

## CFA/VISHNO 2016

**Influence des conditions de gaz, pression et température sur le comportement mécano-acoustique de microphones capacitifs : caractérisation théorique et expérimentale**

C. Guianvarc'H<sup>a</sup>, L. Risegari<sup>a</sup>, P. Honzik<sup>b</sup>, N. Joly<sup>c</sup>, S. Durand<sup>c</sup>, D. Rodrigues<sup>d</sup>, R.M. Gavioso<sup>e</sup> et M. Bruneau<sup>c</sup>

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

<sup>b</sup>CTU in Prague, Faculty of Transportation Sciences, Department of Security Technologies and Engineering, Konviktská 20, 110 00 Praha 1, République tchèque

<sup>c</sup>LAUM - UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

<sup>d</sup>Lab. Commun de Métrologie LNE-Cnam, 29 Rue Roger Hennequin, 78190 Trappes, France

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



LE MANS

Les avancées récentes en terme de miniaturisation, de design et de modélisation de transducteurs acoustiques capacitifs, qu'ils soient utilisés en capteurs ou en sources, permettent d'envisager leur utilisation pour de nombreuses applications dépassant le seul cadre de l'acoustique aérienne audible. Parmi ces applications, la mesure de la température thermodynamique par méthode acoustique en cavité représente un enjeu majeur dans le cadre de la redéfinition de l'échelle internationale de températures. Dans cette méthode, la température thermodynamique est déduite de la mesure de la vitesse du son dans un gaz rare en cavité. Les transducteurs acoustiques utilisés comme capteurs et sources sont des microphones capacitifs du commerce conçus et optimisés pour des mesures en conditions atmosphériques. Il est donc nécessaire d'en caractériser le comportement global dans les conditions de travail propres à la thermométrie acoustique, voire de concevoir de nouveaux transducteurs dédiés. L'influence de la nature et de la pression du gaz sur le comportement acoustique de microphones capacitifs a été caractérisée précédemment grâce à la technique d'étalonnage relative par grille d'entraînement. Si les résultats expérimentaux obtenus présentent un accord satisfaisant avec ceux issus des modèles disponibles, ils en montrent également les limites. L'objet du présent travail est de compléter l'étude précédente par une caractérisation expérimentale du comportement mécano-acoustique de microphones capacitifs sur une large gamme de températures (77 K – 300 K) et par l'élaboration de nouveaux modèles analytiques et numériques d'une capsule microphonique, couplée ou non à une grille d'entraînement. Les retombées à prévoir sont, entre autres, la mise au point de bases solides pour concevoir des transducteurs acoustiques dédiés à des applications hors conditions atmosphériques et l'amélioration de techniques d'étalonnage de microphones.

## 1 Introduction

Les techniques de thermométrie acoustique pour mesurer la température thermodynamique d'un gaz ont progressé de manière déterminante ces dernières années, notamment pour la détermination de la constante de Boltzmann [1, 2, 3]. A présent, ces techniques doivent être mises en œuvre pour mesurer la température thermodynamique sur une large gamme en vue de la mise en pratique de cette nouvelle échelle de températures.

Pour y parvenir, un des facteurs limitants reste encore l'utilisation de microphones capacitifs du commerce (capteurs et sources) qui sont à l'origine conçus pour une utilisation en conditions atmosphériques. Si ils fonctionnent et ont déjà conduit à d'excellents résultats dans de l'hélium ou de l'argon à différentes pressions statiques et à des températures inférieures à la température ambiante, ils ne sont cependant pas optimisés pour une utilisation dans toutes les conditions de gaz, pressions et températures propres à la thermométrie acoustique. En plus d'être relativement fragiles dans ces conditions particulières, ils ne permettront pas, à l'avenir, de réduire les dimensions de thermomètres acoustiques, ce qui présenterait pourtant de grands avantages, en particulier pour leur thermalisation.

Les valeurs données par le fabricant pour caractériser le comportement mécano-acoustique de microphones capacitifs sont déterminées en conditions atmosphériques. Elles ne permettent donc pas de prévoir le comportement exact d'un microphone implanté dans un thermomètre acoustique dédié, par exemple, aux basses et très basses températures (de l'ordre de quelques K), ce comportement étant étroitement lié à la nature et la pression du gaz, ainsi qu'à la température du gaz et du matériau. En tout état de cause, de tels transducteurs ne sont pas optimisés pour toutes conditions ambiantes.

Il en résulte un besoin de transducteurs acoustiques dont le comportement est bien caractérisé dans des conditions de travail déterminées (température, nature et pression du gaz), voire idéalement de transducteurs acoustiques dédiés à ces applications spécifiques, hors conditions atmosphériques.

Une étude menée précédemment [13] avait pour objectif de caractériser expérimentalement l'influence de la nature et de la pression du gaz sur le comportement acoustique

de microphones capacitifs du commerce (Brüel & Kjør) couramment utilisés en thermométrie acoustique. Ainsi, la réponse en fréquence de microphones de mesure a été mesurée dans une enceinte close remplie d'hélium ou d'argon gazeux à des pressions allant du vide (inférieur à 1 Pa) à 800 kPa, à la température unique de 273,16 K. Les résultats expérimentaux obtenus ont été analysés au regard de modèles physiques (analytiques) de microphones capacitifs alors disponibles [4, 5]. L'excellent accord qualitatif entre les résultats expérimentaux et ceux prévus par ces modèles a permis de montrer pour la première fois leur validité hors conditions atmosphériques.

Cependant, si ils sont encourageants, ces résultats restent encore à compléter, tout d'abord par des mesures portant sur l'influence de la température sur les propriétés mécano-acoustiques de microphones capacitifs. D'autre part, les modèles actuellement disponibles ne permettent par encore de décrire le comportement global d'une capsule microphonique couplée au dispositif permettant de mesurer sa réponse en fréquence (grille d'entraînement), quand bien même ces couplages pourraient être significatifs, notamment dans des gaz à haute densité. Ces modèles doivent donc également être complétés. De récentes avancées pour la modélisation de capsules microphoniques [6, 7, 8] semblent aujourd'hui susceptibles d'apporter des réponses adaptées à ce besoin, aussi bien à l'aide de développements analytiques ou que de modélisation par éléments finis (FEM) [9, 10].

Un rappel des méthodes et techniques employées pour obtenir les derniers résultats expérimentaux disponibles, ainsi qu'une analyse critique de ces résultats sont présentés dans le paragraphe 2 afin d'en montrer les perspectives aussi bien que les limites. Les principes sur lesquels reposent les modèles associés par le passé à ces mesures ainsi que ceux en cours de préparation pour une nouvelle analyse sont ensuite décrits (§ 3). Enfin, une présentation de l'expérience en cours de préparation pour caractériser l'influence de la température sur le comportement de microphones est proposée au paragraphe 4. Une telle expérience doit conduire à une validation des modèles actuels et en cours d'élaboration, qui pourraient alors constituer de nouvelles bases pour la conception de transducteurs capacitifs dédiés à des applications spécifiques, y compris hors conditions atmosphériques.

## 2 Influence de la nature et de la pression du gaz sur le comportement de microphones capacitifs

### 2.1 Méthode de la grille d'entraînement pour l'étalonnage relatif de microphones capacitifs

La grille d'entraînement est un dispositif bien connu et facile à mettre en œuvre pour effectuer un étalonnage relatif de microphones capacitifs, c'est-à-dire pour en mesurer la réponse en fréquence [11, 12, 13]. Cette technique, qui nécessite assez peu d'équipements spécifiques, est très couramment utilisée en laboratoires de métrologie et chez certains utilisateurs pour déterminer la réponse en fréquence de microphones de mesure.

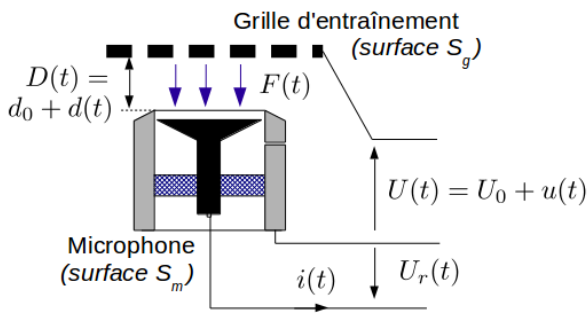


FIGURE 1 – Etalonnage relatif d'un microphone capacitif par grille d'entraînement.

Comme représenté Figure 1, la grille est placée en face, à une distance  $d_0$  (de l'ordre du millimètre) de la membrane du microphone à caractériser. Une tension électrique oscillante  $U(t) = U_0 + u(t)$  est appliquée entre la grille et la membrane afin d'exercer sur celle-ci une force électrostatique, également oscillante,

$$F(t) = F_0 + f(t) = \frac{\epsilon S_g}{2D(t)^2} (U_0 + u(t))^2, \quad (1)$$

où  $\epsilon$  est la constante diélectrique du gaz.

La force oscillante  $f(t)$  d'origine électrostatique simule sur la membrane une pression  $p = S_m f(t)$  supposée uniforme. La mise en vibration de la membrane génère en sortie du microphone une tension électrique  $U_r(t) = U_{r0} + u_r(t)$ , mesurée à travers un préamplificateur d'impédance électrique d'entrée  $Z_e$ . La réponse à circuit ouvert  $(u_r)_{i=0}$  du microphone à la grille d'entraînement peut-être mesurée avec la technique de la tension insérée [15]. Elle représente sa réponse à une pression acoustique uniforme et elle est directement liée à sa sensibilité  $\sigma$  :

$$\left(\frac{u_r}{u}\right)_{i=0} = -\frac{\epsilon U_0 S_g}{d_0^2 S_m} \sigma \frac{Z_a}{Z_a + Z_L}, \quad (2)$$

où  $Z_a$  et  $Z_L$  sont respectivement les impédances acoustiques du microphone et de l'espace entre la membrane et la grille, ce qui donne, en supposant  $Z_a \gg Z_L$ ,

$$\left(\frac{u_r}{u}\right)_{i=0} = -\frac{\epsilon U_0 S_g}{d_0^2 S_m} \sigma, \quad (3)$$

Ainsi, l'utilisation de cette expression admet que la couche de gaz entre la grille et la membrane a une influence négligeable sur le comportement acoustique du microphone lorsque celui-ci est couplé à la grille d'entraînement, ce qui est a priori le cas en conditions atmosphériques.

Cette méthode n'est envisagée actuellement que comme une méthode d'étalonnage relative et non pas absolue car la distance  $d_0$  dans l'expression (3) ne peut être connue avec une précision suffisante.

### 2.2 Influence des conditions de gaz et de pression sur la réponse de microphones à la grille d'entraînement

Cette technique est bien adaptée et a déjà été utilisée par le passé pour déterminer l'effet des conditions ambiantes sur les propriétés acoustiques de microphones capacitifs [14, 13].

Une étude expérimentale menée en 2008 [13] avait pour objectif de caractériser l'influence de la nature et de la pression du gaz sur les propriétés de microphones 1/4" du commerce (Brüel & Kjær). L'objectif était de valider les modèles alors disponibles pour calculer l'impédance acoustique de microphones utilisés pour la mesure de la constante de Boltzmann en cavités remplies d'hélium ou d'argon gazeux à différentes pressions statiques (de 25 à 800 kPa) et à la température du point triple de l'eau (273,16 K).

La réponse à la grille d'entraînement des microphones étudiés a été mesurée dans une enceinte pressurisée, remplie d'argon ou d'hélium pur, et dont la température était régulée à 273 K. La technique de l'insertion de tension n'a pas été utilisée pour éliminer l'impédance électrique du préamplificateur, monté directement sur le microphone.

Les résultats alors obtenus pour un même microphone sont représentés Figures 2 et 3.

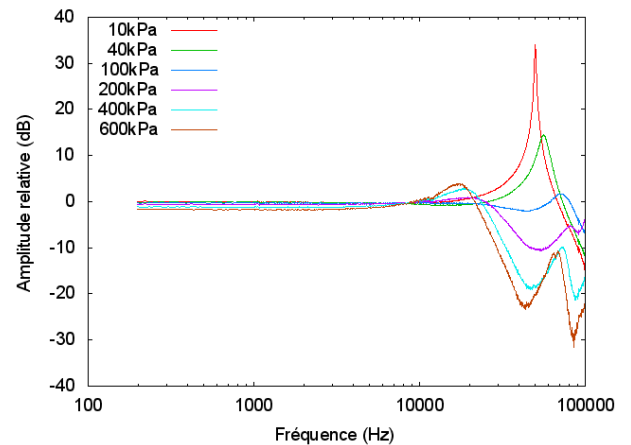


FIGURE 2 – Réponse d'un microphone 1/4" (amplitude en valeurs relatives) à la grille d'entraînement dans de l'argon gazeux à 273 K pour différentes pressions statiques.

Ces résultats montrent l'influence significative de la nature et de la pression du gaz sur la réponse du microphone à la grille d'entraînement, en particulier sur ses propriétés de résonance (comme attendu, l'amortissement augmente avec la densité du gaz). Les valeurs mesurées ici ne sont néanmoins pas représentatives de la réponse en fréquence du microphone seul car ils dépendent aussi du préamplificateur utilisé et de la couche de gaz entre la membrane et la grille.

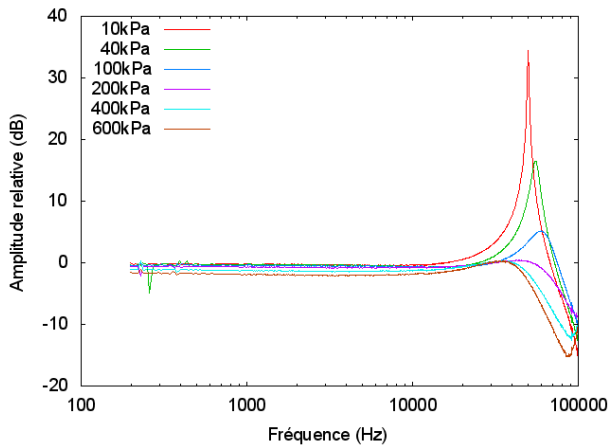


FIGURE 3 – Réponse d'un microphone 1/4'' (amplitude en valeurs relatives) à la grille d'entraînement dans de l'hélium gazeux à 273 K pour différentes pressions statiques.

L'impédance électrique du préamplificateur étant a priori indépendante de la nature et de la pression du gaz dans lequel il est utilisé, les différences entre toutes les courbes Fig. 2 et 3 ne doivent pas être liées à celle-ci.

Cependant, même si l'impédance de la couche de gaz entre la membrane et la grille est vraisemblablement faible, il est évident qu'elle varie au même titre que les propriétés acoustiques du microphone en fonction de la nature et de la pression du gaz. Ainsi, les résultats précédents illustrent les effets du gaz et de sa pression, non pas sur le comportement acoustique d'un microphone, mais sur celui d'un microphone couplé à une grille d'entraînement.

### 2.3 Réponse d'une membrane de microphone dans le vide à la grille d'entraînement

L'excitation de la membrane par la grille d'entraînement n'étant pas d'origine acoustique, mais électrostatique, cette technique permet également de mesurer sa réponse en fréquence dans le vide.

La tension électrique alors mesurée en sortie du microphone prend la forme d'une fonction de type lorentzienne centrée sur la fréquence de résonance de la membrane et dont la largeur à mi-hauteur dépend de son amortissement structural. Les résultats expérimentaux obtenus pour deux types de microphones 1/4'', dont les membranes présentent des caractéristiques très différentes, sont représentés Figures 4 et 5.

A dimensions géométriques égales, un microphone à réponse en champ libre doit avoir une fréquence de résonance plus basse que celle d'un microphone à réponse en pression. Les fabricants obtiennent ce résultat en utilisant des membranes plus ou moins fines et tendues (Tab. 1).

Les propriétés de résonance des membranes peuvent être déterminées avec une faible incertitude à l'aide d'un algorithme de régression non linéaire. Comme attendu, ici, la fréquence de résonance de la membrane du microphone à réponse en champ libre est plus basse (45567 Hz) que celle du microphone à réponse en pression (47768 Hz).

Ces propriétés de résonance sont individuelles pour chaque microphone, les valeurs indiquées dans le Tableau 1 n'étant que des valeurs typiques données par le constructeur. La tension mécanique d'une membrane est susceptible

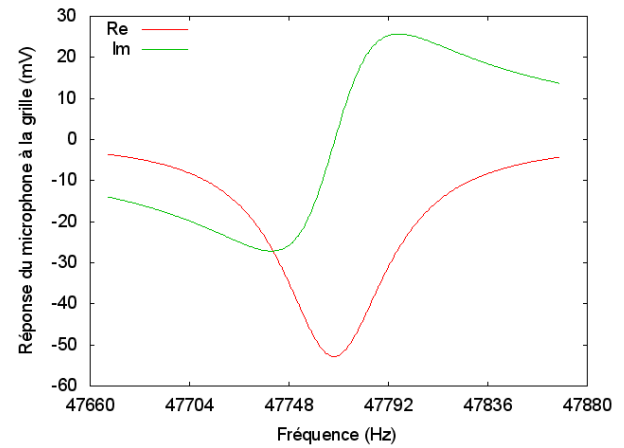


FIGURE 4 – Réponse (partie réelle et imaginaire) d'un microphone 1/4'' pression à la grille d'entraînement dans le vide à 273 K.

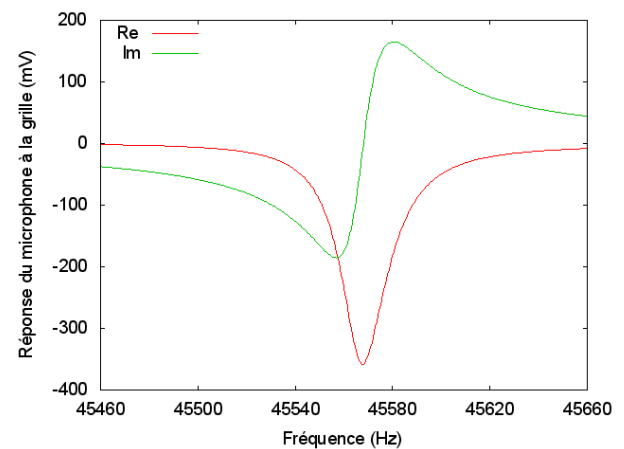


FIGURE 5 – Réponse (partie réelle et imaginaire) d'un microphone 1/4'' champ libre à la grille d'entraînement dans le vide à 273 K.

de dériver dans le temps et de varier en fonction de sa température. De plus, en pratique, elle est augmentée par la tension de polarisation appliquée au microphone (tension continue  $U_{r0}$ , éq. 3). Ainsi, les résultats des Fig. 4 et 5 présentent un intérêt particulier pour déterminer les propriétés des membranes de microphones en conditions de fonctionnement.

Ici, en supposant que les valeurs pour la densité et l'épaisseur des membranes sont celles du Tableau 1, la tension mécanique trouvée pour le microphone à réponse en pression est 3594 N/n, et 1106 N/m pour le microphone à réponse en champ libre. Les ordres de grandeurs restent cohérents avec les valeurs typiques, cependant ces valeurs peuvent être remises en question car les résultats expérimentaux sur lesquelles elles reposent dépendent de l'impédance électrique du préamplificateur.

## 3 Modèles pour l'analyse des résultats

Les résultats expérimentaux obtenus jusqu'à présent [13] ont été analysés à l'aide des modèles alors disponibles pour décrire le comportement mécano-acoustique de microphones capacitifs [4, 5]. Les résultats théoriques et expérimentaux présentent un très bon accord qualitatif, ce qui en démontre

Type de microphone	Pression	Champ libre
Rayon de la membrane	2 mm	
Rayon de l'électrode	1,75 mm	
Espace inter-électrode	18 $\mu\text{m}$	
Tension de la membrane	3128 N/m	1039 N/m
Densité de la membrane	8300 kg/m <sup>3</sup>	
Épaisseur de la membrane	6,95 $\mu\text{m}$	2,25 $\mu\text{m}$
Volume arrière (estimé, )	8 mm <sup>3</sup>	

TABLEAU 1 – Paramètres structuels de microphones capacitifs 1/4" (Brüel & Kjær) à réponse en pression (type 4938) et en champ libre (type 4938).

la validité hors conditions atmosphériques. Cependant, les limitations mentionnées précédemment (§2.2) ne permettent pas d'en faire une analyse quantitative.

Une nouvelle analyse plus pertinente nécessite la mise au point de nouveaux modèles pour décrire le comportement mécano-acoustique global d'une capsule microphonique soumise à une grille d'entraînement afin de tenir compte de manière unifiée des couplages entre le mouvement de la membrane, chargée d'un côté par l'espace inter-électrode et le volume arrière, et de l'autre par la couche de fluide entre la membrane et la grille (percée de trous).

Le modèle analytique en cours d'élaboration repose sur l'utilisation de la méthode intégrale pour exprimer la pression acoustique dans la couche de fluide qui charge le mouvement de la membrane [8]. Ce formalisme permet d'accéder à une précision équivalente à celle obtenue par une théorie modale [16, 6, 7], tout en évitant certaines difficultés, notamment la prise en compte du couplage de modes de Dirichlet (membrane à bord fixe) et de Neumann (frontière rigide à la périphérie du fluide).

Dans le cas d'un microphone de mesure couplé à une grille d'entraînement, les deux côtés de la membrane sont chargés par une couche mince du fluide, chaque couche étant couplée soit avec le volume arrière du microphone par la fente périphérique et éventuellement les trous dans l'électrode, soit avec l'espace avant (supposé infini) par les trous dans la grille. Des sources de vitesse particulière passant par chaque trou permet de tenir compte de leur présence. La position de chaque trou est fixée par une fonction de Dirac [6].

La solution de l'équation usuelle pour le déplacement de la membrane couplée avec la pression acoustique dans les deux couches de fluide est cherchée sous la forme d'un développement sur les fonctions propres de Dirichlet. L'équation de propagation pour la pression acoustique, avec un nombre d'onde complexe prenant en compte les pertes thermo-visqueuses et avec les termes sources comprenant le déplacement de la membrane et vitesses particulières liés aux trous, est résolue à l'aide de la méthode intégrale en utilisant une fonction de Green qui n'est pas exprimée sous la forme d'un développement sur les fonctions propres.

## 4 Influence de la température sur le comportement mécano-acoustique d'un microphone capacitif

Compte tenu des limites des travaux effectués jusqu'à présent ainsi que des contraintes liées à la thermométrie acoustique, il est, à présent, nécessaire de compléter les données expérimentales disponibles par une nouvelle caractérisation de l'influence de la température sur le comportement mécano-acoustique de microphones capacitifs.

L'expérience en cours de montage (Fig. 6) pour ce faire repose sur des principes et techniques identiques à celle réalisée précédemment pour étudier l'influence de la nature et de la pression du gaz sur les propriétés acoustique de microphones capacitifs [13].

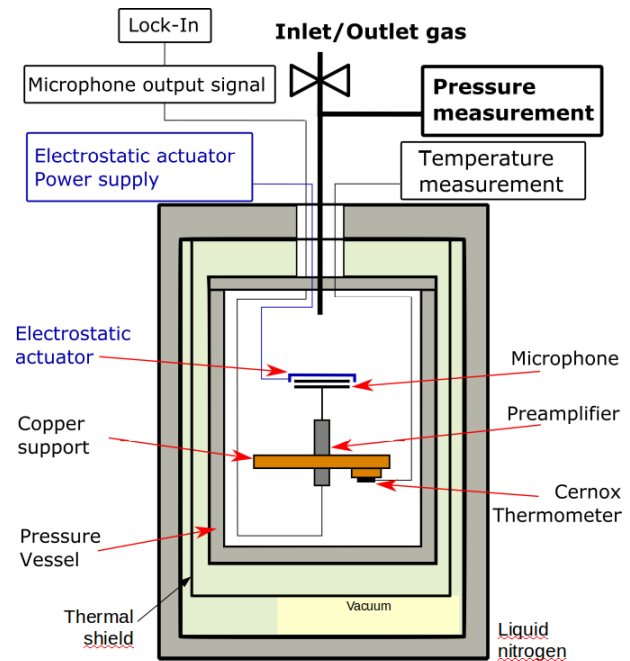


FIGURE 6 – Vue schématique de l'expérience en cours de montage pour déterminer l'influence de la température sur le comportement mécano-acoustique de microphones capacitifs.

Un microphone de mesure du commerce à réponse en champ libre (GRAS, type 40BF) et son préamplificateur sont installés avec une grille d'entraînement dans une enceinte pressurisée remplie d'hélium à pression et température contrôlées. La régulation de température permet de faire varier la température dans l'enceinte de 77 K à 300 K. Des liens thermiques en cuivre permettent de dissiper la chaleur produite par le préamplificateur. Afin de contrôler la présence d'éventuels gradients de température, celle-ci est mesurée sur l'enceinte et au contact du préamplificateur, lui-même directement connecté au microphone.

L'impédance électrique  $Z_e$  du préamplificateur est susceptible de varier en fonction de sa température. Il est donc indispensable ici de mesurer la réponse à circuit ouvert du microphone à l'aide de la technique de la tension insérée. De la sorte, les résultats expérimentaux ne doivent pas dépendre de la valeur de  $Z_e$ .

Il est prévu de mesurer la réponse du microphone à la grille d'entraînement pour différentes températures

de 77 K à 300 K. Des mesures dans le vide (1 à 0,1 Pa) permettront, dans un premier lieu, de déterminer l'influence de la température sur les propriétés mécaniques de la membrane (tension, amortissement structurel). Le comportement mécano-acoustique du microphone couplé à la grille d'entraînement sera ensuite étudié de la même façon, dans de l'hélium gazeux à une pression d'environ 100 à 200 kPa. Les résultats ainsi obtenus seront analysés au regard des modèles actuellement en cours d'élaboration (§3).

## 5 Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus précédemment [13] concernant l'influence de la nature et de la pression du gaz sur le comportement acoustique d'un microphone capacitif ont déjà montré la validité des modèles disponibles pour décrire une capsule microphonique seule. La méthode de la grille d'entraînement utilisée pour effectuer ces mesures permet, en outre, de réaliser une caractérisation du comportement de la membrane vibrante seule, et d'en déduire ses paramètres structurels individuels en conditions de fonctionnement (microphone polarisé).

Une analyse quantitative pertinente de ces résultats nécessite cependant de disposer d'un modèle complet du dispositif expérimental, composé d'une capsule microphonique couplée à la couche de fluide entre la membrane et la grille d'entraînement, elle-même percée de trous. D'autre part, les résultats expérimentaux disponibles demandent à être complétés par une caractérisation du comportement mécano-acoustique d'un microphone seul en fonction de la température.

Les résultats attendus de ces travaux en cours pourront servir base pour, à l'avenir, concevoir, réaliser et valider de nouveaux transducteurs acoustiques (capteurs et sources) optimisés et dédiés à des applications spécifiques hors conditions atmosphériques, dont la thermométrie acoustique n'est qu'un exemple. Ils doivent, de plus, constituer une avancée significative dans la compréhension de la technique de la grille d'entraînement, très largement utilisée pour l'étalonnage relatif de microphones de mesure.

## Références

- [1] L. Pitre, F. Sparasci, D. Truong et al, Determination of the Boltzmann constant  $k$  from the speed of sound in helium gas at the triple point of water, *Metrologia* **52**, S263 (2015).
- [2] R. M. Gavioso, D. Madonna Ripa, P. P. M. Steur, C. Gaiser, D. Truong, C. Guianvarc'h, P. Tarizzo, F. M. Stuart, R. Dematteis, A determination of the molar gas constant  $R$  by acoustic thermometry in helium, *Metrologia* **52**, S274 (2015).
- [3] M. R. Moldover, R. M. Gavioso, J. B. Mehl, L. Pitre, M. de Podesta, J. T. Zhang, Acoustic gas thermometry, *Metrologia* **51**, R1 (2014).
- [4] Z. Škvor, *Vibrating systems and their equivalent circuits*, Elsevier Science Publishers (1991).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] N. Joly, M. Bruneau et R. Bossart, Coupled Equations for Particle Velocity and Temperature Variation as the Fundamental Formulation of Linear Acoustics in Thermo-Viscous Fluids at Rest, *Acta Acustica united with Acustica* **92** : 202-209 (2006).
- [10] N. Joly, Finite Element Modeling of Thermoviscous Acoustics on Adapted Anisotropic meshes : Implementation of the Particle Velocity and Temperature Variation Formulation, *Acta Acustica united with Acustica* **95** : 102-114 (2009).
- [11] International Electrotechnical Commission IEC 61094-6, *Measurement microphones, part 6 : Electrostatic actuators for determination of frequency response* (2004).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] K. Rasmussen, The Influence of Environmental Conditions on the Pressure Sensitivity of Measurement Microphones, *Metrologia* **36**, 265 (1999).
- [15] International Electrotechnical Commission IEC, *Measurement microphones, part 2 : Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technic* (1992).
- [16] J. Zuckerwar, Theoretical response of condenser microphones, *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 1278-1285 (1978).