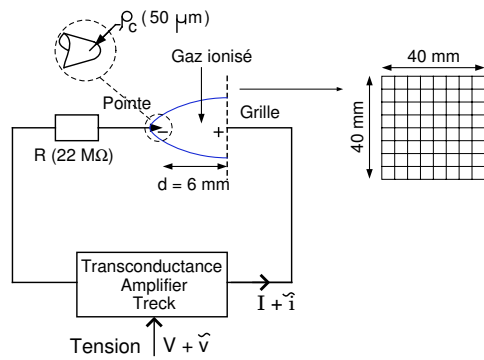


FIG. 10: Représentation schématique de l'actionneur pointe-grille associé à un amplificateur délivrant un courant électrique modulé $I + \tilde{i}$ en fonction de son entrée $V + \tilde{V}$.

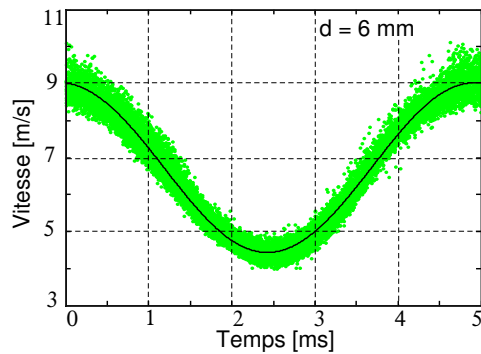


FIG. 11: Exemple de vitesses mesurées par ALD (●) - les données sont ramenées sur une période acoustique ($f = 200 \text{ Hz}$). Tracé de l'estimation finale de la vitesse (—) déduite à l'aide de programmes spécifiques de traitement du signal [12]. Valeurs estimées : $U \simeq 6,2 \text{ m.s}^{-1}$ et $u \simeq 2,3 \text{ m.s}^{-1}$; $I \simeq 33,5 \mu\text{A}$ ($V_{HT} \simeq 7 \text{ kV}$) et $\tilde{i} \simeq 10 \mu\text{A}$.

4.2 Vitesses particulières sur l'axe de l'actionneur

La figure 12 représente, en fonction de la fréquence, la vitesse particulière mesurée en deux positions x (figure 3) sur

l'axe d'une décharge électrique de distance inter électrodes $d = 6 \text{ mm}$, alimentée par un courant continu $I \simeq 33,5 \mu\text{A}$ ($V_{HT} \simeq 7 \text{ kV}$) et un courant modulé $\tilde{i} \simeq 10 \mu\text{A}$.

Ainsi pour un courant d'excitation de la forme $\tilde{i} = i_0 \sin \omega t$

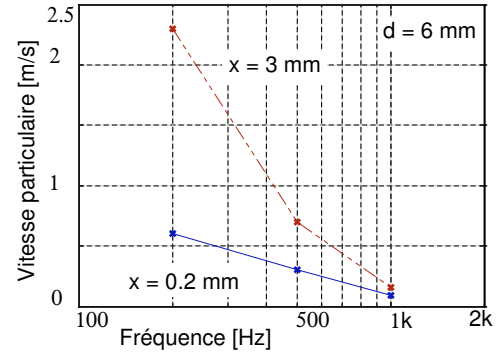


FIG. 12: Vitesses particulières $\tilde{u}$ en fonction de la fréquence mesurées sur l'axe d'un système pointe-grille de distance inter électrodes $d = 6 \text{ mm}$ pour deux positions x . $I \simeq 33,5 \mu\text{A}$ ($V_{HT} \simeq 7 \text{ kV}$) et $\tilde{i} \simeq 10 \mu\text{A}$.

l'actionneur génère une vitesse particulière acoustique telle que $\tilde{u} \propto \frac{(\sin \omega t + \phi)}{\omega}$ avec $\omega = 2\pi f$ et ϕ un déphasage. Par ailleurs, pour une même configuration électrique et à l'image de la composante continue de la vitesse (figure 5), les vitesses $\tilde{u}$ mesurées près de la pointe $x = 0,2 \text{ mm}$ sont plus faibles que celles observées au-delà en $x = 3 \text{ mm}$.

5 Conclusion

Cette étude présente diverses mesures de la vitesse des particules de fumée évoluant au sein d'une décharge électrique de type pointe-grille. Ces mesures sont réalisées à l'aide d'une sonde ALD. La composante continue de ces vitesses mesurées sur l'axe est comparée à un modèle simple pour lequel deux paramètres sont ajustés. L'évolution des profils de vitesse mesurés dans les sections droites de la décharge est aussi discutée en fonction des paramètres électrique et géométrique; toutefois il n'existe pas, à notre connaissance, de modèle permettant d'effectuer une comparaison théorie/expérience.

Par ailleurs, des mesures de la composante modulée de la vitesse des particules d'ensemencement ont été réalisées sur l'axe de la décharge, ce dernier travail expérimental devra être complété par des mesures effectuées pour d'autres configurations électriques et géométriques de l'actionneur.

Références

- [1] M. Goldman and A. Goldman. *Gaseous electronics, Ch.4 : Corona discharges*, volume 1. Academic Press, New York, 1978.
- [2] Y. P. Raiser. *Gas discharge physics*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.
- [3] F. Bastien. Acoustic and gas discharges : applications to loudspeakers. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 20 :1547–1557, 1987.

- [4] Ph. Béquin, K. Castor, Ph. Herzog, and V. Montembault. Modeling plasma loudspeakers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(4) :1960–1970, 2007.
- [5] Ph. Béquin, V. Montembault, and Ph. Herzog. Modeling of negative point-to-plane corona loudspeaker. *Eur. Phys. J. AP*, 15 :57–67, 2001.
- [6] Ph. Béquin, K. Castor, and J. Scholten. Electric wind characterisation in negative point-to-plane corona discharges in air. *Eur. Phys. J. AP*, 22 :41–49, 2003.
- [7] L. Landau and E. Lifchitz. *Mécanique des fluides*. Mir, Moscou, 1971.
- [8] A. D. Polyanin and V. F. Zaitsev. *Handbook of Non-linear Partial Differential Equations*. Chapman - Hall CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [9] M. Robinson. Movement of air in the electric wind of the corona discharge. *Trans. Am. Inst. Elect. Engin.*, 80 :143–152, 1961.
- [10] P. Chassaing. *Mécanique des fluides*. CÉPADUÈS-ÉDITIONS, Toulouse, 2000.
- [11] K. Castor. *Caractérisation des sources acoustiques associées aux décharges couronnes négatives*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, France, 2001.
- [12] C. Desjoux, G. Penelet, P. Lotton, and J. Blondeau. Measurement of acoustic streaming in a closed-loop traveling wave resonator using laser doppler velocimetry. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126(5) :2176–2183, 2009.