

RENDEMENT D'UN HAUT-PARLEUR À DÉCHARGES CORONA NÉGATIVES

Kaëlig Castor, Philippe Béquin

Institut d'Acoustique et de Mécanique. Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine,
UMR-CNRS 6613, Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans, Cedex 9, France.

RÉSUMÉ

Cette étude vise à estimer et améliorer le rendement d'un haut-parleur ionique de configuration géométrique pointe-plan. Des mesures ont été réalisées afin de caractériser l'influence sur le bilan énergétique de paramètres tels que le point de fonctionnement électrique, la distance inter-électrodes, le rayon de courbure et le matériau de la pointe. Les résultats expérimentaux ont permis de mettre en évidence les différences de comportement énergétique des deux types de sources acoustiques existant dans l'espace inter-électrodes.

1. INTRODUCTION

Une onde acoustique peut être générée à l'aide d'un volume de gaz ionisé. Un haut-parleur qui utilise ce principe de transduction présente l'avantage de ne faire intervenir aucune pièce mécanique en mouvement. En effet, au sein du gaz ionisé, l'onde acoustique résulte de l'action directe des particules chargées sur les particules neutres [1]. Le présent papier donne l'étude d'un haut-parleur de configuration pointe-plan dont le gaz ionisé est issu de décharges négatives de type corona (ou couronne) [5]. Ces dernières sont obtenues par application d'une différence de potentiel élevée entre les deux électrodes que sont la pointe et le plan. Les particules chargées ainsi créées s'écoulent dans l'espace inter-électrodes, participent au courant de décharges, et interagissent avec les particules neutres environnantes lors des nombreuses collisions. La modulation aux fréquences acoustiques du courant électrique de décharges entraîne une modulation des phénomènes de collisions entre particules chargées et particules neutres et donne ainsi naissance à une perturbation acoustique au sein du gaz ionisé. Des études précédentes [2, 4] ont mis en évidence la coexistence de deux types de sources acoustiques (chaleur et force) se partageant l'espace inter-électrodes; ces sources sont associées respectivement au comportement monopolaire et dipolaire du champ de pression.

L'élaboration d'une instrumentation spécifique [4] conduisant à la mesure des caractéristiques électriques et acoustiques de ce type de transducteur a permis en particulier d'accéder à son bilan énergétique. Dans une première partie, les modèles électriques et acoustiques utilisés pour décrire le fonctionnement d'un transducteur ionique sont rappelés. À partir d'une étude expérimentale récente basée sur un grand nombre de pointes, de matériau et de rayon de courbure différents, la seconde partie traite du bilan énergétique sous un nouvel aspect dans lequel apparaît la séparation distincte des rendements de chacune des deux sources.

2. MODÉLISATION D'UN HAUT-PARLEUR À EFFET CORONA

L'application d'une haute-tension (quelques kV, potentiel négatif sur la pointe) sur un haut-parleur de configuration géométrique pointe-plan, donne naissance aux décharges couronnes négatives à l'origine du gaz ionisé. L'espace inter-électrodes du haut-parleur est divisé en deux régions dans lesquelles les mécanismes de transduction diffèrent (fig.1a). D'une part, une zone dite "d'ionisation", située près de la pointe, dans laquelle les particules chargées transfèrent, en partie aux particules neutres et sous forme de chaleur, l'énergie acquise dans le champ électrique élevé. D'autre part, une zone dite "unipolaire", occupant le reste de l'espace inter-électrodes, dans laquelle les particules chargées (principalement les ions négatifs) sous l'effet du faible champ électrique transfèrent leur quantité de mouvement aux particules neutres du gaz.

2.1. Modélisation électrique

Les phénomènes complexes existant au sein du gaz ionisé peuvent être décrits à l'aide d'un schéma électrique équivalent [3] (fig.1b). Le comportement électrique de la zone d'ionisation et de la zone unipolaire est caractérisé, respectivement, au moyen d'une résistance r_i (inversement proportionnelle à la densité d'électrons) et d'une résistance r_u (inversement proportionnelle à la densité de charges négatives) en parallèle avec une capacité C_u traduisant l'influence mutuelle entre la pointe et le plan. La puissance électrique fournie au volume de gaz ionisé, associée à la modulation du courant électrique, s'écrit sous la forme :

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [v(\omega) i^*(\omega)] = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [Z(\omega)] |i(\omega)|^2. \quad (1)$$

Elle peut être partagée en deux parties. L'une est la puissance électrique associée à la zone d'ionisation :

$$P_{eh} = r_i |i_{RMS}(\omega)|^2, \quad (2)$$

l'autre est liée à la zone unipolaire :

$$P_{ef} = \frac{r_u}{1 + (\omega r_u C_u)^2} |i_{RMS}(\omega)|^2. \quad (3)$$

2.2. Modélisation acoustique

Le gaz dans l'espace inter-électrodes est considéré faiblement ionisé : la densité de particules chargées est supposée faible devant celle des particules neutres. Le modèle acoustique décrit le comportement du gaz de particules neutres ; l'équilibre de ce dernier étant perturbé

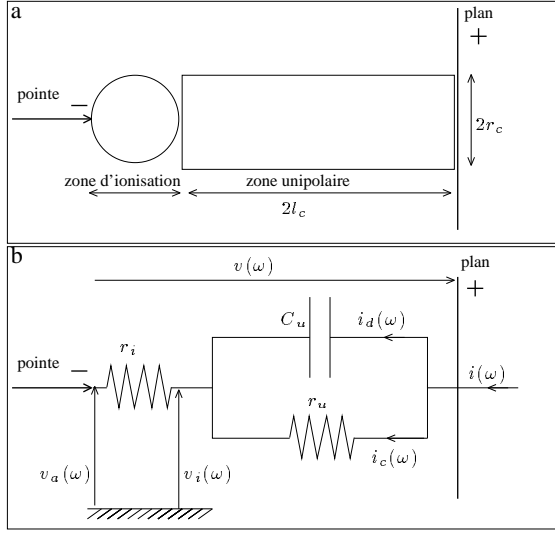


Figure 1. Représentation de l'espace inter-électrodes : a) géométrie simplifiée des sources acoustiques. b) modèle électrique associé.

par la présence des particules chargées. Le modèle proposé s'appuie sur les équations classiques de l'acoustique linéaire dans lesquelles les phénomènes d'interaction entre les particules chargées et neutres sont prises en compte par deux termes de source (chaleur et force). Ainsi, à partir des équations de continuité, d'Euler et de Fourier, deux équations d'Helmholtz sont déduites, chacune étant associée à un type de source :

$$(\Delta + k_0^2)p_h(\vec{r}, \omega) = -j\omega \frac{\gamma - 1}{c_0^2} h(\vec{r}, \omega) \quad (4)$$

$$(\Delta + k_0^2)p_f(\vec{r}, \omega) = \nabla f(\vec{r}, \omega), \quad (5)$$

où γ , c_0 , k_0 , et \vec{r} représentent, respectivement, le rapport des chaleurs spécifiques, la célérité adiabatique, le nombre d'onde, et la distance d'observation. Les pressions acoustiques p_h et p_f sont associées respectivement à la puissance thermique dissipée par unité de volume h , et à la force volumique moyenne exercée par les ions sur les neutres f . En imposant les conditions de Sommerfeld à l'infini et en introduisant la fonction de Green $G(|\vec{r} - \vec{r}_0|, \omega) = \frac{e^{jk_0|\vec{r} - \vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_0|}$, la solution intégrale de chacune des équations précédentes est déduite en prenant en considération les géométries particulières de chacune des deux zones (ponctuelle et cylindrique) et en supposant des conditions de champ lointain et de basses fréquences. La pression acoustique associée à la source de chaleur possède un comportement monopolaire, et s'écrit sous la forme :

$$p_h(r, \omega) = A \frac{e^{-jk_0 r}}{r} i(\omega), \quad (6)$$

$$\text{avec } A \approx \frac{j}{4\pi} \left(\frac{\omega}{c_0} \right) \left(\frac{\gamma - 1}{c_0} \right) (V_i - V_a). \quad (7)$$

La pression acoustique associée à la source de force se réduit à une expression traduisant un comportement dipolaire, soit :

$$p_f(\vec{r}, \omega) \approx B \cos \theta \frac{e^{-jk_0 r}}{r} i(\omega), \quad (8)$$

$$\text{avec } B \approx \frac{1}{4\pi\mu_i(\beta + 1)} \frac{j}{(1 + j\omega r_u C_u)} \left(\frac{\omega}{c_0} \right) d, \quad (9)$$

où μ_i est la mobilité des ions négatifs, β est le rapport des courants I_e et I_i portés respectivement par les électrons et par les ions, et θ est l'angle d'observation par rapport à l'axe du haut-parleur.

La puissance acoustique totale est la somme de deux contributions associées à chacune des sources :

$$P_a = P_{ah} + P_{af} \quad (10)$$

$$\text{avec } P_{ah} = \frac{4\pi|A|^2}{\rho_0 c_0} |i_{RMS}(\omega)|^2, \quad (11)$$

$$\text{et } P_{af} = \frac{4\pi|B|^2}{3\rho_0 c_0} |i_{RMS}(\omega)|^2. \quad (12)$$

2.3. Bilan énergétique

Le rendement de chaque région du haut-parleur est défini comme le rapport de la puissance acoustique qu'elle émet à la partie modulée de la puissance électrique qui lui est fournie :

$$\eta_h = \frac{P_{ah}}{P_{eh}} \approx \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\rho_0 c_0} \left(\frac{\omega}{c_0} \right)^2 \left(\frac{\gamma - 1}{c_0} \right)^2 \frac{(V_i - V_a)^2}{r_i}, \quad (13)$$

$$\text{et } \eta_f = \frac{P_{af}}{P_{ef}} \approx \frac{1}{12\pi} \frac{1}{\rho_0 c_0} \left(\frac{\omega}{c_0} \right)^2 \left(\frac{d}{\mu_i(\beta + 1)} \right)^2 \frac{1}{r_u}. \quad (14)$$

L'accès au bilan énergétique fait donc appel aux mesures des grandeurs électriques r_i , r_u , et C_u et acoustiques A et B pour chaque configuration pointe-plan.

3. TRAVAIL EXPÉRIMENTAL

Le système de mesure basé sur un diviseur de tension est adapté aux problèmes expérimentaux spécifiques liés notamment à des signaux de faible amplitude (quelques μV), à des impédances électriques élevées (quelques $M\Omega$), et à un environnement à hautes tensions (quelques kV). Pour ne citer que l'essentiel, il est possible de palier ces difficultés en soignant particulièrement le blindage contre les perturbations électromagnétiques, et en évaluant finement les capacités parasites de chaque configuration pointe-plan testée. Une fois l'étalonnage réalisé, l'impédance électrique de l'espace inter-électrodes est mesurée, et les valeurs des paramètres r_i , r_u , et C_u sont estimées par ajustement sur cette mesure. Enfin, une mesure de directivité du champ de pression doit être effectuée pour chaque configuration du haut-parleur afin d'accéder aux valeurs des amplitudes A et B. Deux types de rayons de courbure ($50\mu\text{m}$ et $110\mu\text{m}$) ont été testés pour huit matériaux de pointes à savoir : l'inox, le titane, le tungstène, l'aluminium, le cuivre, le laiton, le graphite et l'acier. Certains matériaux comme l'aluminium et le graphite ont présenté des difficultés concernant la stabilité des décharges ce qui se manifestait par la génération de bruits parasites. La présence d'aspérités au niveau de la surface des pointes, des problèmes de contact, ainsi que de la résistance à la corrosion pourraient être mis en cause.

3.1. Mesure de l'impédance électrique

3.1.1. Zone unipolaire

La résistance r_u est évaluée à quelques dizaines de $M\Omega$, et les mesures montrent qu'elle est inversement proportionnelle au courant I.

La capacité C_u , de l'ordre de 0.25pF pour l'ensemble des configurations expérimentales, est quasiment indépendante de la distance inter-électrodes et du courant I, et dépend faiblement du matériau et du rayon de courbure de la pointe.

3.1.2. Zone d'ionisation

En raison de la faible valeur de la résistance r_i par rapport à la résistance r_u , son influence sur l'impédance électrique totale apparaît juste avant 100kHz, borne maximale de l'intervalle fréquentiel de mesure. Par conséquent, l'ajustement du paramètre r_i est difficile, ce qui entraîne une incertitude importante sur sa valeur, de l'ordre de quelques dizaines de pourcents selon les configurations expérimentales. D'après les mesures effectuées et compte-tenu de ces conditions, la résistance r_i peut être considérée, en première approximation, indépendante du courant I ; ce résultat est confirmé pour un grand nombre de pointes de rayon de courbure et de matériau différents, à l'exception du cuivre et de l'inox, pour lesquels une dépendance en courant est très marquée (diminution de r_i quand I croît, conformément à son caractère inversement proportionnel à la densité d'électrons).

3.2. Mesures acoustiques

Les figures 2 et 3 donnent un exemple de diagramme de directivité et de réponse fréquentielle du haut-parleur pointe-plan. Un bon accord entre la théorie et l'expérience est obtenu en ajustant les valeurs des grandeurs inconnues que sont $(V_i - V_a)$ et $(\beta + 1)$ dans les expressions (6) et (8).

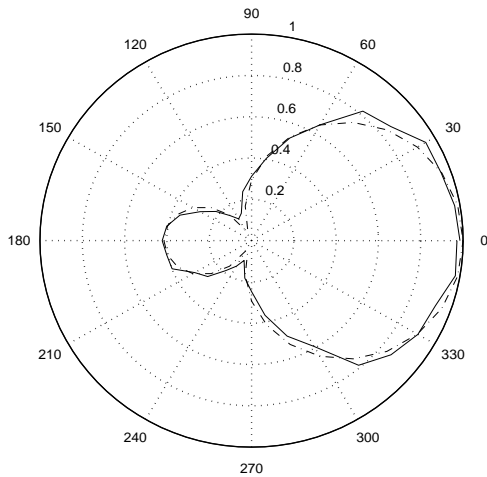


Figure 2. Diagramme de directivité de la pression acoustique (normalisée par rapport à sa valeur mesurée en face de la pointe) (— : mesure, - - : modèle) pour une pointe d'acier à $f = 5kHz$.

Le diagramme de directivité et la réponse fréquentielle du champ de pression montrent respectivement une supercardioïde, qui est la somme d'un monopole et d'un dipole, et une pente en 6dB/octave ; ces résultats sont en accord avec les modèles proposés.

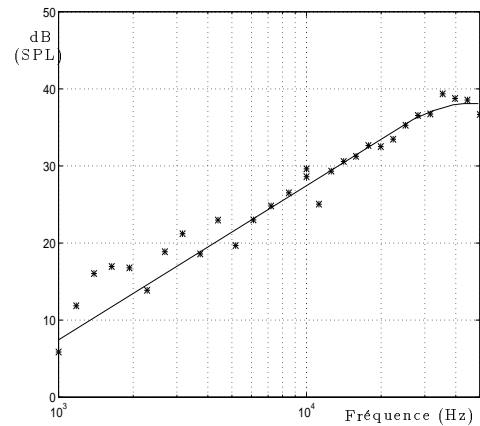


Figure 3. Réponse en fréquence (* : mesure, - : modèle) pour une pointe d'acier ($I = 60\mu A$, $V = 6.5kV$, $d = 6mm$, $\theta = 0$).

3.3. Bilan énergétique

3.3.1. Rendement associé à la source de chaleur

Compte-tenu des problèmes liés à l'estimation de l'impédance électrique de la zone d'ionisation r_i , l'incertitude sur la mesure du rendement lié à la source de chaleur est importante de sorte que les résultats ne permettent pas une interprétation détaillée. La figure 4 met simplement en évidence que le rendement lié à la source de chaleur croît avec le courant I et la distance inter-électrodes. Compte-tenu de la relation 13, ces résultats ajoutés à ceux issus de la thèse de V. MONTEBAULT [4], permettent de déduire que le paramètre $(V_i - V_a)$ est une fonction du courant I.

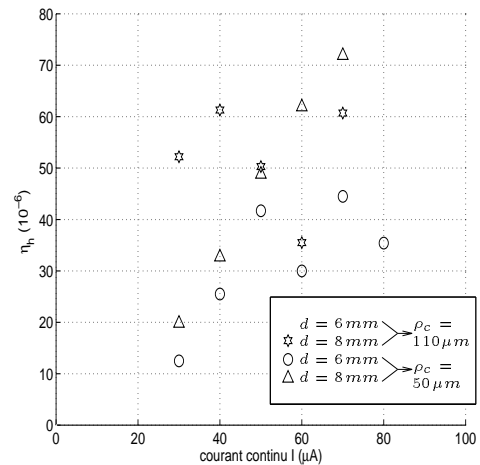


Figure 4. Rendement associé à la source de chaleur η_h pour une pointe en inox en fonction du courant continu I pour différentes distances inter-électrodes et rayons de courbure de pointe.

3.3.2. Rendement associé à la source de force

La figure 5 montre que le rendement lié à la source de force croît avec le courant continu et distance inter-électrodes, conformément à la relation 14. Pour la plupart des pointes testées, la relation entre le rendement

et le courant continu peut être considéré linéaire en première approximation. Les différences importantes de comportement liées au rayon de courbure $\rho_c = 50\mu m$, entre $d = 6mm$ et $d = 8mm$, pourraient être dues à la prise en compte dans l'interpolation linéaire de points de mesure trop proches de la tension de seuil d'établissement des décharges.

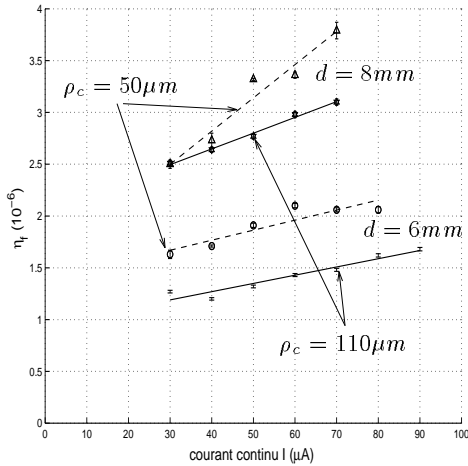


Figure 5. Rendement associé à la source de force η_f pour une pointe en inox en fonction du courant continu I pour différentes distances inter-électrodes et rayons de courbure de pointe.

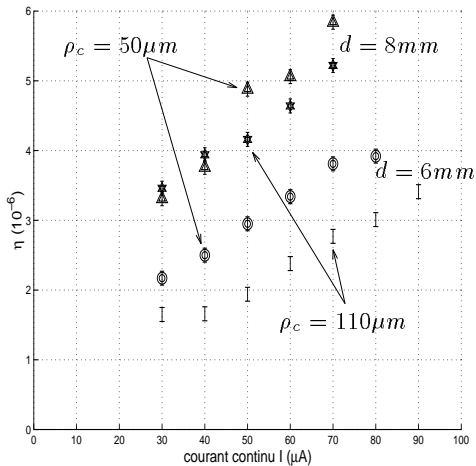


Figure 6. Rendement total η pour une pointe en inox en fonction du courant continu I pour différentes distances inter-électrodes et rayons de courbure de pointe.

3.3.3. Rendement total

Dans la plupart des cas, le rendement lié à la source de chaleur η_h est généralement 10 à 20 fois supérieur à celui lié à la source de force η_f . Cependant, quelque soit le matériau de la pointe, le rendement total η et le rendement de la zone unipolaire η_f ont des évolutions très similaires en fonction du courant, de la distance inter-électrodes, et du rayon de courbure (fig 5 et 6).

La figure 7 donne l'évolution du rendement total en fonction du courant continu I pour différents matériaux de

pointe. Les points en cuivre et en acier permettent d'obtenir le meilleur rendement total.

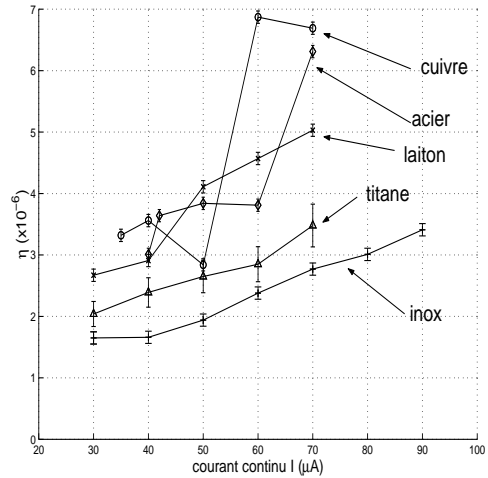


Figure 7. Rendement total en fonction du courant continu I pour différents matériaux de pointes (distance inter-électrodes $d = 6mm$, rayon de courbure $\rho_c = 110\mu m$)

4. CONCLUSION

Bien que le rendement de la source de chaleur soit généralement plus de dix fois supérieur à celui de la source de force, l'évolution du bilan énergétique du haut-parleur est gouverné par celui de la zone unipolaire. Le rendement total du haut-parleur ionique de type pointe-plan est d'autant meilleur que la distance inter-électrodes est importante, et que le rayon de courbure est faible. Cependant, augmenter la distance inter-électrodes entraîne des instabilités dans le régime de décharges, et limite la miniaturisation du haut-parleur. Un compromis est alors nécessaire sur le choix de ce paramètre. Par ailleurs, des mesures avec une modulation plus importante vont être entreprises afin de compléter la caractérisation d'un tel haut-parleur, notamment accéder à son taux de distorsion.

RÉFÉRENCES

- [1] BASTIEN (F.). – Acoustics and gas discharges : applications to loudspeakers. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 20, 1987, pp. 1547–1557.
- [2] BÉQUIN (Ph.) et HERZOG (Ph.). – Model of acoustic sources related to negative point-to-plane discharges in ambient air. *Acta Acustica*, vol. 83, 1997, pp. 359–366.
- [3] KEKEZ (M. M.), SAVIC (P.) et LOUGHEED (G. D.). – A novel treatment of trichel-type phenomena with possible application to stepped-leader phenomena. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 15, 1982, pp. 1963–1973.
- [4] MONTEBAULT (V.). – Thèse de doctorat, Université du Maine. *Étude des sources acoustiques associées aux décharges corona négatives*, Déc. 1997.
- [5] RAIZER (Yuri P.). – *Gas Discharge Physics*. – Springer-Verlag, 1991.