

CFA/VISHNO 2016

Comportement électroacoustique des microphones à micro plasma

A. Nanda Tonlio, P. Béquin, S. Durand et P. Rouquier
LAUM - UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72805 Le Mans, France
adalbert.nanda_tonlio@univ-lemans.fr



LE MANS

Dans les microphones à micro plasma, l'élément sensible aux fluctuations de pression est un petit volume (quelques millimètres cube) de gaz ionisé (plasma) créé et entretenu au moyen de décharges électriques. Celles-ci sont obtenues en appliquant une différence de potentiel de quelques centaines de volts entre deux électrodes séparées par un gap d'air de quelques centaines de micromètres. Dans cette étude deux architectures permettant la génération de ces micro décharges sont testées. D'une part, la structure macroscopique usuelle avec une pointe d'aiguille placée à une distance submillimétrique d'un plan. D'autre part, une microstructure sur puce silicium constituée d'électrodes planes (multi-pointes - fil) fabriquée en salle blanche à l'aide de méthodes et d'outils de micro gravures. La caractérisation électroacoustique de ces capteurs est effectuée à l'aide d'un banc de mesure spécifique. Ainsi, la caractéristique électrique courant-tension renseigne principalement sur la présence de plusieurs régimes de fonctionnement possibles de la micro décharge. Suivant le régime utilisé, la relation entre le courant et la tension peut être non linéaire et parfois hystérétique. La sensibilité du micro plasma aux fluctuations de pression, une propriété qui n'a pas fait l'objet d'étude à notre connaissance, est déduite par comparaison avec un microphone électrostatique de référence placé dans un même champ acoustique obtenu au sein d'un guide d'onde. Finalement, quelques paramètres d'influence sur le comportement électroacoustique du micro plasma ont été testés, citons : l'amplitude des fluctuations de pression, les paramètres géométriques et électriques de la micro décharge. Soulignons toutefois, qu'en deçà d'une distance inter électrodes d'un millimètre, ces capteurs tels qu'ils ont été conçus présentent aussi une sensibilité à la vitesse particulaire.

1 Introduction

Les microphones sont les capteurs qui assurent la conversion des signaux acoustiques en signaux électriques. Dans nombre de cas, une traduction mécano-acoustique est associée à une traduction électromécanique : le mouvement de l'air entraîne celui d'un élément solide (membrane) qui, à son tour, est directement à l'origine d'un signal électrique. Pour la réalisation de microphone de mesure, la conversion utilisée est généralement électrostatique [11]. Le principe des microphones à gaz ionisé repose sur l'interaction entre un volume d'air localement ionisé (quelques millimètres cube) et l'air environnant. Le gaz ionisé est créé et entretenu au moyen de décharges électriques obtenues par application d'une tension suffisante entre deux électrodes de rayons de courbure différents (une pointe et un plan, par exemple) et séparées d'une distance de quelques millimètres. Les variations de la pression de l'air environnant le gaz ionisé, due à la présence d'une perturbation acoustique, modifient les comportements mécanique et électrique des particules chargées s'écoulant entre les électrodes, entraînant ainsi une variation du courant dans le circuit électrique. L'analyse de ce courant électrique en faisant usage d'un modèle électroacoustique dédié permet d'estimer les paramètres de la perturbation acoustique.

Le principe d'utiliser un gaz ionisé comme élément sensible d'un capteur n'est pas nouveau. Citons, par exemple, les jauges à ionisation (jauge Penning, jauge Bayard-Alpert) pour la mesure des très faibles pressions statiques (domaine du vide) [6]. Dayton et al [4] développent en 1963 une diode thermoionique adaptée à la mesure de la pression acoustique mais à faible pression statique ($\simeq 10 \text{ Torr} \simeq 1,33 P_a$), ils proposent aussi une expression de la sensibilité de ce capteur dans laquelle les variations de pression sont inversement proportionnelle à la pression statique. En 1953, Dyer et al [5] citent des travaux sur l'interaction d'une onde sonore avec le gaz ionisé d'une décharge électrique de type pointe-plan mais sans donner de détails sur les aspects analytiques et expérimentaux. En

1970, W. Babcock et al [1] développent un microphone à gaz ionisé adapté aux mesures ultrasonores pour des fréquences allant jusqu'à 1 MHz, la sensibilité du capteur est estimée à environ $20 \text{ mV}/P_a$. Cependant, les instabilités de fonctionnement de la décharge électrique utilisée, de type pointe-pointe, provoquent un bruit de fond important qui limite l'usage de ce microphone aux pressions acoustiques supérieures à 90 dB SPL. En 2013, Ph. Béquin et al [3, 9] proposent la modélisation électroacoustique d'un microphone à gaz ionisé faisant usage de décharges électriques de type pointe négative-plan (un potentiel négatif est appliqué sur une électrode en forme de pointe, le plan étant relié à la masse), les distances inter électrodes utilisées allant de 5 à 10 millimètres. La sensibilité de ce microphone est estimée à environ $1 \text{ nA}/P_a$ sur la gamme de fréquence comprise entre 100 Hz et 4 kHz.

L'objet principal de cette étude est la mise en œuvre et la caractérisation électroacoustique de microphone à gaz ionisé faisant usage de micro décharges électriques, les distances inter électrode sont de l'ordre de la centaine de micromètre.

2 Comportements électriques

Le dispositif expérimental dédié à l'alimentation des microdécharges et à la mesure des grandeurs électriques utiles à leur caractérisation est composé de trois parties distinctes (figure 1).

- Une alimentation électrique génère des tensions U_{alim} de 0 à 30 kV et des courants électriques associés I_{alim} allant de 0 à 3 mA. Elle possède aussi un dispositif de mesure interne qui délivre des tensions proportionnelles aux valeurs continues de la tension générée et du courant débité.
- La cellule élémentaire du microphone à gaz ionisé est composée, dans un premier temps, d'une résistance $R \simeq 23 \text{ M}\Omega$, d'une pointe en acier avec un rayon de courbure d'environ $38 \mu\text{m}$ et d'une

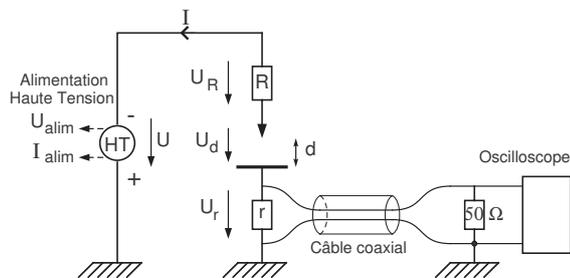


FIGURE 1 – Représentation schématique du dispositif expérimental associée au fonctionnement d'une décharge électrique de type pointe-plan.

plaque en acier. La grande valeur de la résistance R stabilise la dynamique des écoulements de charge au sein de la décharge et limite ainsi l'apparition d'arc électrique. Les distances inter électrodes d étudiées sont comprises entre $25 \mu\text{m}$ et 5 mm . Elles sont réglées finement au moyen d'une vis micrométrique solidaire de la plaque (non représentée sur la figure 1), la pointe étant maintenue fixe.

- Une petite résistance ($r = 50 \Omega$) est placée entre la plaque et la masse du montage. La tension U_r à ces bornes est proportionnelle au courant électrique I_r traversant la décharge. Cette tension est observée à l'aide d'un oscilloscope (Lecroy LT322) via un câble coaxial associé à une résistance de 50Ω limitant les réflexions parasites.

2.1 Caractéristiques tension-courant

Les courbes tension-courant sont les "signatures" des décharges électriques, elles renseignent, pour partie, sur leurs évolutions électriques en fonction de leurs caractéristiques propres (gaz, géométrie et matériaux des électrodes) et des conditions atmosphériques de leur environnement. La figure 2 donne les valeurs de la tension $U_d = U - (R + r) I_r$ entre la pointe (de rayon de courbure $r_p = 38 \mu\text{m}$) et le plan en fonction du courant moyen I_r déduit de la différence de potentiel U_r aux bornes de la petite résistance r . Le gaz environnant la décharge est l'air aux conditions ambiantes.

Mis à part la distance inter électrodes de 5 mm , les caractéristiques tension - courant pour des distances intermédiaires ($1 \text{ mm} \leq d \leq 3 \text{ mm}$) possèdent deux parties distinctes.

- Une première partie pour laquelle les courbes tension-courant présentent une pente positive (la résistance dynamique $dU_d/dI_r > 0$). La décharge fonctionne dans le régime dit des "pulses de Trichel". Le courant électrique est composé d'une composante continue et d'une composante constituée de pulses réguliers [7, 2].
- Concernant la seconde partie de la courbe, la résistance dynamique dU_d/dI_r est négative, la

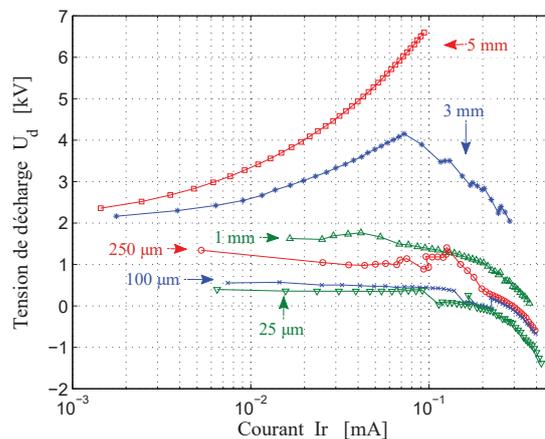


FIGURE 2 – Caractéristiques tension - courant. La tension $U_d = U - (R + r) I_r$ en fonction du courant moyen I_r s'écoulant à travers la résistance $r \simeq 50 \Omega$. $R \simeq 23 \text{ M}\Omega$. Le rayon de courbure de la pointe est $r_p = 38 \mu\text{m}$.

décharge fonctionne dans le régime dit "sans pulse" avec un courant électrique constitué d'une unique composante approximativement continue.

Pour les petites distances ($d \leq 1 \text{ mm}$), la tension de seuil atteinte, la décharge électrique fonctionne dans le régime de Townsend qui se caractérise par une courbe approximativement plate ($\frac{dU_d}{dI_r} \simeq 0$) voire légèrement décroissante et cela sur une large gamme de courant. Pour des courants électriques importants la résistance dynamique est négative, la décharge électrique est dans le régime dit "luminescent" (glow discharge). Remarquons que dans ce régime et au-delà d'un certain courant, la tension U_d s'annule puis change de signe.

Remarque importante : ces caractéristiques tension - courant sont très similaires à celles obtenues par Held and Peyrous (voir les figures 2, 3 and 6 de [8]) pour des décharges électriques pointe positive - plan dans l'air, la distance $d = 20 \text{ mm}$ étant fixée, les différentes courbes sont associées à des pressions statiques variant entre $0,1 \text{ Torr}$ et 10 Torr .

2.2 Comportement hystérétique

Cette partie est dédiée aux comportements électriques de la micro décharge lorsqu'elle est soumise à un cycle de tension appliquée croissante puis décroissante. La valeur de la tension d'alimentation U est incrémentée puis décrétementée d'une petite valeur de tension. Les valeurs des tensions U et U_r et du courant I_r sont mesurés simultanément, le temps entre chaque pas de tension est d'environ deux secondes. La figure 3 donne deux caractéristiques tension-courant obtenues pour une micro décharge point négative - plan de distance inter électrode $d = 25 \mu\text{m}$. Les deux caractéristiques présente une boucle, la signature d'un comportement hystérétique. La surface de la boucle est d'autant plus grande que le courant maximum atteint est élevé. Cet effet est attribué principalement à une diminution progressive de la valeur de la résistance

R par effet Joule dû à des courants électriques trop élevés (le gaz ionisé présente probablement un comportement hystérétique mais ce dernier, supposé petit, en comparaison est masqué). Lorsque le temps entre l'application de la tension U et les mesures électriques est augmenté et devient bien supérieur au temps d'échauffement de la résistance R , les effets hystérétiques sont alors grandement réduits.

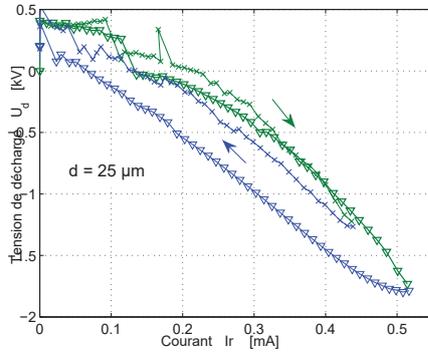


FIGURE 3 – Deux exemples de caractéristique tension - courant d'une décharge pointe-plane $d = 25 \mu\text{m}$. \searrow : tension U et courant I croissants. \swarrow : tension U et courant I décroissants.

3 Comportements acoustiques

Le banc de mesure acoustique (figure 4) se compose d'un tube et de haut-parleurs fixés à ces extrémités. Le pilotage indépendant en amplitude et en phase des deux haut-parleurs permet de créer toute combinaison d'ondes planes aller et retour dans le guide et donc d'imposer un champ acoustique (pression et vitesse particulière acoustiques) aux caractéristiques maîtrisées en tout lieu du tube et à mi-distance des haut-parleurs en particulier. La partie centrale du banc est adaptée pour accueillir le microphone de référence (*B&K* 2670 1/4 pouce) ou le microphone à gaz ionisé. Le diamètre du tube résulte d'un compromis : d'une part, il doit être aussi petit que possible afin de respecter l'hypothèse d'onde plane dans la section du guide d'onde (le microphone de référence est monté affleurant à la paroi, le volume de gaz ionisé du microphone ionique est sur l'axe du guide). D'autre part, le tube doit posséder un diamètre suffisant pour permettre une insertion aisée des microphones et faciliter leurs réglages respectifs. Ces contraintes limitent le domaine d'étude à la gamme de fréquence allant de 100 Hz à environ 4 kHz (première fréquence de coupure du tube).

3.1 Réponses en fréquence - microphone de référence

Les deux haut-parleurs sont alimentés en phase, les ondes acoustiques émises et leurs réflexions conduisent à créer une pression acoustique maximale au centre du tube, la vitesse particulière étant nulle. La figure 5 donne la réponse en fréquence mesurée au centre du banc à l'aide du microphone de référence. Pour

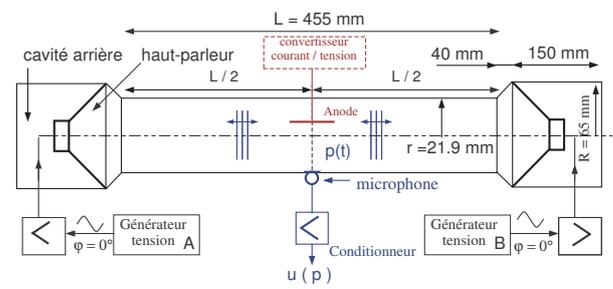


FIGURE 4 – Représentation schématique du dispositif expérimental dédié à la caractérisation électroacoustique des microphones à gaz ionisé. Montage avec le microphone de référence.

une tension de 2 volts appliqués sur les haut-parleurs, un niveau sonore d'environ 145 dB est observé en basse fréquence (soit une variation de pression de 356 Pa environ), les fréquences de résonance du banc apparaissent aux fréquences d'excitation plus élevées. Aux données expérimentales sont associées les prédictions d'un modèle électroacoustique (non décrit dans ce papier) modélisant la propagation des ondes dans des portions de guide ainsi que le comportement de chacun des haut-parleurs. Un bon accord est observé entre l'expérience et les prédictions du modèle.

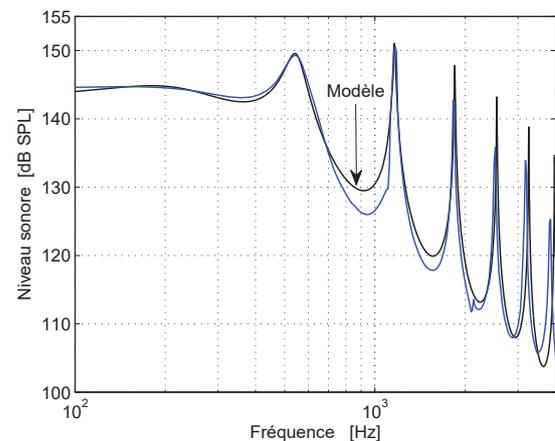


FIGURE 5 – Niveaux sonores mesurés au centre du dispositif acoustique avec le microphone de référence et prédictions d'un modèle électroacoustique (non décrit).

Tensions appliquées en phase sur les deux haut-parleurs ($V = 2 V_{rms}$). [dB SPL] : $20 \log(P_{mic}/P_{ref})$ avec $P_{ref} = 20 \cdot 10^{-6}$ Pa.

Ce même modèle est utilisé pour prédire les valeurs de la vitesse particulière acoustique en fonction de la fréquence au centre du banc lorsque les deux haut-parleurs fonctionnent en opposition de phase (la pression acoustique y étant nulle). La figure 6 donne une vitesse particulière d'environ 1 m/s en basse fréquence ainsi que les fréquences des antirésonances du banc.

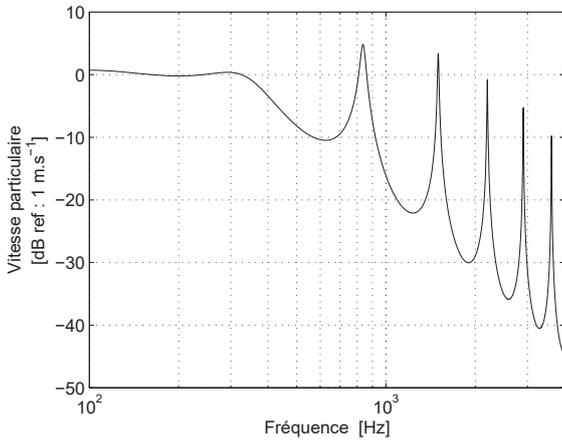


FIGURE 6 – Vitesse particulière acoustique au centre du dispositif acoustique. Prédiction déduites en faisant usage du modèle électroacoustique utilisé pour la pression acoustique (figure 5). Les tensions appliquées sur les deux haut-parleurs sont en opposition de phase ($V = 2 V_{rms}$). Amplitude [dB] : $20 \log(v_a/V_{ref})$ avec $V_{ref} = 1 m.s^{-1}$.

3.2 Réponses en fréquence - microphone à gaz ionisé

Après avoir retiré le microphone de référence, le microphone à gaz ionisé est installé dans le tube (figure 7). La distance inter électrodes est ajustée à l'aide de la vis micrométrique. Une cage de Faraday a été ajoutée afin de limiter le rayonnement électromagnétique de la décharge et les perturbations induites sur les divers matériels de mesure.

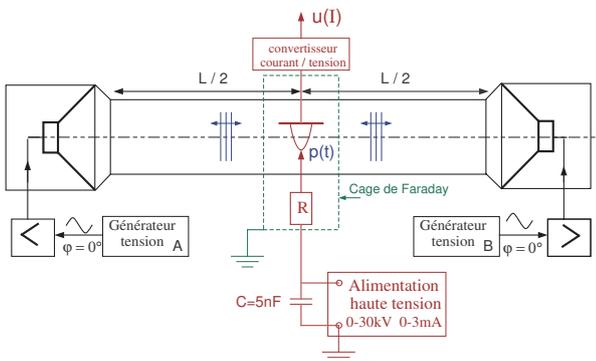


FIGURE 7 – Représentation schématique du dispositif expérimental dédié à la caractérisation électroacoustique des microphones à gaz ionisé.

La figure 8 donne un exemple de réponses en fréquence obtenues avec le microphone ionique pour trois tensions appliquées sur les haut-parleurs. Les mesures réalisées par ailleurs avec le microphone de référence sont ajoutées pour comparaison. Les profils des réponses en fréquence sont très similaires dans la gamme de fréquences où la confrontation est valide. Les réponses en phase (non représentées) sont également proches. Les courbes de réponse du microphone à gaz ionisées sont ajustées sur celles du microphone de référence permettant ainsi de déduire

la sensibilité en pression du capteur ionique. Pour une distance inter électrodes $d = 3 mm$ avec un point de fonctionnement dans le régime des pulses de Trichel : $U_d \simeq 3,4 kV$, $I_r \simeq 49 \mu A$, les sensibilités, pour les trois tensions appliquées sur les haut-parleurs, sont : $S_{p1V} \simeq 0,47 nA/Pa$, $S_{p2V} \simeq 0,56 nA/Pa$, $S_{p3V} \simeq 0,54 nA/Pa$. Ces valeurs sont proches de celles mesurées pour des distances inter-électrodes de 5 mm (voir [3]).

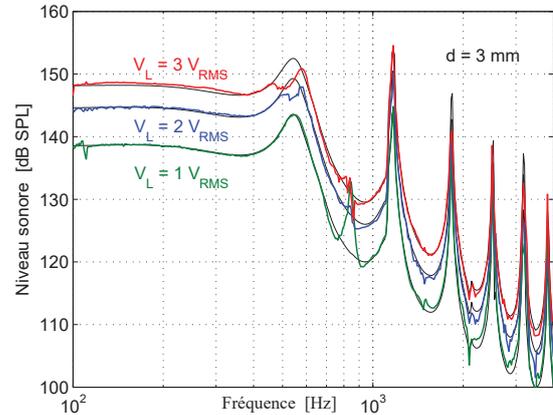


FIGURE 8 – Niveaux sonores mesurés au centre du dispositif acoustique avec le microphone à gaz ionisé ($d = 3 mm$) et le microphone de référence. Trois valeurs de tension appliquée sur les haut-parleurs. Point de fonctionnement de la décharge : $U_d \simeq 3,4 kV$, $I_r \simeq 49 \mu A$.

A l'aide de la vis micrométrique, la distance inter électrodes est réduite et ajustée à $d = 100 \mu m$. Le microphone est maintenant constitué d'une micro décharge. Le point de fonctionnement est choisi dans le régime de Townsend : $U_{alim} \simeq 2,6 kV$, $U_d \simeq 440 V$, $I_r \simeq 80 \mu A$. La figure 9 donne les réponses en fréquence obtenues par les deux microphones pour deux tensions appliquées sur les haut-parleurs.

Comme précédemment, les sensibilités sont déduites par ajustements des courbes de réponse sur celles du microphone de référence. Ainsi, pour les deux tensions appliquées sur les haut-parleurs : $S_{p2V} \simeq 0,22 nA/Pa$, $S_{p3V} \simeq 0,17 nA/Pa$. Elles sont $\sim 2,5$ fois plus faibles que les sensibilités obtenues par un microphone à gaz ionisé ayant une distance inter électrodes 30 fois plus grande. Remarquons aussi, que les deux microphones ioniques testés sont aussi sensibles à la vitesse particulière acoustique (présence de pics aux antirésonances du banc de mesure sur les réponses en fréquences).

4 Microsystèmes à multi-pointes

Dans cette partie, une autre architecture d'électrodes est utilisée pour la génération des micro décharges électriques et donc du gaz ionisé sensible aux champs acoustiques. Il s'agit de microstructures sur puce silicium constituée d'électrodes planes fabriquée en salle blanche à l'aide de méthodes et d'outils de micro

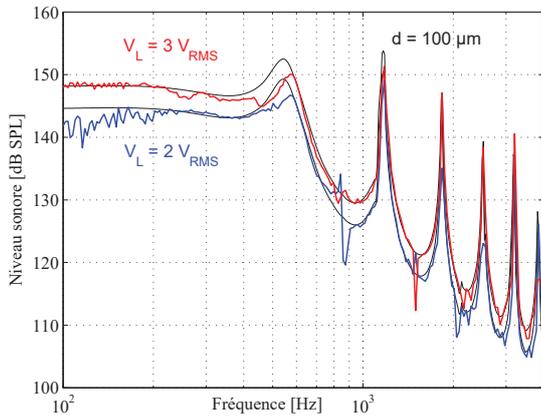


FIGURE 9 – Niveaux sonores mesurés au centre du dispositif acoustique avec le microphone à gaz ionisé ($d = 100 \mu m$) et le microphone de référence. Deux valeurs de tension appliquée sur les haut-parleurs.

Point de fonctionnement de la décharge :
 $U_{alim} \simeq 2,6 \text{ kV}$, $U_d \simeq 440 \text{ V}$, $I_r \simeq 80 \mu A$.

gravures. La figure 10 donne une photographie de la microstructure testée en fonctionnement. Elle est constituée de deux électrodes ($L = 17 \text{ mm}$), chacune avec environ 200 pointes, en regard d'une électrode centrale plane placée à une distance $d = 100 \mu m$. La figure 11 représente de manière schématique le



FIGURE 10 – Photographie d'un microphone à gaz ionisé constitué d'un microsysteme multi-pointes. la distance inter électrodes est $d = 100 \mu m$.

montage électrique mis en œuvre. Deux résistances de fortes valeurs ($R \simeq 23 \text{ M}\Omega$) sont utilisées pour limiter la formation des arcs électriques. La tension aux bornes de la petite $r = 50 \Omega$ permet d'accéder aux courants électriques I_r traversant l'ensemble de la micro décharge. Comme le montre la figure 12,

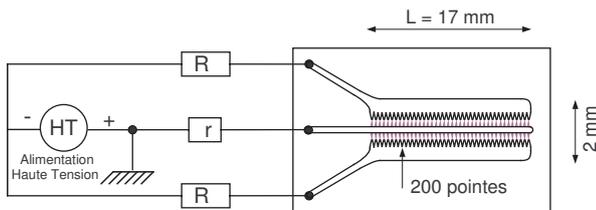


FIGURE 11 – Représentation schématique du montage électrique associé au fonctionnement d'une décharge électrique multi-pointes. $R \simeq 23 \text{ M}\Omega$ et $r = 50 \Omega$.

les trois électrodes du microsysteme sont placées perpendiculairement à l'axe du tube et donc à l'axe de

propagation des ondes du banc de mesure acoustique. La figure 13 donne les réponses en fréquence obtenues

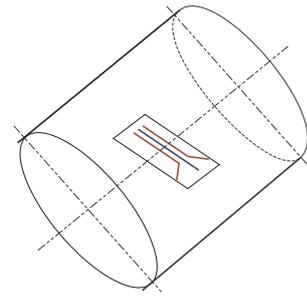


FIGURE 12 – Représentation schématique du microphone multi-points à micro décharge dans le guide d'onde du banc de mesure acoustique.

avec ce nouveau microphone ionique pour deux tensions appliquées sur les haut-parleurs ainsi que les mesures réalisées avec le microphone de référence. Compte tenu des grandes instabilités de fonctionnement des décharges électriques entre les différentes points, les réponses en fréquence présentent de nombreuses fluctuations qui n'apparaissent pas ou peu dans les exemples étudiés précédemment. Pour un point de fonctionnement : $U_{alim} \simeq 2,2 \text{ kV}$, $I_r \simeq 140 \mu A$, les sensibilités en pression du micro capteur ionique, associées aux deux tensions appliquées sur les haut-parleurs, sont : $S_{p2V} \simeq 0,46 \text{ nA/Pa}$, $S_{p3V} \simeq 0,5 \text{ nA/Pa}$. Les valeurs sont environ 2,5 fois plus élevées que celles obtenues pour un dispositif microphonique pointe-plan possédant la même distance inter électrodes.

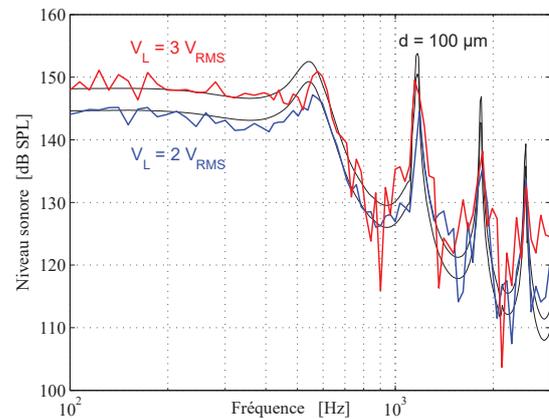


FIGURE 13 – Niveaux sonores mesurés au centre du dispositif acoustique avec le microphone à gaz ionisé constitué d'un microsysteme multi-pointes ($d = 100 \mu m$) et le microphone de référence. Deux valeurs de tension appliquée sur les haut-parleurs.

Point de fonctionnement de la décharge :
 $U_{alim} \simeq 2,2 \text{ kV}$, $I_r \simeq 140 \mu A$.

5 Conclusion

Cette étude aborde le comportement électroacoustique de décharges électriques de type pointe négative - plan

avec des distances inter électrodes allant de 25 μm à 3 mm. Deux architectures ont été testées : une pointe en face d'une plaque métallique et une microstructures sur puce silicium constituée d'électrodes planes fabriquée en salle blanche. Un dispositif électrique a permis de mesurer les caractéristiques tension - courant des décharges électriques et d'observer les différents régimes de fonctionnement. Un comportement hystérétique des décharges électriques est aussi révélé, l'origine est attribuée à une évolution de la valeur de la résistance de ballast due à son échauffement par effet Joule. Un banc de mesure acoustique permet lui de soumettre les décharges électriques à des fluctuations de pression. La sensibilité des diverses décharges électriques aux pressions acoustiques est déterminée par comparaison avec un microphone de référence. Les valeurs de sensibilité ainsi estimées sont de l'ordre de 0,3 nA/Pa . Finalement, dans le cadre de cette étude, nous avons montré pour la première fois, à notre connaissance, la possibilité de mesurer à l'aide de micro décharges des pressions acoustiques (350 Pa environ) dans une gamme de fréquence allant de 100 Hz à 4 kHz.

Remerciements

Ce travail bénéficie de moyens octroyés par la région des Pays de la Loire et constitue le deuxième axe de recherche du projet MEMSPA (Projet de recherche "Micro moteurs électrodynamiques pour la réalisation de parois acoustiques absorbantes").

Références

- [1] W. R. Babcock, R. W. Hermsen, Glow discharge microphone, Rev. Sci. Instrum., 41, 1659-1660 (1970)
- [2] K. H. Becker, U. Kogelschatz, K. H. Schoenbach, R. J. Barker, Non-equilibrium air plasmas at atmospheric pressure, Institute of Physics Publishing, Londres (2005).
- [3] Ph. Béquin, V. Joly, Ph. Herzog, Modeling of a corona discharge microphone, J. Phys. D : Appl. Phys., 46 (17), 175204 (2013)
- [4] J. A. Dayton, J. T. Verdeyen, P. F. Virobik, Method for detecting weak sound waves in a low pressure gas, Rev. Sci.Instrum., 34, 1451-1452 (1963)
- [5] I. Dyer, B. W. Blum, U. Ingard, The interaction of a sound wave with a point-to-plane corona discharge, J. Acoust. Soc. Am. 25 (4), 829 (1953)
- [6] E. O. Doebelin, Measurement Systems : Application and Design, McGraw-Hill, New York (2003).
- [7] M. Goldman and A. Goldman, Ch. 4 : Corona discharges, Academic Press, New York (1978).
- [8] B. Held and R. Peyrous, Physical and chemical studies of corona discharges in air, Czechoslovak Journal of Physics 49 (3), 301-320 (1999)
- [9] V. Joly, Etude de capteurs acoustiques à gaz ionisé, Ph.D Thesis, Université du Maine (2006).

- [10] Y. P. Raizer, Gas Discharge Physics, Springer-Verlag, Berlin (1991).
- [11] M. Rossi, Électroacoustique, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne (1986).