

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Effets de la température sur les propriétés électro-mécaniques d'un microphone capacitif et de son préamplificateur**

T. Lavergne<sup>a</sup>, C. Guianvarc'H<sup>a</sup>, L. Risegari<sup>a</sup>, P. Honzik<sup>b</sup> et R. Gavioso<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire Commun de Métrologie LNE-CNAM, 61 rue du Landy, 93210 La Plaine Saint-Denis, France

<sup>b</sup>Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences, Konviktská 20, 110 00 Praha 1, République tchèque

<sup>c</sup>Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Strada delle Cacce 91, 10135 Turin, Italie  
cecile.guianvarch@lecnam.net

Les microphones capacitifs sont en général conçus pour fonctionner en conditions atmosphériques. Les modèles associés devraient être applicables hors de ces conditions, mais les validations expérimentales en restent limitées. De plus, ces modèles n'intègrent pas les effets de la température sur les propriétés de la membrane, ni sur le préamplificateur. Ainsi, il est difficile aujourd'hui de prévoir avec précision le comportement de ces microphones à des températures éloignées de 20 °C. Ceci pose problème notamment dans les méthodes acoustiques associées à la thermométrie primaire pour redéfinir l'échelle internationale des températures. Dans ces méthodes, la température thermodynamique est déduite de la vitesse du son mesurée dans un gaz noble en cavité. Les capteurs et sources acoustiques utilisés sont des microphones capacitifs du commerce dont le comportement doit alors être bien compris dans une large gamme de températures.

La technique de la grille d'entraînement a déjà permis d'apprécier l'influence de la nature et de la pression du gaz sur le comportement de microphones. L'objectif principal du présent travail est de caractériser, avec cette même technique, les effets de la température sur les propriétés électro-mécano-acoustiques d'un microphone capacitif, afin de pouvoir intégrer ces nouveaux paramètres dans des modèles existants ou à prévoir. La grille d'entraînement fournit à la membrane une excitation d'origine électrostatique et permet donc de caractériser son comportement mécanique dans le vide. La technique de la tension insérée permet, elle, d'isoler et d'analyser la contribution du préamplificateur dans la réponse globale du microphone à la grille d'entraînement. Le banc de mesure utilisé ici permet de travailler en hélium, argon et sous vide, d'environ 100 K à 300 K. Les retombées à prévoir sont, entre autres, la consolidation de bases théoriques et expérimentales pour la compréhension, l'étalonnage et la conception de transducteurs acoustiques dédiés à de nouveaux besoins.

## 1 Introduction

Certaines applications en acoustique hors conditions atmosphériques usuelles, en particulier pour la thermométrie primaire basses températures [1, 2], nécessitent une bonne compréhension du comportement des transducteurs acoustiques utilisés dans ces conditions ambiantes spécifiques. Pour la réalisation de thermomètres acoustiques à gaz, les transducteurs capacitifs sont ceux qui présentent le meilleur compromis entre dimensions, sensibilité, stabilité et présentent un échauffement négligeable au niveau de la membrane, ce qui est un facteur déterminant ici.

Cependant, à ce jour, aucune caractérisation expérimentale de transducteurs acoustiques capacitifs en basses températures n'a encore été effectuée. L'objet du présent travail est de déterminer l'effet de la température sur le comportement de microphones capacitifs. Pour ce faire, la technique sélectionnée ici est celle de la grille d'entraînement, bien connue et largement utilisée pour effectuer des étalonnages relatifs de microphones [3–5]. Les résultats expérimentaux ainsi obtenus doivent être comparés, dans un premier temps, avec des modèles existants [6, 7], puis avec modèles en cours d'élaboration qui doivent tenir compte de l'impédance acoustique de la couche de gaz entre la membrane et la grille [8–10].

Le dispositif étudié ici est constitué d'un microphone capacitif 1/4" du commerce (GRAS), chargé à l'avant par une grille d'entraînement, et à l'arrière par un préamplificateur. Il présente ainsi de forts couplages électro-mécano-acoustique, où de nombreux paramètres entrent en jeu, en particulier les propriétés mécaniques de la membrane, l'épaisseur de l'entrefer, le volume de la cavité arrière, l'épaisseur de l'espace entre la membrane et la grille, l'impédance électrique du préamplificateur. Les couplages entre les effets liés à ces différents paramètres (très mal connus a priori) rend délicate une caractérisation individuelle de ces paramètres par simple comparaison entre résultats expérimentaux et théoriques.

Ainsi, afin de déterminer séparément les propriétés électro-mécaniques du microphone en fonction de la température, le dispositif expérimental est placé dans une enceinte sous vide, dont la régulation de température permet

de descendre jusqu'à 77 K (température d'évaporation de l'azote). Les propriétés électriques de l'ensemble microphone-préamplificateur doivent être déterminées grâce à la technique de la tension insérée [11, 12].

Après un bref rappel des méthodes et techniques expérimentales mises en oeuvre pour déterminer la réponse en fréquence à circuit ouvert d'un microphone capacitif 1/4" du commerce, quelques résultats obtenus dans le vide entre environ 100 K et 300 K sont présentés. Ils montrent que les propriétés mécaniques de la membrane sont très sensibles à la température, ce qui implique des difficultés techniques à résoudre concernant la stabilité thermique du dispositif de mesure, avant de pouvoir approfondir et exploiter ces résultats.

## 2 Détermination de la réponse en fréquence d'un microphone dans le vide

L'objet de ce paragraphe est de décrire les principes de base des méthodes et techniques expérimentales mises en oeuvre dans le cadre du présent travail. Les contraintes et choix techniques spécifiques à cette expérience sont décrits dans la référence [13].

### 2.1 Méthode d'étalonnage relatif à la grille d'entraînement

La grille d'entraînement est un dispositif bien connu pour effectuer des étalonnages relatifs de microphones capacitifs, c'est-à-dire pour en mesurer la réponse en fréquence [3–5]. Cette technique, qui nécessite assez peu d'équipements spécifiques, est très couramment utilisée en laboratoires de métrologie et chez certains utilisateurs.

Dans l'expérience réalisée ici [13], et comme représenté Figure 1, la grille est placée à une distance  $d_0$  (de l'ordre du millimètre) de la membrane du microphone, polarisée avec une tension continue  $U_0$ . Une tension électrique  $u_g(t)$  oscillante, de pulsation  $\omega$  et d'amplitude  $U_g$ , est appliquée entre la grille et la membrane. La force électrostatique alors

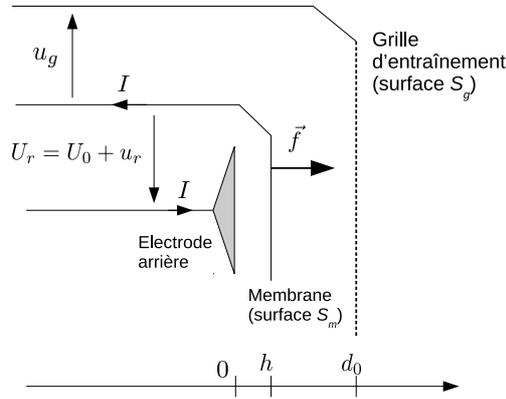


FIGURE 1 – Etalonnage relatif d'un microphone capacitif par grille d'entraînement.

exercée sur la membrane prend la forme

$$f(t) = \frac{\epsilon S_g U_g}{4d_0^2} u_{g2}(t), \quad (1)$$

où  $\epsilon$  est la constante diélectrique du gaz, et  $u_{g2}(t)$  une tension électrique d'amplitude  $U_g$  et de pulsation  $2\omega$ .

Cette force d'origine électrostatique simule sur la membrane une pression  $p = -S_m f$  supposée uniforme. En réponse à cette excitation, la tension à circuit ouvert  $(u_r)_{i=0}$  en sortie du microphone est directement reliée à sa sensibilité à circuit ouvert  $\sigma = (u_r)_{i=0}/p$  :

$$\frac{(u_r)_{i=0}}{u_{g2}} = -\frac{\epsilon U_g S_g}{4d_0^2 S_m} \sigma \frac{Z_a}{Z_a + Z_L}, \quad (2)$$

où  $Z_a$  et  $Z_L$  sont respectivement les impédances acoustiques du microphone et de la couche de gaz entre la membrane et la grille.

L'expérience étant ici effectuée dans le vide, l'impédance  $Z_L$  est nulle et  $\epsilon = \epsilon_0$ , ce qui conduit à

$$\frac{(u_r)_{i=0}}{u_{g2}} = -\frac{\epsilon_0 U_g S_g}{4d_0^2 S_m} \sigma. \quad (3)$$

## 2.2 Technique de la tension insérée

Le comportement électrique du microphone peut être représenté par un générateur de Thévenin équivalent, d'impédance électrique  $Z_{eq}$  et dont la force électromotrice  $u_{eq}$  n'est autre que la tension  $(u_r)_{i=0}$  [11, 12]. La tension électrique  $u_r$  en sortie d'un microphone est, elle, nécessairement mesurée à travers un préamplificateur, d'impédance électrique d'entrée notée  $Z_e$  (Fig. 2).

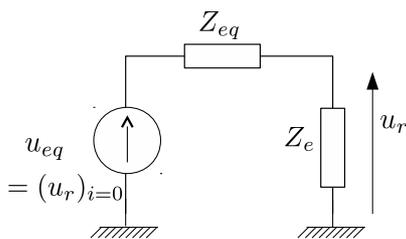


FIGURE 2 – Mesure de la tension en sortie d'un microphone chargé par son préamplificateur.

Ainsi, la tension mesurée en sortie d'un microphone est donnée par

$$u_r = \frac{Z_e}{Z_e + Z_{eq}} (u_r)_{i=0}. \quad (4)$$

La technique dite de la tension insérée permet de déterminer la réponse à circuit ouvert  $(u_r)_{i=0}$  du microphone [11]. Après avoir mesuré la tension  $u_r$  en sortie du microphone en réponse à une excitation acoustique (Fig. 2), une tension électrique  $u_i$  est insérée entre le microphone et son préamplificateur (Fig. 3).

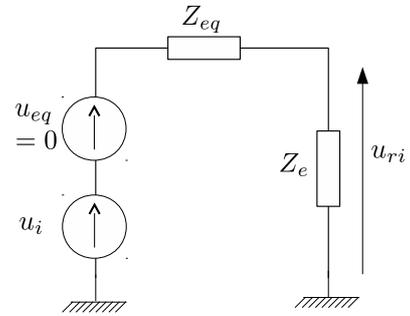


FIGURE 3 – Technique de la tension insérée.

En l'absence d'excitation acoustique, la tension  $u_{ri}$  en sortie du microphone est, ensuite, mesurée en réponse à la tension  $u_i$  (même pulsation que  $u_r$ ). La tension de sortie à circuit ouvert peut alors être déduite du rapport  $u_r/u_{ri}$  :

$$(u_r)_{i=0} = \frac{u_r}{u_{ri}} u_i. \quad (5)$$

## 2.3 Propriétés de résonance d'une capsule microphonique dans le vide

La sensibilité du microphone  $\sigma$  est reliée à son impédance acoustique dont l'expression dépend des propriétés de sa membrane et de la charge acoustique à l'arrière (entrefer et cavité arrière) [6, 7]. Si la capsule microphonique se trouve dans le vide, l'impédance acoustique du microphone se réduit à celle d'une membrane circulaire vibrant dans le vide, et les propriétés de résonance du microphone dépendent uniquement du rayon  $R_m$ , de la masse  $M_m$ , tension mécanique  $T_m$  et amortissement structurel  $\eta_m$  de la membrane.

Finalement, d'après l'expression (3), la réponse en fréquence  $H(\nu)$  d'une capsule microphonique excitée à la grille d'entraînement dans le vide prend la forme d'une fonction résonante

$$H(\nu) = \frac{(u_r)_{i=0}}{u_{g2}} = \frac{H_0}{1 - \nu^2/\nu_0^2 + j2\xi\nu/\nu_0}, \quad (6)$$

où  $H_0$  est le niveau aux basses fréquences de la réponse  $H(\nu)$ ,  $\nu_0$  est la première fréquence de résonance de la membrane et  $\xi$  l'amortissement réduit de cette résonance.

La mesure des propriétés de résonance,  $\nu_0$  et  $\xi$ , de  $H(\nu)$  doit ainsi permettre de déduire les propriétés de la membrane, en particulier sa tension  $T_m$  et son amortissement  $\eta_m$ , susceptibles de varier en fonction de la température.

### 3 Résultats expérimentaux obtenus sous vide de 77 K à 300 K

#### 3.1 Influence de la température sur les propriétés mécaniques de la membrane

Le microphone utilisé ici est un microphone de mesure en champ libre de 1/4" (GRAS, modèle 40BF), polarisé à 50 V. Le microphone, chargé à l'arrière par un préamplificateur, et à l'avant par la grille d'entraînement est enfermé dans une enceinte close mise sous vide. L'ensemble est réglé en température à l'aide d'un bain à alcool ou d'un bain d'azote liquide ainsi que de plusieurs résistances chauffantes disposées en différents points du montage. Cette régulation permet de porter le système à des températures allant de 77 K à la température ambiante (environ 300 K). Plus de détails sur l'expérience réalisée sont disponibles dans la référence [13].

Jusqu'à présent, il a été possible d'effectuer des mesures jusqu'à 94 K. Les résultats expérimentaux présentés ici ont été obtenus durant des essais effectués en phase de mise au point et en vue d'éprouver fiabilité et la stabilité du dispositif de mesure. Ils sont, à ce titre, difficilement exploitables quantitativement dans leur globalité. Néanmoins, à titre d'exemples, quelques résultats de mesure obtenus pour  $u_r$  à plusieurs températures voisines sont représentés Figure 4.

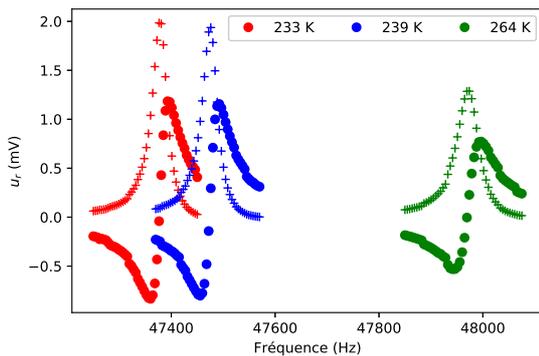


FIGURE 4 – Réponse d'un microphone 1/4" à la grille d'entraînement dans le vide à différentes températures (o partie réelle, + partie imaginaire).

Ces résultats montrent que la réponse de la membrane du microphone prend bien la forme attendue d'une fonction résonante, dont les paramètres pourraient être déduits d'une fonction d'interpolation ayant la forme donnée équation (6). Par ailleurs, il est visible que les propriétés de résonance de la membrane sont très sensibles à la température. Ainsi, entre 97 K et 280 K, la fréquence de résonance  $\nu_0$  de la membrane passe d'environ 45254 Hz à 48152 Hz, et son amortissement réduit  $\xi$  d'environ  $2 \times 10^{-4}$  à  $3 \times 10^{-5}$ .

#### 3.2 Impédances électriques du microphone et du préamplificateur

En admettant l'hypothèse communément admise que  $Z_e \gg Z_{eq}$ , le rapport  $Z_e/(Z_e + Z_{eq})$  de l'expression (4) est généralement considéré comme un simple facteur correctif ne présentant que de faibles variations en fonction de la fréquence. Ceci est largement vérifié si la résonance de

l'impédance électrique du microphone  $Z_{eq}$  est fortement amortie.

Cependant, les résultats obtenus ici (Fig. 5) montrent qu'à certaines températures la membrane du microphone dans le vide peut présenter un amortissement assez faible (de l'ordre de  $10^{-5}$ ) pour que la réponse  $u_{ri}$  du microphone à la tension insérée (§ 2.2) présente une résonance proche de celle de la membrane mais dépendant de l'impédance  $Z_e$ .

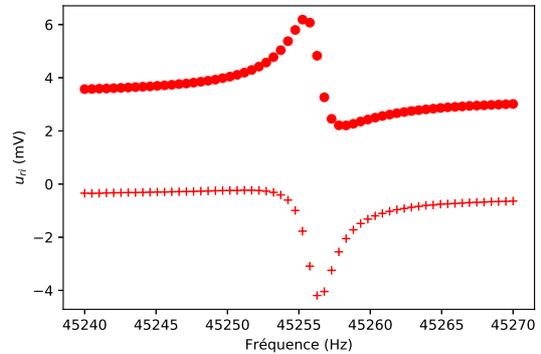


FIGURE 5 – Réponse d'un microphone 1/4" à la tension insérée dans le vide à 97 K (o partie réelle, + partie imaginaire).

L'impédance mécanique de la membrane n'intervient pas de la même façon dans l'expression de  $u_r$  et de  $u_{ri}$ , le microphone étant sollicité par une excitation mécanique dans le premier cas et électrique dans le deuxième. Il est donc naturel que la fonction résonante représentée Figure 5 prenne une forme sensiblement différente de celles représentées Figure 4, avec néanmoins des fréquences de résonance voisines.

Finalement, les résultats représentés Figure 5 illustrent bien la nécessité d'utiliser la technique de la tension insérée afin de déterminer la tension en sortie du microphone à circuit ouvert  $(u_r)_{i=0}$ . En effet, l'hypothèse couramment admise selon laquelle  $(u_r)_{i=0} \approx u_r$  conduirait ici à une erreur dans la détermination des propriétés de résonance de la membrane du microphone par analyse de sa réponse à la grille d'entraînement.

#### 3.3 Echauffement du préamplificateur et dérive en température du système

La procédure de mesure n'est pas instantanée et le préamplificateur chauffe durant l'acquisition de la réponse en fréquence du microphone pour chaque température de consigne. Les liens thermiques présents dans le montage étant manifestement insuffisants pour évacuer cette chaleur, la membrane du microphone chauffe en conséquence, ce qui entraîne une dérive en température en cours de mesure. Cette dérive reste faible car elle représente quelques dixièmes de degrés, cependant elle est suffisante pour décaler de manière significative la fréquence de résonance de la membrane entre les mesures de  $u_r$  et de  $u_{ri}$  en fonction de la fréquence. Ainsi, comme illustré Figure 6, les résultats obtenus pour le rapport  $u_r/u_{ri}$  présente deux résonances, la plus basse liée aux valeurs mesurées pour  $u_r$  et la plus haute à celles mesurées pour  $u_{ri}$ .

En conséquence, il est, à présent, nécessaire de modifier la procédure d'acquisition afin de réduire la durée des

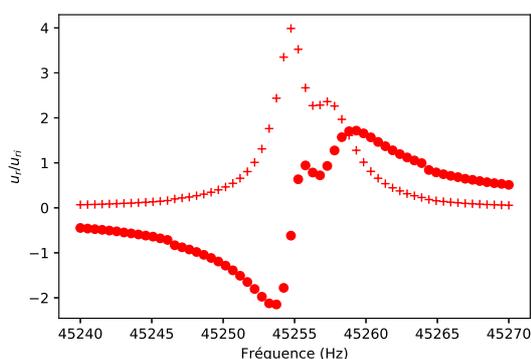


FIGURE 6 – Rapport des réponses d'un microphone 1/4" à la grille d'entraînement et à la tension insérée dans le vide à 97 K (o partie réelle, + partie imaginaire).

mesures et d'améliorer la régulation de température pour arriver à une plus grande stabilité thermique du système.

## 4 Conclusion

Le dispositif expérimental, relativement lourd, mis en œuvre ici pour déterminer l'effet de la température sur les propriétés électro-mécaniques d'un microphone dans le vide est aujourd'hui opérationnel. Il a permis de démontrer que microphone et préamplificateur fonctionnent en dessous de 100 K, ce qui n'avait pas encore été observé à notre connaissance. La grande sensibilité des propriétés de résonance d'une membrane de microphone à la température est visible sur les résultats obtenus jusqu'à présent.

Cependant, quelques difficultés techniques demeurent encore qui provoquent des dérives en températures du système. Ces difficultés doivent être levées afin de pouvoir effectuer une analyse quantitative des résultats de mesure. Ceci fait, les résultats expérimentaux obtenus dans le vide doivent être comparés à des modèles analytiques simples de membrane circulaire vibrante dans le vide. L'objectif d'une telle comparaison est principalement d'en déduire des fonctions d'interpolations pour la tension mécanique et l'amortissement structurel de la membrane en fonction de la température.

Par la suite, de telles fonctions d'interpolation pourront être utilisées afin d'analyser la réponse de microphones sous atmosphères d'hélium ou d'argon (gaz habituellement utilisés pour les thermomètres acoustiques primaires), à différentes pressions et températures statiques. Une telle analyse doit reposer sur de nouveaux modèles (en cours d'élaboration) décrivant le comportement global de microphones capacitifs couplés avec la couche de gaz entre la membrane et la grille d'entraînement [8–10].

Finalement, les résultats à prévoir pourront servir base pour la conception et la validation de nouveaux transducteurs acoustiques optimisés et dédiés à des applications spécifiques hors conditions atmosphériques, la thermométrie acoustique n'étant qu'un exemple.

## Références

[1] L. Pitre, F. Sparasci, L. Risegari, C. Guianvarc'h et al, New measurement of the Boltzmann constant k by

acoustic thermometry of helium-4 gas, *Metrologia* **54**, 6 (2017).

[2] M. R. Moldover, R. M. Gavioso, J. B. Mehl, L. Pitre, M. de Podesta, J. T. Zhang, Acoustic gas thermometry, *Metrologia* **51**, R1 (2014).

[3] International Electrotechnical Commission IEC 61094-6, *Measurement microphones, part 6 : Electrostatic actuators for determination of frequency response* (2004).

[4] D.R. Jarvis, The accuracy of the electrostatic actuator method of determining the frequency response of condenser microphones, *J. Sound Vib.* **123**, 63-70 (1988).

[5] C. Guianvarc'h, R. M. Gavioso, G. Benedetto, L. Pitre et M. Bruneau, Characterization of condenser microphones under different environmental conditions for accurate speed of sound measurements with acoustic resonators, *Rev. Sci. Instrum.* **80**, 074901 (2009).

[6] Z. Škvor, *Vibrating systems and their equivalent circuits*, Elsevier Science Publishers (1991).

[7] M. Bruneau, A.-M. Bruneau, Z. Škvor, P. Lotton, An equivalent network modelling the strong coupling between a vibrating membrane and a fluid film, *Acta Acustica* **2**, 223 (1994).

[8] T. Lavergne, S. Durand, N. Joly, M. Bruneau, Analytical Modeling of Electrostatic Transducers in Gases : Behavior of Their Membrane and Sensitivity, *Acta Acust. united Ac.* **100**, 440-447 (2014).

[9] P. Honzík, A. Podkovskiy, S. Durand, N. Joly, M. Bruneau, Analytical and numerical modeling of an axisymmetrical electrostatic transducer with interior geometrical discontinuity, *J. Acoust. Soc. Am.* **134** (5), 3573-3579 (2013).

[10] P. Honzík, M. Bruneau, Acoustic fields in thin fluid layers between vibrating walls and rigid boundaries : integral method, *Acta Acust. united Ac.* **101**, 859-862 (2015).

[11] International Electrotechnical Commission IEC, *Measurement microphones, part 2 : Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technic* (1992).

[12] C. Guianvarc'h, *La cavité de couplage acoustique dans la méthode de réciprocité : modèles analytiques pour l'étalonnage des microphones et la mesure d'impédances de petits composants*, Thèse de doctorat de l'Université du Maine (2005).

[13] T. Lavergne, L. Risegari, R.M. Gavioso, C. Guianvarc'h, P. Honzík, Dispositif expérimental pour la caractérisation de microphones capacitifs par grille d'entraînement en conditions contrôlées de gaz, pression et température, 14 ème Congrès Français d'Acoustique, Le Havre, 23-25 avril 2018.