

## **Microphone à microdécharges**

A. Nanda Tonlio, P. Béquin, S. Durand et J. Blondeau  
LAUM, UMR-CNRS 6613, Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans, France  
[adalbert.nanda\\_tonlio.etu@univ-lemans.fr](mailto:adalbert.nanda_tonlio.etu@univ-lemans.fr)

Le principe des microphones à micro décharges (ou micro plasma) repose sur la sensibilité d'un volume de gaz ionisé (un volume de quelques millimètres cubes) aux variations de pression de l'air qui l'entourne. Le gaz ionisé est créé et entretenu au moyen de micro décharges électriques. Ces décharges sont obtenues en appliquant une différence de potentiel suffisante (quelques centaines de volts) entre deux électrodes séparées par un gap d'air de quelques dizaines de micromètres. La présence d'une perturbation acoustique modifie les comportements électrique et mécanique du gaz ionisé entraînant ainsi une variation du courant électrique s'écoulant dans le montage électrique associé. Une caractérisation électroacoustique de micro décharges de type pointe négative-plan est proposée. Elle commence par une analyse des caractéristiques courant-tension mesurées sur des décharges électriques de distances inter électrodes variant de  $25 \mu m$  à  $7 mm$ . Un banc de mesure acoustique spécifique est proposé, il s'agit d'un guide d'onde dont la pression acoustique peut être contrôlée au centre sur une large gamme de fréquences. Les variations électriques des micro décharges (images de la pression acoustique) placées dans ce guide sont comparées à celles d'un microphone classique servant de référence.

## 1 Introduction

Les microphones sont les capteurs qui assurent la conversion des signaux acoustiques en signaux électriques. Dans la plus part des cas, une traduction mécano-acoustique est associée à une traduction électromécanique : le mouvement des molécules d'air entraîne la mise en mouvement d'un élément solide (membrane) qui, à son tour, est directement à l'origine du signal électrique. Pour la réalisation de microphone de mesure, la conversion utilisée est généralement électrostatique.

Le principe des microphones à gaz ionisé repose sur l'interaction entre un volume d'air localement ionisé (volume de mesure de quelques centimètres 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 distantes de quelques millimètres. Une variation de la pression de l'air due à une perturbation acoustique modifie les comportements mécanique et électrique du gaz ionisé entraînant ainsi une variation du courant s'écoulant dans le montage électrique. Associé à un modèle électro acoustique, l'analyse de ce courant permet d'estimer les paramètres de la perturbation acoustique.

Le principe d'utiliser un gaz ionisé comme corps d'épreuve 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) [1]. En 1963, Dayton et al [2] développent une diode thermo ionique adaptée à la mesure de la pression acoustique mais à faible pression statique ( $P_0 \simeq 10 Torr \simeq 1,33 \cdot 10^3 Pa$ ), ils proposent aussi une expression de la sensibilité de ce capteur dans laquelle les variations de pression sont inversement proportionnelle à la pression statique  $P_0$ . En 1953, Dyer et al [3] 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 [4] 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  $20 mV/Pa$ . Cependant,

les instabilités de fonctionnement de la décharge électrique, 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 [5] [6] 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 3 à 10 millimètres. La sensibilité de ce microphone est évaluée à  $0,1 nA/Pa$  sur la gamme de fréquence  $100 Hz - 4 kHz$ .

L'objet de la présente étude est d'étendre cette modélisation électroacoustique aux micro décharges électriques dont les distances inter électrodes sont inférieures au millimètre.

## 2 Comportement électrique des micro décharges

### 2.1 Montage électrique

Le gaz ionisé nécessaire à la conversion électro acoustique du microphone est créé et entretenu au moyen d'une décharge électrique de type pointe négative - plan (figure 1). Le plan (une plaque en acier d'épaisseur  $1 mm$ ) est perpendiculaire à l'axe de la pointe (une aiguille en acier) dont le rayon de courbure est estimé approximativement à  $30 \mu m$ . Les distances inter électrodes  $d$  étudiées sont comprises entre  $25 \mu m$  et  $7 mm$ . 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 résistance  $R \simeq 22 M\Omega$  stabilise la dynamique des écoulements de charge au sein de la décharge et limite ainsi l'apparition des arcs électriques. Une alimentation haute tension ( $15 kV - 3 mA$ ) permet d'appliquer sur la pointe les tensions négatives nécessaires à la génération du gaz ionisé. Une sonde d'atténuation (1 : 1000) délivre une tension proportionnelle à la haute tension appliquée  $V_{HT}$ . Par ailleurs, le courant  $I$  qui s'écoule à travers la décharge est estimé au moyen de la tension  $V_I$  mesurée aux bornes d'une résistance  $r \simeq 50 \Omega$  placée entre le plan et la masse. Des multimètres réalisent la mesure des tensions  $V_{HT}$  et  $V_I$  et un oscilloscope permet de visualiser le profil temporel du courant

électrique  $I$ .

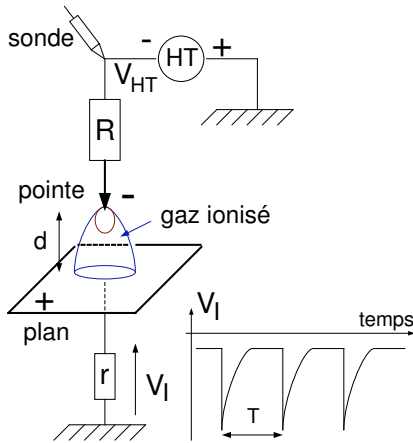


FIG. 1: Représentation schématique de la décharge pointe-plan.

## 2.2 Caractéristiques Courant-Tension

Les courbes du courant en fonction de la tension sont tracées à partir des tensions  $V_I$  et  $V_{HT}$ , ces courbes caractérisent le comportement de la décharge électrique dans son environnement : l'air aux conditions atmosphériques ambiantes dans le cas de cette étude.

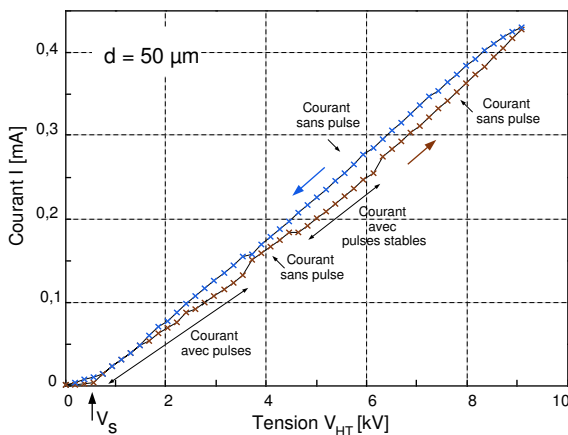


FIG. 2: Caractéristique Courant-Tension pour une distance inter électrodes  $d = 50 \mu m$ .

La figure 2 donne un exemple représentatif d'une caractéristique Courant-Tension associée à des micro décharges électriques ( $d = 50 \mu m$ ). Elle a été obtenue pour des tensions appliquées  $V_{HT}$  croissantes ( $\times$  rouge) puis décroissantes ( $\times$  bleu). Le comportement hystérétique (effet mémoire) du gaz ionisé apparaît clairement : pour une même tension appliquée, un courant moindre (une impédance plus importante) est mesurée pour les tensions croissantes. Ce comportement singulier est probablement dû à des effets de température du gaz lors des changements d'état.

Pour des tensions  $V_{HT}$  croissantes, le courant électrique  $I$  observé à l'oscilloscope (figure 3) présente

une composante continue de faible amplitude dont la valeur est utilisée dans le tracé de la caractéristique Courant-Tension et parfois des pulses d'amplitude élevée. Prenons l'exemple de la distance inter électrodes  $d = 50 \mu m$  (figure 2). Aux faibles valeurs de tension ( $V_{HT} < 3,5 kV$ ), des pulses apparaissent de manière plus ou moins erratique. Pour  $3,5 kV < V_{HT} < 4,5 kV$ , les pulses disparaissent, puis apparaissent à nouveau entre  $4,5 kV$  et  $5,5 kV$ . Au-delà de cette valeur, seul subsiste un courant électrique avec une composante continue. Finalement, lors de la phase de décroissance de la tension appliquée, les pulses réapparaissent seulement vers  $1,5 kV$ . Notons que sur la caractéristique Courant-Tension, à la disparition des pulses est associée un saut de courant.

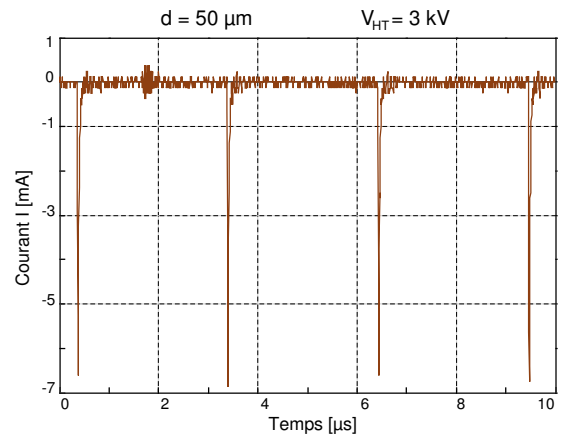


FIG. 3: Profil temporel du courant électrique pour la distance inter électrodes  $d = 50 \mu m$  et à la tension appliquée  $V_{HT} = 3 kV$ . La fréquence des pulses est estimée à environ  $330 kHz$ .

La figure 4 montre que la valeur des fréquences associées aux pulses de courant (de l'ordre de  $0,4 MHz$ ) augmente pour des tensions appliquées croissantes. Ces valeurs sont d'autant plus élevées que la distances inter électrodes  $d$  est grande.

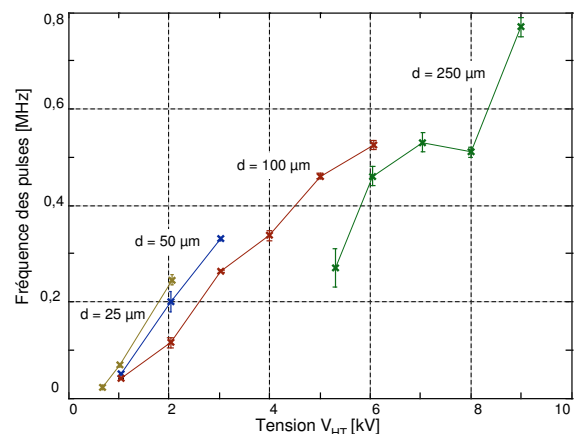


FIG. 4: Fréquence des pulses de courant en fonction de la tension appliquée  $V_{HT}$  pour différentes distances inter électrodes  $d$ .

La figure 5 regroupe l'ensemble des caractéristiques

Courant-Tension. Pour des distances  $d$  supérieures à  $1\text{ mm}$  et des courants électriques faibles ( $< 0,1\text{ mA}$ ), la relation entre le courant et la tension est quadratique et présente la forme classique utilisée pour les décharges centimétriques [7] :

$$I = C_1 \mu V_{HT} (V_{HT} - V_s) \quad (1)$$

où  $C_1$  est un facteur dépendant uniquement de la configuration géométrique de la décharge,  $\mu$  la mobilité des particules chargées et  $V_s$  la tension de seuil à partir de laquelle un courant électrique s'écoule dans l'espace inter électrodes.

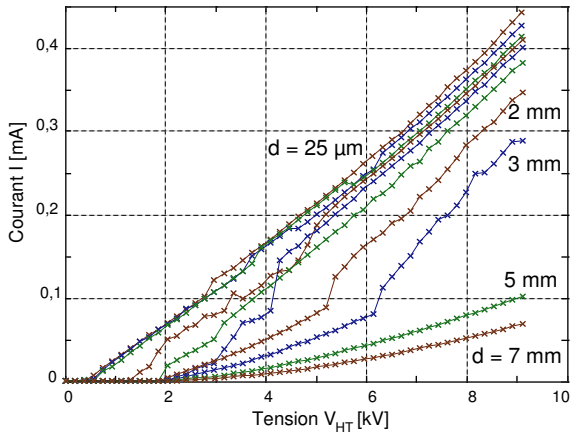


FIG. 5: Caractéristiques Courant-Tension pour les distances  $d = 25, 50, 100, 250, 500\mu\text{m}$  et  $d = 1, 2, 3, 5$  et  $7\text{ mm}$ .

Pour des faibles distances inter électrodes  $d < 1\text{ mm}$ , la relation entre le courant et la tension est approximativement linéaire et suit une loi de la forme :

$$I \simeq C_2 \mu (V_{HT} - V_s) \quad (2)$$

où  $C_2$  est un facteur dépendant de la configuration géométrique de la décharge.

## 3 Comportement acoustique des micro-décharges

### 3.1 Modèle électroacoustique

Dans les relations (1) et (2), la mobilité des particules chargées et la tension de seuil dépendent de la pression et donc de ces variations. Moyennant quelques hypothèses, notamment une pression acoustique uniformément appliquée sur l'ensemble du gaz ionisé, et quelques développements analytiques simples, la sensibilité de la décharge électrique à la variation de pression qui est le rapport entre la variation du courant électrique et la pression acoustique s'écrit sous la forme [5] [6] :

$$S_{pj} = \frac{i(t)}{p(t)} = -K_j \frac{C_j \mu_0}{P_0} [2V_{HT} - V_{s0}], \quad j = 1, 2 \quad (3)$$

où  $\mu_0$  et  $V_{s0}$  sont les valeurs de la mobilité des particules chargées et de la tension de seuil à la pression

atmosphérique  $P_0$ .  $C_j$  les constantes des relations (1) et (2), et  $K_j$  un facteur qui dépend de la décharge.

### 3.2 Banc de mesure acoustique

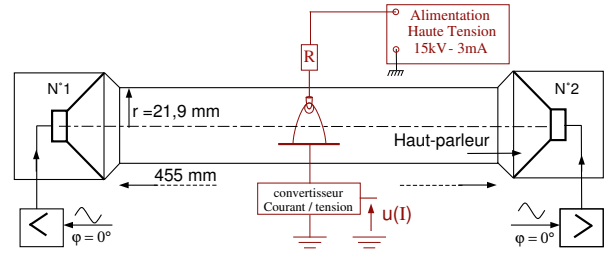


FIG. 6: Représentation schématique du banc de mesure acoustique.

Le banc de mesure acoustique (figure 6) se compose d'un tube et de haut-parleurs fixés à ces extrémités. Il permet de générer, dans un espace fermé, une pression et une vitesse particulière acoustique maîtrisée, notamment au centre du dispositif où est inséré le microphone étudié. En effet, 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 quelconque au centre.

La partie centrale du banc est prévue pour accueillir le microphone à décharges électriques ou le microphone de référence. Le diamètre du tube résulte d'un compromis : d'une part, il doit être aussi petit que possible afin de respecter l'hypothèse d'ondes planes dans le guide d'onde, une hypothèse nécessaire à l'estimation de la pression acoustique au niveau du microphone. D'autre part, le tube doit posséder un diamètre suffisant pour permettre une insertion aisée du microphone à décharges au sein du tube et faciliter les réglages. Ces contraintes limitent le domaine d'étude à la gamme de fréquence  $[100 - 4\text{ kHz}]$ . Par ailleurs, les dimensions des cavités accueillant les haut-parleurs ont été imposées pour un bon fonctionnement des haut-parleurs dans la gamme de fréquences explorée.

Dans un banc de mesure acoustique idéal, lorsque les haut-parleurs sont alimentés en phase, les ondes acoustiques émises conduisent à générer une pression acoustique maximale au centre du tube et à y annuler la vitesse particulière. Afin de prendre en considération les imperfections du banc (haut-parleurs, portions de tube et cavités arrières non identiques), l'amplitude et la phase d'un haut-parleur est ajustée afin d'obtenir une pression maximale au centre du dispositif, et cela, pour toutes les fréquences utiles.

### 3.3 Réponses en fréquences

La figure 7 présente une première comparaison entre la réponse en fréquence d'un microphone de référence (un microphone 1/4 pouce "pression") et le microphone à micro décharges. Deux distances inter électrodes

ont été testées ( $d = 0,5 \text{ mm}$  et  $2 \text{ mm}$ ). Les allures

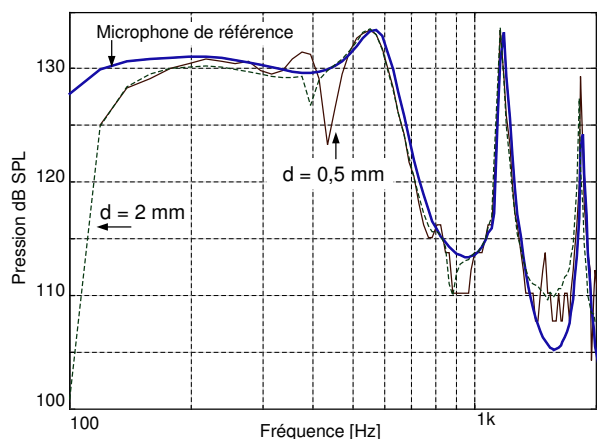


FIG. 7: Estimation de la pression acoustique au centre du banc de mesure à l'aide du microphone de référence et du microphone à micro décharge (deux distances inter électrodes). La sensibilité est estimée à  $S_p \simeq 0,4 \text{ nA/Pa}$ . La tension appliquée sur les haut-parleurs est  $V_{HP} = 0,5 V_{eff}$ .

des réponses en fréquence sont très similaires dans la gamme de fréquences où la confrontation est valide. Les estimations font apparaître clairement les résonances du tube. Les réponses en phase (non représentées) sont également proches. L'ajustement de l'amplitude des courbes associées aux micro décharges sur celle du microphone de référence permet d'estimer la sensibilité du capteur à micro décharges à une valeur d'environ  $0,4 \text{ nA/Pa}$ .

## 4 Conclusion

Le volume de gaz ionisé créé par des micro décharges de type pointe négative-plan est sensible aux variations de pression. Il peut, en conséquence, constituer le corps d'épreuve d'un microphone. Des premiers essais acoustiques sur les décharges électriques ayant des distances inter électrodes inférieures à  $2 \text{ mm}$  permettent d'entrevoir le potentiel de ce capteur ionique.

## Remerciements

Ce travail bénéficie de moyens octroyés par la région des Pays de la Loire (Projet de recherche "Micro moteurs électrodynamiques pour la réalisation de parois acoustiques absorbantes").

## Références

- [1] E. O. Doebelin, *Measurement Systems : Application and Design*, McGraw-Hill, New York (2003).
- [2] 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)

- [3] 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), 829-829 (1953)
- [4] W. R. Babcock, R. W. Hermsen, Glow discharge microphone, *Rev. Sci. Instrum.*, **41**, 1659-1660 (1970)
- [5] Ph. Béquin, V. Joly, Ph. Herzog, Modeling of a corona discharge microphone, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, **46** (17), 175204 (2013)
- [6] V. Joly, *Etude de capteurs acoustiques à gaz ionisé*, Ph.D Thesis, Université du Maine (2006).
- [7] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag, Berlin (1991).