

Etude du comportement non linéaire d'un haut-parleur à gaz ionisé

Philippe Béquin¹, Kaëlig Castor²

¹ Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, 72085 Le Mans Cedex 9, France, courriel : philippe.bequin@univ-lemans.fr

² Laboratoire de Détection et de Géophysique, C.E.A., 91680 Bruyères-le-chatel, France, courriel : ckaelig@hotmail.com

Résumé

Cette étude propose une modélisation des comportements linéaire et non linéaire d'un haut-parleur à gaz ionisé de configuration pointe négative-grille. La mesure des caractéristiques électriques et acoustiques est effectuée à l'aide de dispositifs expérimentaux adaptés aux valeurs élevées de l'impédance du haut-parleur, aux hautes tensions et aux perturbations électromagnétiques importantes. L'analyse des premiers résultats expérimentaux, corroborés par l'examen des termes sources de l'équation de propagation acoustique, révèle que la source de chaleur est principalement responsable des effets non linéaires observés.

Introduction

Un haut-parleur à gaz ionisé est un dispositif qui assure, à l'aide d'un volume d'air ionisé, la conversion d'un signal électrique en signal acoustique. Ce gaz est créé au moyen d'une décharge électrique négative de type corona ([1],[2]) obtenue par application d'une haute tension entre une pointe et une grille (figure 1). Sous l'influence du champ électrique des électrons sont produits près de la pointe et sont ensuite en partie recombinaés aux particules neutres pour former des ions négatifs. Ces particules chargées s'écoulent de la pointe vers la grille ; elles interagissent avec les particules neutres de l'air et leurs imposent un mouvement ordonné ou désordonné lors des nombreuses collisions. La modulation aux fréquences acoustiques du courant électrique entraîne une modulation des interactions entre particules chargées et particules neutres du gaz ionisé donnant ainsi naissance à une perturbation acoustique se propageant dans l'air environnant. Dans l'espace interélectrodes les phénomènes d'interaction conduisent principalement soit à un transfert d'énergie thermique (source de chaleur) soit à un transfert de quantité de mouvement (source de force) des particules chargées vers les particules neutres de l'air. Une modulation importante du courant de décharge entraîne alors un comportement non linéaire de ces sources acoustiques.

La première partie de cette étude est consacrée à la description du haut-parleur à gaz ionisé, aux modèles électrique et acoustique, et aux mesures associées à son comportement linéaire. La seconde partie est dédiée à une modélisation du comportement non linéaire du haut-parleur. Finalement une première confrontation entre résultats théoriques et expérimentaux est proposée.

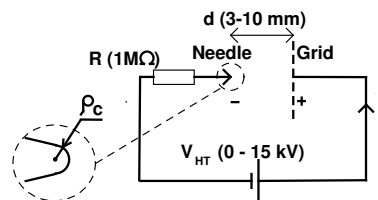


Figure 1: Représentation schématique d'un haut-parleur pointe-grille. V_{HT} , I , R , d et ρ_c sont respectivement la haute tension appliquée, le courant électrique, une résistance, la distance interélectrodes et le rayon de courbure de la pointe.

Fonctionnement du haut-parleur à gaz ionisé

Description électro-mécanique du haut-parleur

Dans l'air aux conditions atmosphériques normales, lorsque la valeur de la tension V_{HT} appliquée entre une pointe et une grille dépasse un seuil V_s les particules chargées apparaissent dans un champ électrique non uniforme. L'évolution spatio-temporelle de ce dernier permet de diviser l'espace entre les électrodes en deux zones.

La première zone est proche de la pointe, l'amplitude et le gradient du champ électrique y sont élevés. Cette zone est qualifiée d'ionisation car l'amplitude élevée du champ électrique ($E > E_c \simeq 27kV/cm$) favorise les processus d'ionisation et donc la formation d'électrons et d'ions positifs. Les particules chargées présentes dans cette zone s'échauffent sous l'action du champ électrique et se refroidissent par collisions avec les particules du gaz environnant. Le terme de source qui traduit l'apport de chaleur dû à l'action des particules chargées sur les particules neutres de l'air est exprimé sous la forme d'une puissance thermique par unité de volume

$$H = \mathcal{K} \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (1)$$

où \mathbf{J} est la densité de courant associée aux électrons, \mathbf{E} le champ électrique local et \mathcal{K} un facteur sans dimension qui correspond à la fraction d'énergie électrique fournie à la zone d'ionisation et transformée sous forme d'énergie thermique.

Cette zone d'ionisation, compte tenu de la géométrie particulière des électrodes et des processus mis en jeu, peut

être assimilée à une sphère de rayon estimé à quelques dixièmes de millimètre.

La deuxième zone, qualifiée de "dérive", est comprise entre la zone d'ionisation et la grille ; elle se caractérise par un champ électrique d'amplitude approximativement linéaire et de valeur inférieure à la valeur E_c . Les électrons qui s'échappent de la zone d'ionisation, sont soit suffisamment énergétiques pour atteindre la grille après de multiples collisions avec les particules neutres du gaz ionisé, soit attachés sur les particules neutres formant ainsi des ions négatifs. Ces particules négatives se déplacent alors sur les lignes de champ électrique vers l'électrode plane et elles acquièrent, entre deux collisions, une certaine quantité de mouvement que les ions négatifs cèdent plus facilement que les électrons aux particules neutres de l'air (leurs masses étant sensiblement égales). Ce phénomène est responsable du vent ionique qui est orienté suivant l'axe du système d'électrodes et souffle de la pointe vers l'électrode plane. Une analyse rapide de la géométrie des lignes de champ électrique et des écoulements de charges permet d'attribuer à cette zone de dérive un volume approximativement conique centré sur l'axe du système d'électrodes. La force par unité de volume qu'exerce les ions sur les particules neutres de l'air peut être exprimée de la manière suivante :

$$\mathbf{F} = N_i q_e \mathbf{E} \quad (2)$$

où N_i est le nombre d'ions négatifs par unité de volume, q_e la charge de l'ion, et \mathbf{E} le champ électrique local.

Modélisation électrique

Les phénomènes complexes existant au sein du gaz ionisé peuvent être décrits à l'aide d'un schéma électrique équivalent (figure 2). Le comportement électrique de la zone d'ionisation et de la zone de dérive est caractérisé, respectivement, au moyen d'une résistance r_i (inversement proportionnelle au nombre d'électrons par unité de volume) et d'une résistance r_u (inversement proportionnelle au nombre de charges négatives par unité de volume) en parallèle avec une capacité C_u traduisant l'influence mutuelle entre la pointe et la grille. Les valeurs obtenues, avec les configurations électriques et géométriques du haut-parleur étudié, sont de l'ordre du mégohm pour r_i , de quelques dizaines de mégohms pour r_u et de quelques dixièmes de picofarads pour la capacité C_u .

Modélisation acoustique

Lorsque le courant qui s'écoule dans l'espace interélectrodes est modulé aux fréquences acoustiques par un circuit électronique externe, les deux mécanismes de transfert agissent comme deux sources acoustiques. Le régime de fonctionnement du système pointe-grille est modulé autour d'un point de fonctionnement et se déplace le long de la courbe $I - V_{HT}$ (figure 3).

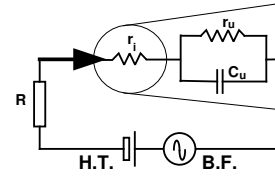


Figure 2: Représentation électrique du haut-parleur pointe-grille. r_i , r_u sont les résistances associées à chaque zone et C_u est la capacité de la zone de dérive.

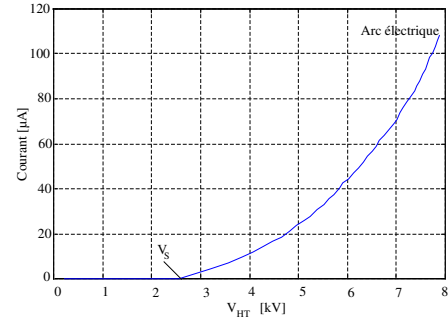


Figure 3: Allure de la caractéristique courant-tension d'un système pointe-grille : $d = 6mm$; $I = \alpha V_{HT}(V_{HT} - V_s)$.

Comportement linéaire

Le gaz dans l'espace inter-électrode est considéré faiblement ionisé : le nombre de particules chargées par unité de volume est supposé faible devant celui des particules neutres. Le modèle acoustique décrit le comportement du gaz de particules neutres, l'équilibre de ce dernier étant perturbé 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 eq.1 et force eq.2). 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. En considérant la fonction de Green associée à un milieu infini sans paroi, 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) 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 :

$$p_h(r, \omega) \approx A \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} i(\omega) \quad (3)$$

$$A = j \frac{\omega}{c_o} \frac{\gamma - 1}{c_o} \mathcal{K}(V_i - V_a)$$

avec $k = \omega/c_0$ où ω , c_0 , γ , $V_i - V_a$, I et i représentent respectivement la pulsation, la vitesse de propagation de la perturbation, le rapport des chaleurs spécifiques, la

différence de potentiel entre la pointe et l'interface zone d'ionisation/zone de dérive, le courant de décharge et sa variation.

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

$$p_f(r, \omega) \approx B \cos \theta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} i(\omega)$$

$$B = \frac{-j}{\mu_i(\beta + 1)} \frac{1}{(1 + j\omega r_u C_u)} \left(\frac{\omega}{c_o}\right) d \quad (4)$$

où θ , $\beta = I_e/I_i$ et μ_i , représentent l'angle d'observation, le rapport entre les courants électriques I_e et I_i portés par les électrons et les ions et la mobilité des ions négatifs ($\approx 1.8 \cdot 10^{-4} \text{V.m}^2/\text{s}$).

Finalement la pression totale p_t est la somme des pressions p_h (eq. 3) à caractère monopolaire et p_f à caractère dipolaire (eq. 4) s'écrit

$$p_t = p_h + p_f = (A + B \cos \theta) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} i(\omega). \quad (5)$$

Travail expérimental

Un système de mesures électriques et acoustiques a été développé ([3], [4]), il est adapté aux problèmes expérimentaux spécifiques liées 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). Les mesures électriques permettent d'estimer les paramètres électriques r_i, r_u et C_u ; les mesures de directivité du champ de pression permettent d'accéder aux amplitudes de p_h et p_f .

Les figures 4 et 5 donnent respectivement un exemple de diagramme de directivité et de réponse fréquentielle du haut-parleur pointe-grille obtenus pour des faibles taux de modulation $\frac{i}{I} = 0.5\%$. L'accord entre les résultats théoriques et expérimentaux est obtenu en ajustant les valeurs des grandeurs inconnues que sont $\mathcal{K}(V_i - V_a)$ et β dans les expressions (3) et (4). Le diagramme de directivité et la réponse fréquentielle du champ pression montrent respectivement une supercardioïde qui est la somme d'un monopôle et d'un dipôle avec un rapport des amplitudes dipôle/monopôle de l'ordre de 3 approximativement, et une pente en 6dB/octave. L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sont en accord avec les modèles proposés (eq.5).

Comportement non linéaire

Dans la partie précédente un faible taux de modulation (de l'ordre de quelques dixièmes de pourcent) a été utilisé permettant d'admettre dans les modèles la linéarité des phénomènes physiques; mais en contre-partie, la puissance acoustique émise par le haut-parleur est limitée.

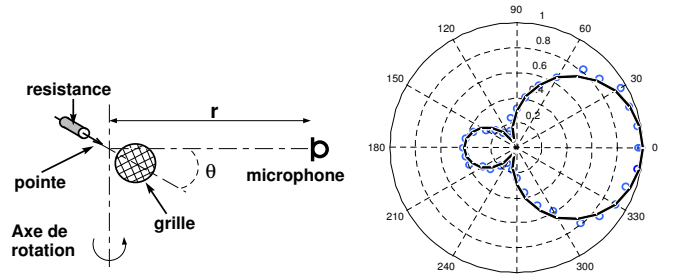


Figure 4: Diagramme de directivité (o : mesure ; - : modèle avec A et B estimés par interpolation) $d = 6\text{mm}$, $I = 60\mu\text{A}$, $i = 0.3\mu\text{A}$, $r = 10\text{cm}$ et $f = 5\text{kHz}$.

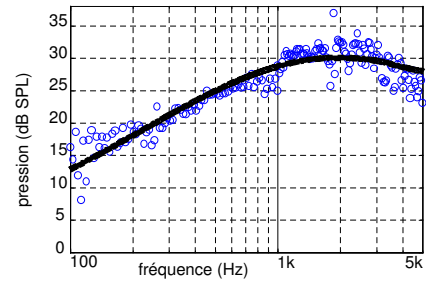


Figure 5: Pression totale mesurée dans l'axe en fonction de la fréquence (o : mesure ; - : modèle avec A et B estimés par interpolation) $d = 6\text{mm}$, $I = 60\mu\text{A}$, $i = 0.3\mu\text{A}$, et $r = 10\text{cm}$.

Afin d'obtenir des niveaux sonores plus élevés, il est donc nécessaire d'augmenter ce taux de modulation. La modulation en courant semble alors indispensable afin d'éviter l'effet non linéaire dû à la caractéristique courant-tension (figure 3). Dans ces conditions les sources du haut-parleur présentent un comportement non linéaire qui se manifeste, pour la pression acoustique mesurée, par une génération d'harmoniques.

Dans le modèle proposé, les équations non linéaires sont ramenées à des équations linéaires par une méthode de perturbation, les termes non linéaires apparaissant alors dans les seconds membres étant connus. La méthode de résolution précédemment décrite est utilisée pour résoudre chacune de ces équations linéaires.

La pression acoustique p_f générée par la source de force est proportionnelle à la fluctuation de la force,

$$F = \frac{I_i}{\mu_i S}, \quad (6)$$

où I_i est le courant porté par les ions négatifs, μ_i la mobilité des ions négatifs, et $S = S_o + se^{j\omega t}$ la section de la colonne de gaz ionisé.

L'étude [4] montre que les rapports des amplitudes des harmoniques de la pression créée par la source de force dépendent uniquement de la variation de la section du volume cylindrique de la source de force :

$$\frac{p_f(2\omega)}{p_f(\omega)} = \frac{p_f(3\omega)}{p_f(2\omega)} = -\frac{s}{S_o}. \quad (7)$$

De même, pour la pression p_h associée à la source de chaleur (eq.1), le rapport de l'amplitude de l'harmonique 2 à celle du fondamental est déduit égal à la moitié du taux de modulation en courant.

$$\frac{p_h(2\omega)}{p_h(\omega)} = +\frac{1}{2}\left(\frac{i}{I}\right). \quad (8)$$

Travail expérimental

Un nouveau dispositif expérimental basé sur l'utilisation d'un amplificateur de transconductance a été mis au point et adapté aux haut-parleurs pointe-grille utilisés [4]; il permet d'effectuer une importante modulation du courant circulant dans le transducteur. De plus, les protections des systèmes de mesures électrique et acoustique contre le rayonnement électromagnétique du haut-parleur pointe-grille ont été renforcées.

La figure 6 donne un exemple de réponse en fréquence de la pression (fondamental et les deux premiers harmoniques) effectuée à l'aide d'un microphone dans l'axe d'un haut-parleur pointe-grille soumis à un taux de modulation de $\frac{i}{I} = 33\%$ et à une distance $r = 30cm$. Cette figure montre l'émergence des harmoniques 2 et 3 du signal de pression acoustique.

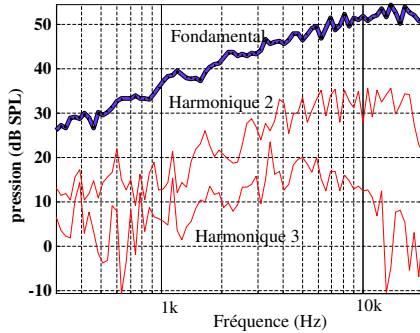


Figure 6: Diagramme de directivité (o : mesure ; - : modèle $A + B \cos \theta$) $d = 5mm, I = 60\mu A, i = 20\mu A$ et $r = 30cm$.

La figure 7 montre un exemple de diagramme de directivité obtenu pour la fréquence fondamentale $f=5kHz$ et l'harmonique 2 associé. L'ajustement de l'amplitude A du monopôle et B du dipôle (eq.5) permet de déterminer respectivement le comportement non linéaire de la source de chaleur et de la source de force.

De ces mesures microphoniques sont déduits les rapports

$$\frac{p_h(2\omega)}{p_h(\omega)} = 0.16(\simeq \frac{0.33}{2}) \quad (9)$$

et

$$\frac{p_f(2\omega)}{p_f(\omega)} = 0.08. \quad (10)$$

Ces mesures montrent que le comportement non linéaire du haut-parleur à gaz ionisé est principalement dû à celui de la source de chaleur.

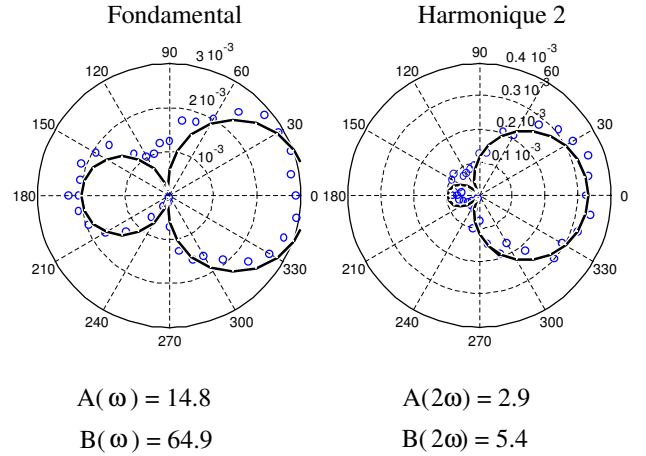


Figure 7: Diagramme de directivité (o : mesure ; - : modèle $A + B \cos \theta$) $f = 5kHz, d = 5mm, I = 60\mu A, i = 20\mu A$ et $r = 30cm$.

Afin de valider ces premiers résultats expérimentaux et de s'affranchir des perturbations électromagnétiques sur la mesure, l'Anémométrie Laser Doppler (ALD) développée au LAUM a été utilisée [4]. Malgré les difficultés dues à la mesure de faibles vitesses acoustiques (fondamental $\simeq 120mm/s$ et harmonique 2 $\simeq 20mm/s$) dans un écoulement (vent ionique $\simeq 5m/s$) et à la présence d'ensemencement dans la décharge électrique, les mesures obtenues par le banc ALD ont permis de confirmer les tendances précédemment observées.

Ces premières mesures semblent valider en partie le modèle analytique associé au comportement non linéaire du haut-parleur à gaz ionisé. Afin de poursuivre le travail expérimental, des améliorations devront être apportées sur les techniques de mesures acoustiques en milieux ionisés (maîtrise de l'ensemencement, optimisation des techniques de traitements des signaux, etc.).

References

- [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] V. Montebault. *Etude des sources acoustiques associées aux décharges corona négatives*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, France, 1997.
- [4] K. Castor. *Caractérisation des sources acoustiques associées aux décharges couronnes négatives*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, France, 2001.