

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



**Dispositif expérimental pour la caractérisation de microphones  
capacitifs par grille d'entraînement en conditions contrôlées de gaz,  
pression et température**

T. Lavergne<sup>a</sup>, L. Risegari<sup>a</sup>, R. Gavioso<sup>b</sup>, C. Guianvarc'H<sup>a</sup> et P. Honzik<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>Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Strada delle Cacce 91, 10135 Turin, Italie

<sup>c</sup>Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences, Konviktská 20, 110 00 Praha  
1, République tchèque  
t.lavergne@gmail.com

Les microphones capacitifs sont d'ordinaire utilisés dans l'air en conditions atmosphériques, et leur comportement y est bien connu et prédictible. Cependant, certaines applications requièrent aujourd'hui l'usage de transducteurs capacitifs (capteurs et sources) dans des conditions parfois très éloignées de celles atmosphériques, et pour lesquelles leur comportement reste encore méconnu. Le dispositif expérimental présenté ici a pour but de caractériser le comportement de microphones capacitifs dans différentes conditions contrôlées de gaz, pressions et températures. Il repose sur la technique de la grille d'entraînement qui permet de mesurer la réponse en fréquence d'un microphone à une excitation d'origine électrostatique. L'ensemble "grille-microphone-préamplificateur" est placé à l'intérieur d'une enceinte hermétique, sous vide ou remplie de gaz noble (hélium, argon) à pression contrôlée entre 1 Pa et 200 kPa. L'enceinte est immergée dans un bain d'alcool/eau thermostaté ou d'azote liquide, et le système est équipé de plusieurs thermomètres et résistances chauffantes afin d'en assurer la stabilité et l'uniformité thermique sur une gamme d'environ 100 K à 300 K. L'utilisation de câbles longs et de passages étanches, inévitables ici, implique d'importants effets de diaphonie, qui sont éliminés en travaillant sans polarisation sur la grille d'entraînement, c'est-à-dire en exploitant uniquement son fonctionnement non-linéaire. La technique de l'insertion de tension permet d'éliminer l'impédance électrique du préamplificateur de la réponse du microphone à la grille d'entraînement et ainsi de déterminer sa réponse en fréquence à circuit ouvert. Enfin, le travail sous vide et en gaz léger peut favoriser l'apparition d'arcs électriques lors des mesures, un circuit permettant de réduire la tension de polarisation du microphone a donc été adjoint à son conditionnement. Un tel banc de mesure peut servir de base pour la caractérisation de nouveaux transducteurs capacitifs dédiés à des utilisations spécifiques, hors conditions atmosphériques.

## 1 Introduction

Le comportement des microphones capacitifs est bien connu et prédictible de manière théorique et expérimentale lorsqu'ils sont utilisés en conditions atmosphériques. Cependant, peu d'études se sont consacrées à caractériser leur comportement dans des conditions d'utilisation éloignées de celles-ci, que ce soit d'un point de vue théorique [1–3] ou expérimental [4, 5]. Or, aujourd'hui, bien que les microphones capacitifs se trouvent être utilisés dans des conditions de gaz, pression et température parfois très éloignées de celles pour lesquelles ils ont été conçus, ils s'avèrent néanmoins être un outil de mesure avantageux, notamment en ce qui concerne la thermométrie acoustique, que ce soit pour leur robustesse, leur sensibilité ou encore leur stabilité dans le temps. Cependant, bien que des modèles analytiques ou numériques existent, il reste encore nécessaire de valider leurs prédictions d'un point de vue expérimental. C'est pourquoi le dispositif de mesure présenté ici a été conçu, afin d'offrir une base de données expérimentales, en conditions contrôlée de gaz, pression et température avec une bonne connaissance de l'ensemble de la chaîne de mesure, permettant ainsi de valider les modèles existants ainsi que pour les modèles futurs.

## 2 Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est représenté sur la Figure 1. Une grille d'entraînement est placée au-dessus de la membrane du microphone, celui-ci étant vissé sur son préamplificateur qui est fixé au centre d'un support en cuivre et dont il est isolé électriquement afin d'éviter tout problème de boucle de masse. L'ensemble "grille-microphone-préamplificateur" est par ailleurs enfermé dans une enceinte hermétique qui est munie de passages étanches pour les câbles électriques ainsi que de raccords et de vannes pour la régulation de pression.

**La technique de la grille d'entraînement** permet de mesurer la réponse en fréquence d'un microphone capacitif. Son principe repose sur le fait de simuler une

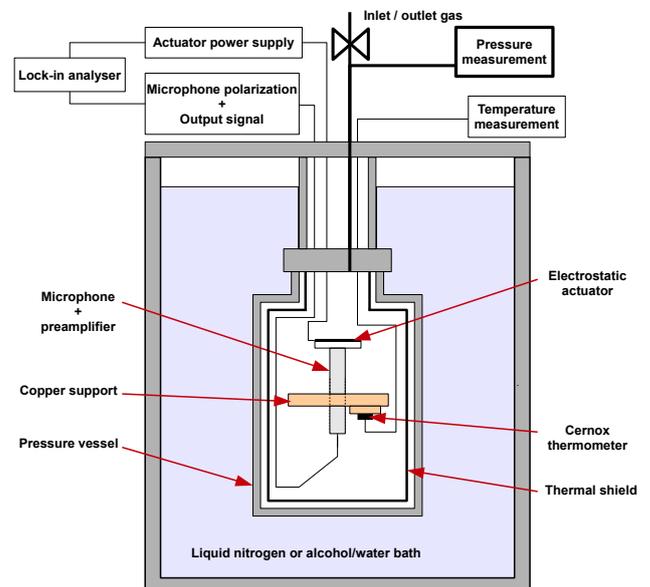


FIGURE 1 – Schéma du dispositif expérimental.

pression acoustique en produisant une force  $F$  d'origine électrostatique répartie uniformément sur toute la surface de la membrane et qui est créée en appliquant une tension  $U$  entre la grille et la membrane séparées d'une distance  $d$  (cf. Figure 2).

Ainsi, la pression instantanée équivalente  $p(t)$  exercée sur la membrane peut s'écrire [6] :

$$p(t) = \frac{F}{S_m} = -\frac{\epsilon_{\text{gaz}} S_g}{2d^2 S_m} U(t)^2, \quad (1)$$

où  $\epsilon_{\text{gaz}}$  est la permittivité du gaz entre la grille et la membrane,  $S_m$  la surface de la membrane et  $S_g$  la surface effective de la grille (c'est-à-dire la surface de grille en regard de la membrane du microphone). Dans le cas où la tension d'excitation  $U$  est la superposition d'une tension sinusoïdale  $u_g$  (de fréquence  $f$ ) avec une tension de polarisation continue  $U_0$ , la membrane est soumise à une pression équivalente  $p(t)$  oscillant à la fréquence fondamentale  $f$ . Dans le cas la grille n'est pas polarisée ( $U_0 = 0$ ), la pression équivalente

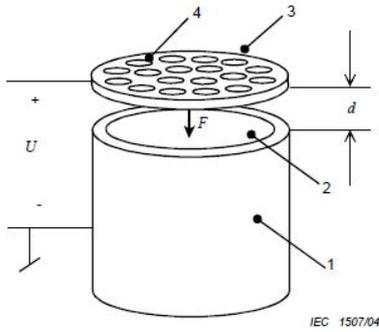


FIGURE 2 – Force électrostatique générée entre la grille d'entraînement et la membrane de microphone par une tension d'excitation  $U(t)$ . Légende : (1) Boîtier du microphone ; (2) Membrane du microphone de surface  $S_m$  ; (3) Grille d'entraînement de surface effective  $S_g$  ; (4) Perforations de la grille. [6]

$p(t)$  oscille à la fréquence  $2f$ . C'est cette configuration qui a été retenue pour l'expérience réalisée ici. En effet, ceci permet de se prémunir des effets de diaphonie entre le signal électrique d'excitation et la tension en sortie du préamplificateur rencontrés du fait de l'utilisation de câbles longs et des passages étanches. Cependant, cette méthode présente l'inconvénient de produire une excitation  $p(t)$  de faible amplitude, ce qui implique des contraintes sur le choix de l'instrumentation de mesure.

**La technique de l'insertion de tension** consiste à appliquer une tension (d'amplitude et de fréquence choisies) entre la membrane et l'électrode arrière d'une capsule microphonique. Ainsi, cette technique permet d'une part d'accéder à la sensibilité en circuit ouvert des capsules microphoniques, et d'autre part de vérifier la sensibilité électrique du système de mesure, préamplificateur et câbles compris [4, 7].

**La régulation de la température** est assurée par un régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé). Pour ce faire, la température est mesurée à l'intérieur de l'enceinte hermétique qui est placée dans un bain d'azote liquide ou un bain d'alcool/eau thermostaté (selon la gamme de température) et le régulateur PID délivre, à partir de la différence entre la température consigne et la mesure, un signal de commande qui alimente des résistances chauffantes placées sur le support en cuivre (Figure 1). Le dispositif est doté de trois sondes de température (reliées au multimètre avec un montage à quatre fils) : une sonde à résistance de platine Pt100 est fixée sur le préamplificateur, une seconde Pt100 est placée sur le support et une thermistance Cernox est placée sous le support. La thermistance Cernox étant placée plus près des résistances chauffante, c'est celle-ci qui est utilisée pour réguler la température afin d'avoir une constante de temps la plus faible possible. À noter que la sonde Pt100 fixée sur le préamplificateur n'est pas étalonnée, elle est employée pour contrôler les échauffements du préamplificateur en cours de mesure.

**La régulation de la pression** est également assurée par un régulateur PID en contrôlant un débitmètre (à noter que ce débitmètre sert ici uniquement à réguler le débit et non à le

mesurer). Un premier débitmètre (FM1), relié à une bouteille d'hélium ou d'argon, apporte un flux constant de gaz à l'intérieur de l'enceinte hermétique par le biais de tubes capillaires (cf. Figure 3). C'est le second débitmètre (FM2), qui relie l'intérieur de l'enceinte à une pompe à vide, qui est commandé par le régulateur PID en fonction de la pression de consigne et de la pression mesurée dans l'enceinte.

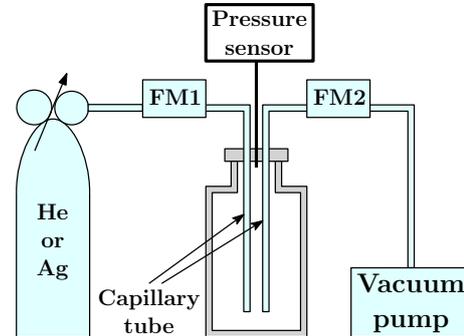


FIGURE 3 – Schéma synthétique de la régulation en pression.

Pour effectuer des mesures à des températures inférieures à  $0^\circ\text{C}$ , il est primordial qu'il ne reste pas d'air et/ou de vapeur d'eau dans le système. C'est pourquoi l'enceinte est mise sous vide avant toute descente en température.

Même si l'objectif est pour le moment d'effectuer des mesures sous vide, il peut être nécessaire ponctuellement d'introduire du gaz dans l'enceinte lors de changements importants de température de manière à accélérer la thermalisation de l'ensemble.

### 3 Principe de l'expérience et matériel utilisé

**Le principe de l'expérience** repose sur deux modes de mesure, le mode direct lors duquel la réponse à la grille d'entraînement du microphone et de son préamplificateur est mesurée, et le mode insertion lors duquel la sensibilité électrique du système est mesurée. Le passage d'un mode à l'autre est assuré par deux relais (représentés au centre de la Figure 4) pilotés par connexion USB via un microcontrôleur Arduino.

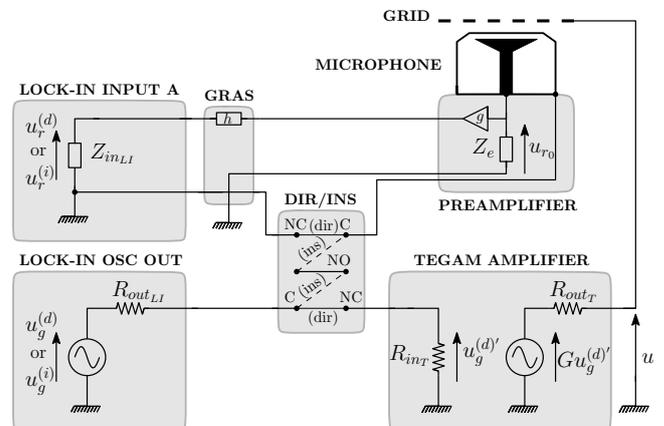


FIGURE 4 – Schéma électrique du montage.

**Le microphone** utilisé ici, un 1/4" de mesure à réponse en champ libre GRAS 40BF, est connecté au **préamplificateur** GRAS type 26AN qui est spécialement conçu pour permettre l'insertion de tension. Étant donné qu'il n'existe aucune grille d'entraînement adaptée aux microphones 1/4", il est nécessaire d'utiliser, conformément à la norme [6], une grille pour microphone 1/2" du type B&K UA0033 ainsi qu'un adaptateur pour microphone 1/4". En conséquence, la surface effective de la grille reste faible en comparaison de la surface de la membrane (cf. Figure 5), ce qui peut remettre en question l'hypothèse d'une force électrostatique uniformément répartie sur toute sa surface.

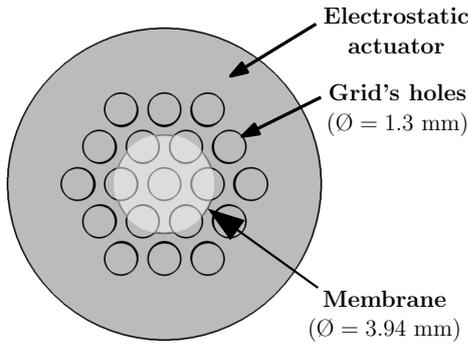


FIGURE 5 – Représentation de la surface effective de la grille par rapport à la surface de la membrane.

**Un amplificateur à détection synchrone** (*Lock-In amplifier* model 7230 de Ametek) est ici utilisé à la fois pour générer les tensions d'excitation  $u_g^{(d)}$  en mode direct et  $u_g^{(i)}$  en mode insertion, et également pour mesurer les tensions  $u_r^{(d)}$  et  $u_r^{(i)}$  (en modes direct et insertion respectivement) en sortie du module de puissance GRAS type 12AA. L'utilisation d'une détection synchrone est nécessaire ici pour mesurer des signaux de faible amplitude et bruités. Le principe consiste à fournir à l'appareil de mesure un signal de référence  $V_{ref}$  à la même fréquence que le signal mesuré et d'en faire le produit. Ce principe est représenté sur la Figure 6 pour un signal mesuré  $V_{in} = A \cos(\omega t + \varphi)$  afin d'en obtenir les parties réelle  $X$  et imaginaire  $Y$  [8].

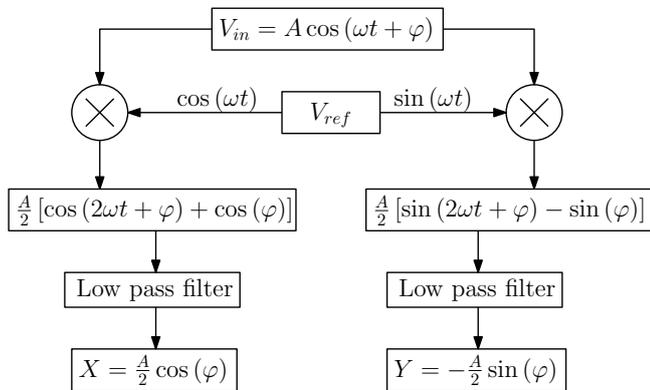


FIGURE 6 – Principe de la double détection synchrone.

Ce sont les composantes  $X$  et  $Y$  qui sont mesurées et analysées ici.

**Le module de puissance GRAS** type 12AA n'est pas prévu à la base pour utiliser la technique de l'insertion

de tension. Il est en revanche pourvu d'un système propre au fabricant appelé *SysCheck* qui permet de vérifier le bon fonctionnement du microphone en injectant un signal électrique à la fréquence de 1000 Hz dans la branche numéro (1) du câble LEMO (cf. Figure 7). C'est cette même branche qui est utilisée dans le préamplificateur 26AN pour l'insertion de tension. Il est donc nécessaire de transformer le câblage et d'y adjoindre un dispositif afin de pouvoir y insérer une tension contrôlée à la fois en amplitude et en fréquence. C'est le rôle joué par les relais pilotés par le microcontrôleur Arduino.

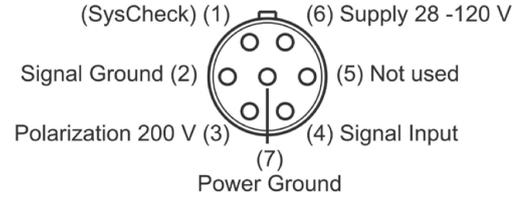


FIGURE 7 – Prise LEMO femelle à 7 branche vue de l'extérieur.

### Réduction de la tension de polarisation du microphone

Les mesures étant effectuées sous vide ou en présence de gaz légers, il convient de se prémunir des risques de formation d'arcs électriques pouvant se former entre la membrane du microphone et l'électrode arrière. Un simple diviseur de tension visant à abaisser la tension de polarisation (et ainsi diminuer la distance inter-électrodes) permet de s'affranchir de ces risques. À noter que pour le dimensionnement du diviseur de tension, il convient de prêter une attention particulière à l'impédance de sortie du générateur de tension continue du module GRAS 12AA qui est de l'ordre de 40 GΩ.

**L'amplificateur de tension Tegam** permet, en mode direct, de multiplier par un facteur  $G \cong 50$  la tension  $u_g^{(d)}$  en sortie du générateur (*Lock-In Amplifier*). La linéarité de l'amplificateur en fonction de la fréquence a été vérifiée, cependant, il est une fois encore nécessaire de prêter attention aux impédances d'entrée et de sortie des appareils de mesure. En effet, la résistance de sortie du générateur  $R_{outLI}$  et celle de l'amplificateur  $R_{inT}$  sont du même ordre de grandeur ( $\cong 50\Omega$ ) créant ainsi un diviseur de tension. Ainsi, la tension d'excitation fournie à la grille d'entraînement est de la forme :

$$u = \frac{R_{inT}}{R_{inT} + R_{outLI}} G u_g^{(d)} \cong \frac{G u_g^{(d)}}{2}. \quad (2)$$

## 4 Discussion

Le dispositif expérimental présenté ici permet de mesurer la réponse en fréquence d'un microphone en circuit ouvert sous atmosphère contrôlée : sous vide ou en présence de gaz noble dans une gamme de pressions allant de 1 Pa à 200 kPa et dans une gamme de températures allant de 100 K à 300 K. Cependant, après avoir effectué plusieurs séries de mesures, une dérive en température a pu être observée au cours des acquisitions, lié à un échauffement du préamplificateur lorsqu'il est traversé par un courant, que ce soit lors du mode direct ou lors du mode insertion. Une solution

pourrait être d'augmenter la rapidité des acquisitions. Une autre possibilité serait d'anticiper l'échauffement du préamplificateur en y insérant une tension du même ordre de grandeur que celles mesurées pendant que la régulation de la température s'effectue (préalablement aux mesures).

## Références

- [1] A.J. Zuckerwar, Theoretical response of condenser microphones, *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 1278 (1978).
- [2] 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**, 223-232 (1994).
- [3] T. Lavergne, S. Durand, M. Bruneau, N. Joly, D. Rodrigues, Dynamic behavior of the circular membrane of an electrostatic microphone : effect of holes in the backing electrode, *J. Acoust. Soc. Am.* **128(6)** 3459-77 (2010).
- [4] Brüel & Klær, *Microphones à condensateur et préamplificateurs de microphones - Théorie et applications* (1977).
- [5] C. Guianvarc'h, R. Gavioso, G. Benedetto, L. Pitre, M. Bruneau, Characterization of condenser microphones under different environmental conditions, application to the determination of the Boltzmann constant, *Review of Scientific Instrument* **80**, 074901 (2000).
- [6] International Electrotechnical Commission, *Measurement microphones - Part 6 : Electrostatic actuators for determination of frequency response* (2004).
- [7] T. Lavergne, C. Guianvarc'h, L. Risegari, P. Honzík, R.M. Gavioso, Effet de la température sur les propriétés électro-mécaniques d'un microphone capacitif et de son préamplificateur, 14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique, Le Havre, 23-25 avril 2018.
- [8] Signal Recovery, *What is a Lock-In Amplifier?*, Technical Note TN 1000.