

Le haut-parleur digital, modélisation et réalisation expérimentale

R. DEJAEGER^a, G. JOURDAN^a, K. EGE^b, Q. LECLERE^b, S. FANGET^a, J-L. GUYADER^b,
P. ROBERT^a

a. Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, Laboratoire d'Electronique des Technologies de l'Information (CEA, LETI), 17 rue des Martyrs, 38054 GRENOBLE (FRANCE)

b. Institut National des Sciences Appliquées, Laboratoire Vibrations Acoustique (INSA, LVA), bâtiment St. Exupéry, 25 bis avenue Jean Capelle, F-69621 VILLEURBANNE (FRANCE)

Résumé :

Le haut-parleur digital est un concept qui repose sur la reconstruction d'un signal audio à partir d'un ensemble d'émetteurs acoustiques. Basé sur la sommation acoustique de signaux binaires, ce principe est connu depuis plus de 30 ans et présente certains avantages. Il n'a cependant pas été possible de l'exploiter pour cause de difficultés technologiques, qui semblent pouvoir être surmontées grâce aux technologies MEMS. L'objectif de cette communication est de présenter ce principe d'émission sonore, qui a été simulé et mis en œuvre expérimentalement sur une maquette macroscopique.

Abstract :

The digital loudspeaker is a concept that relies on the reconstruction of an audio signal from a set of acoustic transmitters. Based on the acoustic summation of binary signals, this principle has been known for over 30 years and has some advantages. However, it has not been possible to exploit due to technological difficulties, which seem to be overcome thanks to MEMS technology. The aim of this paper is to present this principle of sound emission, which has been simulated and tested experimentally on a macroscopic model.

Mots clefs : Haut-parleur digital ; simulation ; expérimentation

1 Introduction

De nos jours les supports et transducteurs analogiques tels que la VHS, la photographie argentique, les cassettes audio ou le tube cathodiques ont presque entièrement cédé la place à leurs équivalents numériques : DVD, photographie numérique, mp3, dalle LCD... Seuls les transducteurs électroacoustiques que sont le microphone et le haut-parleur analogique (HPA) traditionnels sont les derniers remparts au tout numérique. L'écoute d'un signal enregistré sur un support numérique requiert alors l'utilisation d'un convertisseur numérique/analogique (CNA) avant d'être transmis au haut-parleur. La principale idée du haut-parleur digital (HPD) est de renvoyer cette conversion à la toute fin de la chaîne de restitution sonore [1]. Cette conversion se fait dans l'air en utilisant l'additivité des pressions acoustiques. Ce principe a été évoqué dès 1980 par Flanagan qui parle alors de CNA acoustique direct [2]. Depuis, des réalisations expérimentales ont validé le principe de base du HPD en reconstruisant de façon digitale des signaux simples [3, 4]. Des simulations de rayonnement de HPD ont également été réalisées, par exemple à partir de paramètres idéaux [5] ; en utilisant une modélisation électromécanique simple ou en se basant sur une approche semi-empirique à partir de mesures [6]. Cette communication présente un modèle de rayonnement acoustique du HPD qui est ensuite comparé avec une méthode de simulation et des expérimentations sur un HPD macroscopique.

2 Théorie

2.1 Principe du HPD

Un HPD est constitué d'un ensemble de transducteurs électroacoustiques de taille réduite qu'on appelle « speaklet » et qui sont disposés en matrice. La fréquence à laquelle les pulses de pression sont émis est appelée fréquence d'horloge ou fréquence de reconstruction afin de la différencier de la fréquence d'échantillonnage utilisée dans les simulations numériques. Le nombre de speaklets de la matrice détermine la résolution en amplitude et pour assurer une bonne reconstruction leurs réponses acoustiques doivent être identiques et répétables dans le temps [6]. Pour se rapprocher de la qualité CD (16 bits, soit une

discretisation de l'amplitude sur 65536 valeurs), un HPD doit avoir le plus grand nombre de speaklets possible tout en gardant une distance inter-speaklet et une taille globale la plus petite possible pour éviter les phénomènes d'interférences dus aux différences de marche. C'est une des principales limitations technologiques qui fait que le HPD n'est pas encore commercialisé. Cette limitation pourrait néanmoins être surmontée grâce à la technologie MEMS qui offre la possibilité de fabriquer rapidement la centaine ou le millier de speaklets nécessaires pour une bonne restitution à un prix raisonnable grâce à la fabrication collective sur une même plaque de silicium. Le principe du HPD est schématisé de façon simplifiée figure 1-a. Un signal est alors reconstruit en faisant varier dans le temps le nombre de pulses de pression émis. Cependant le pulse idéal tel qu'il est représenté est pratique pour la compréhension du phénomène mais n'a pas de réalité physique. Le transducteur qui émet le pulse de pression part forcément d'une vitesse nulle pour revenir à une autre vitesse nulle. Il y a donc obligatoirement autant d'accélération que de décélération et par conséquent l'aire sous la courbe représentant le pulse d'accélération est nulle. La pression étant proportionnelle à l'accélération de la source, on obtient également un pulse de pression dont l'intégrale est nulle. Le premier lobe est la partie utile à la reconstruction tandis que les oscillations suivantes sont des contributions résiduelles qui interviennent dans la reconstruction digitale. (figure 1)

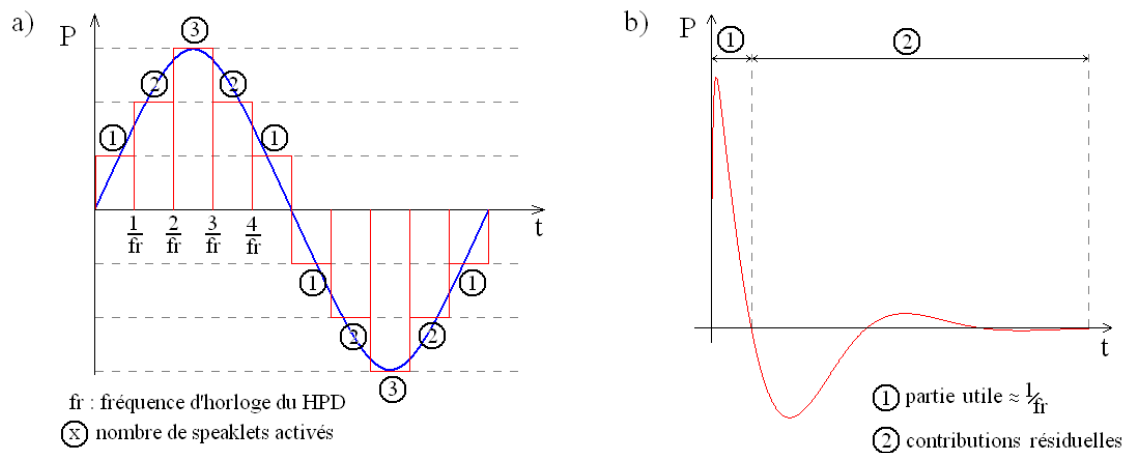


FIGURE 1 – a) Principe du HPD avec pulses de pressions idéaux b) Exemple de pulse de pression réel

2.2 Rayonnement acoustique du HPD

Soit un HPD constitué de N_0 speaklets tous identiques et dont le pulse $s(t)$ est répétable dans le temps. On cherche à reconstruire un signal $g(t) \in [-1; 1]$ avec une fréquence de reconstruction f_r (période T_r). En faisant l'hypothèse que chaque speaklet peut émettre un pulse positif ou négatif, la pression générée par le HPD peut s'écrire sous la forme :

$$P(t) = \sum_{i=0}^{E(t.T_r)} \text{round}(N_0.g(i.T_r)) s(t - i.T_r) \quad (1)$$

« E » désignant la partie entière et « round » l'arrondi. Cette formule peut se réécrire sous la forme d'une convolution :

$$P(t) = (\text{round}(N_0.g(t)) . \text{III}_{T_r}) * s(t) \quad (2)$$

Où III_{T_r} désigne un peigne de Dirac espacés de T_r . En considérant un grand nombre de speaklets et en passant dans le domaine fréquentiel, cette équation devient :

$$P(f) = N_0.f_r (G(f) * \text{III}_{f_r}) . S(f) \quad (3)$$

On constate que la pression générée par le HPD dépend directement des caractéristiques du pulse de pression émis par les speaklets. Le spectre de la pression reconstruite est en effet proportionnel au contenu spectral $S(f)$ d'un pulse. De plus si $f_r > 40$ kHz, $G(f) * \text{III}_{f_r} \approx G(f)$ pour l'oreille humaine. Dans ce cas, en revenant dans le domaine temporel, l'équation devient :

$$P(t) = N_0.f_r.g(t) * s(t) \quad (4)$$

Finalement, pour $f_r > 40$ kHz, la pression d'un HPD se calcul en faisant la convolution entre le pulse de pression d'un speaklet et le signal que l'on cherche à reconstruire. Ce résultat peut être comparé au HPA dont la pression peut se calculer en convoluant sa réponse impulsionnelle avec le signal de commande. Pour $f_r < 40$ kHz, le peigne de Dirac provoque l'apparition de pics indésirables dans le spectre audible qui déforment le signal attendu. Ainsi si $g(t)$ est un signal sinusoïdal de fréquence f_0 , les pics apparaissent pour les fréquences f_n égales à :

$$f_n = |f_0 - n.f_r|; n \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

2.3 Rayonnement acoustique d'un speaklet

L'étude du rayonnement acoustique d'un speaklet en régime transitoire est nécessaire pour simuler la pression générée par un HPD. Deux modèles ont été utilisés pour calculer ce rayonnement à partir de vitesses obtenues expérimentalement.

2.3.1 Modèle de Rayleigh

Les hypothèses qui permettent d'appliquer ce modèle sont les suivantes : l'objet vibrant est plan, considéré comme infiniment bafflé et rayonne en champs libre (condition de Sommerfeld). A partir de mesures de vitesses en différents points de la surface du speaklet, la formule de Rayleigh discrétisée permet de connaître la pression en un point M donné en considérant la surface comme un ensemble de monopôle :

$$P(f)_M = S_e \cdot j \cdot f \cdot \rho_0 \sum_{i=1}^N V_n(i, f) \frac{\exp(-j \cdot k \cdot r_i)}{r_i} \quad (6)$$

Avec : N le nombre de points du maillage, $V_n(i, f)$ la vitesse normale du point i , S_e l'élément de surface associé à un point, ρ_0 la masse volumique de l'air, r_i la distance entre le point i et le point M, k le nombre d'onde.

2.3.2 Approximation source ponctuelle

Si la longueur d'onde du son que l'on émet est petite devant les dimensions du speaklet (rayon de l'ordre de $\lambda/8$ [7]), le rayonnement peut être considéré comme omnidirectionnel. Le speaklet est alors assimilé à une source ponctuelle qui rayonne en régime transitoire dans un demi-espace et dont la pression au point M (distance r) est donnée par :

$$P(f)_M = \frac{j \cdot \alpha \cdot \rho_0 \cdot S \cdot f}{r} V(f) \cdot \exp(-j \cdot k \cdot r) \quad (7)$$

S est la surface du speaklet. A partir des vitesses obtenues sur sa surface avec le vibromètre, le débit réel du speaklet est calculé. Le coefficient adimensionnel α est un coefficient correctif qui représente le rapport entre ce débit réel et le débit d'un piston indéformable dont la vitesse est celle du centre du speaklet.

3 Le simulateur acoustique

Un simulateur acoustique a été développé sous Matlab. Son principe repose sur la convolution discrète entre le pulse de pression émis par un speaklet et le signal binaire qui le pilote. La méthode d'activation des speaklets est fixée (de proche en proche) mais il est tout de même possible de faire le choix de ne pas utiliser le même speaklet pendant 2 périodes de reconstruction consécutives et permettre ou non qu'il soit utilisé pour émettre un pulse positif et négatif. La géométrie du HPD est prise en compte dans le simulateur en calculant les différences de marche entre chacun des speaklets et le point d'écoute. On a ensuite la possibilité de rentrer les caractéristiques mécaniques du speaklet qui sera alors assimilé à un système masse-ressort-amortisseur pour le calcul de sa vitesse impulsionnelle. Une autre possibilité qui donne de meilleurs résultats est l'importation de données mesurées expérimentalement ou obtenues par éléments finis, comme par exemple la vitesse au centre du speaklet. Le modèle de la source ponctuelle est ensuite utilisé pour calculer le pulse de pression. Ce modèle a été choisi pour sa simplicité d'utilisation car seule la mesure de la vitesse au centre du speaklet est requise contrairement au modèle de Rayleigh qui nécessite la connaissance de la vitesse sur toute la surface du speaklet. Si les données importées sont des réponses impulsionnelles normées par rapport à la tension (ce qui est notre cas), il est possible de générer ou d'importer le pulse de tension envoyé sur les speaklets. Le pulse de pression émis par un speaklet est alors obtenu par convolution de la réponse impulsionnelle pression/tension et du pulse de tension. Finalement, le simulateur permet de choisir le signal à reconstruire et une fois la reconstruction effectuée, donne la possibilité de visualiser les spectres.

4 Mise en œuvre expérimentale

4.1 Présentation du HPD

Le HPD macroscopique étudié est constitué de 8 speaklets piézoélectriques de 2.7 cm de diamètre (figure 2). Leur fréquence propre est d'environ 3 kHz. Les différences de caractéristiques mécaniques existantes entre chacun des actionneurs sont dues à la méthode de montage peu reproductible (manuelle et individuelle). Le HPD est placé au centre d'un grand baffle en bois qui est lui-même posé sur le sol réfléchissant d'une salle semi-anéchoïque.



FIGURE 2 – Le HPD étudié

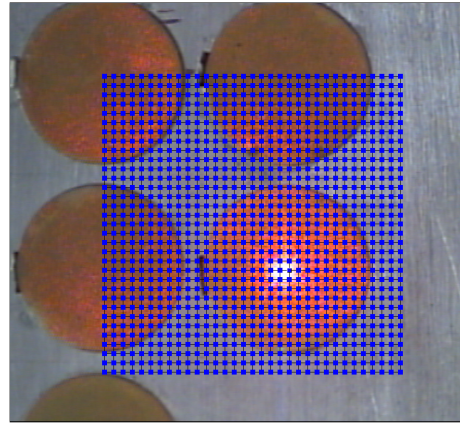


FIGURE 3 – Définition du maillage

4.2 Moyens d'acquisitions

Pour mesurer le profil de vitesse à la surface d'un speaklet, on dispose d'un vibromètre laser à balayage. Un maillage de 1089 points est défini autour du speaklet étudié (figure 3). Il dépasse volontairement sur les speaklets voisins inactifs afin de détecter un éventuel phénomène de diaphonie mécanique. Le speaklet est excité par un bruit blanc en tension. La fonction de transfert 'vitesse/tension' pour chacun des points du maillage est ensuite calculée. L'étude est menée dans l'intervalle de fréquence [18,75 - 20000 Hz] avec un pas de 6.25 Hz. On dispose également d'un microphone de mesure dont la réponse est constante dans le domaine des fréquences d'intérêt. La fonction de transfert 'pression acoustique/tension d'excitation' est alors calculée. Ce microphone sera également utile pour faire l'acquisition des signaux reconstruits de façon digitale.

5 Résultats et discussion

5.1 Déformées modales du speaklet

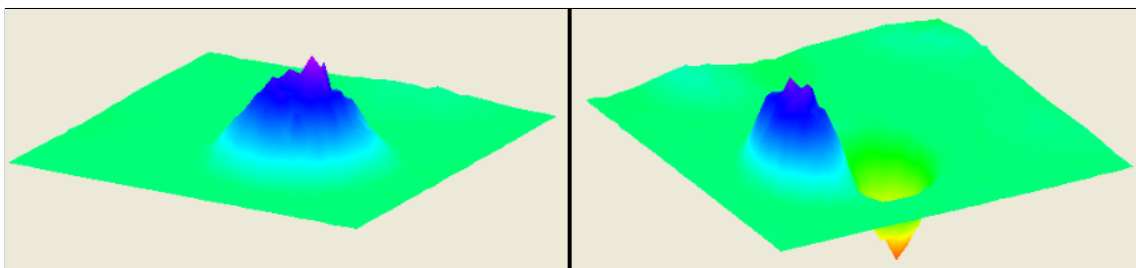


FIGURE 4 – Déformées modales du speaklet. A gauche : mode 1 (3500 Hz). A droite : mode 2 (7800 Hz)

Le logiciel fourni avec le vibromètre permet la visualisation en 3 dimensions de la déformée de la surface du speaklet. La figure 4 montre les 2 premières déformées modales, à 3500 Hz (mode 1) et à 7800 Hz (mode 2). Compte tenu de ce résultat, le modèle de la source ponctuelle qui se base sur la vitesse au centre ne sera plus représentatif à partir de fréquences approchant le mode 2.

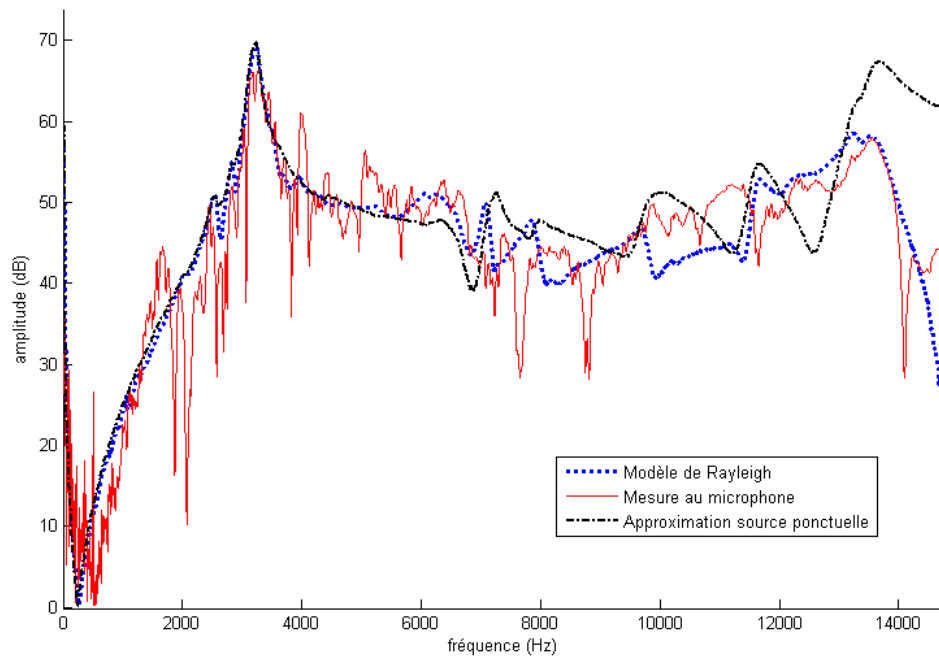


FIGURE 5 – Fonctions de transfert 'pression/tension' calculées ou mesurées à 39cm en face du speaklet

5.2 Comparaison entre calcul et mesure du rayonnement d'un speaklet

La figure 5 présente les fonctions de transferts 'pression/tension' à 39 cm en face du speaklet, obtenues de 3 façons différentes : en utilisant les 2 modèles exposés dans la théorie puis en effectuant une mesure avec le microphone. Les irrégularités dans la mesure au microphone sont dues aux résonances de la salle semi-anéchoïque qui possède certains défauts. Mis à part cela, une bonne concordance est notée entre le modèle de Rayleigh et la mesure au microphone. Une très bonne similitude est également remarquable entre les 2 modèles théoriques jusqu'à environ 5 kHz. La différence qui survient à partir de cette fréquence s'explique de 2 façons. Tout d'abord, il a été dit que le modèle de la source ponctuelle est valable pour un piston dont le rayon est plus petit qu'un huitième de la longueur d'onde du son qu'il émet. Avec un speaklet de 1.35 cm de rayon, on obtient une fréquence limite de 3148 Hz. En réalité la déformation du speaklet n'est pas celle d'un piston mais plutôt un intermédiaire entre celle d'une plaque appuyée et d'une plaque encadrée. Par conséquent la véritable fréquence limite est certainement plus haute. La seconde raison est l'apparition du mode 2 aux alentours de 7800 Hz qui rend un modèle basé sur la vitesse au centre inutilisable.

5.3 Reconstruction digitale de signaux simples

Les reconstructions digitales de signaux sinusoïdaux ont été enregistrées et comparées avec la simulation. La figure 6 présente le cas d'un sinus de fréquence 1500 Hz qui est reconstruit avec une fréquence d'horloge égale à 4410 Hz. Le pic à 1500 Hz est bien présent dans la simulation et dans la mesure au microphone, ainsi que les pics parasites prévues par la théorie (5). L'amplitude de ces pics est proportionnelle au spectre du pulse $S(f)$ émis par les speaklets. Compte tenu de ce qui a été exposé dans la section 5.2, les différences d'amplitude entre la simulation et la mesure à partir de 5 kHz sont explicables. Avant cette fréquence, des différences sont tout de même observables, notamment à la fréquence 1500 Hz puis au premier pic parasite de fréquence 2910 Hz. Ces différences sont dues aux hypothèses qui sont faites dans la simulation, la principale étant d'avoir caractérisé un seul speaklet choisi aléatoirement et de considérer les 7 autres exactement identiques. Le pulse de tension envoyé aux speaklet est également considéré comme répétable alors qu'une modulation de ce signal a été constaté dans le temps. La simulation prévoit donc une forte amplitude à 2910 Hz alors qu'un étalement est constaté dans la mesure. D'autres pics sont également visibles et correspondent à la quantification périodique du signal. Ils sont de faibles amplitudes mais peuvent être également amplifié par $S(f)$.

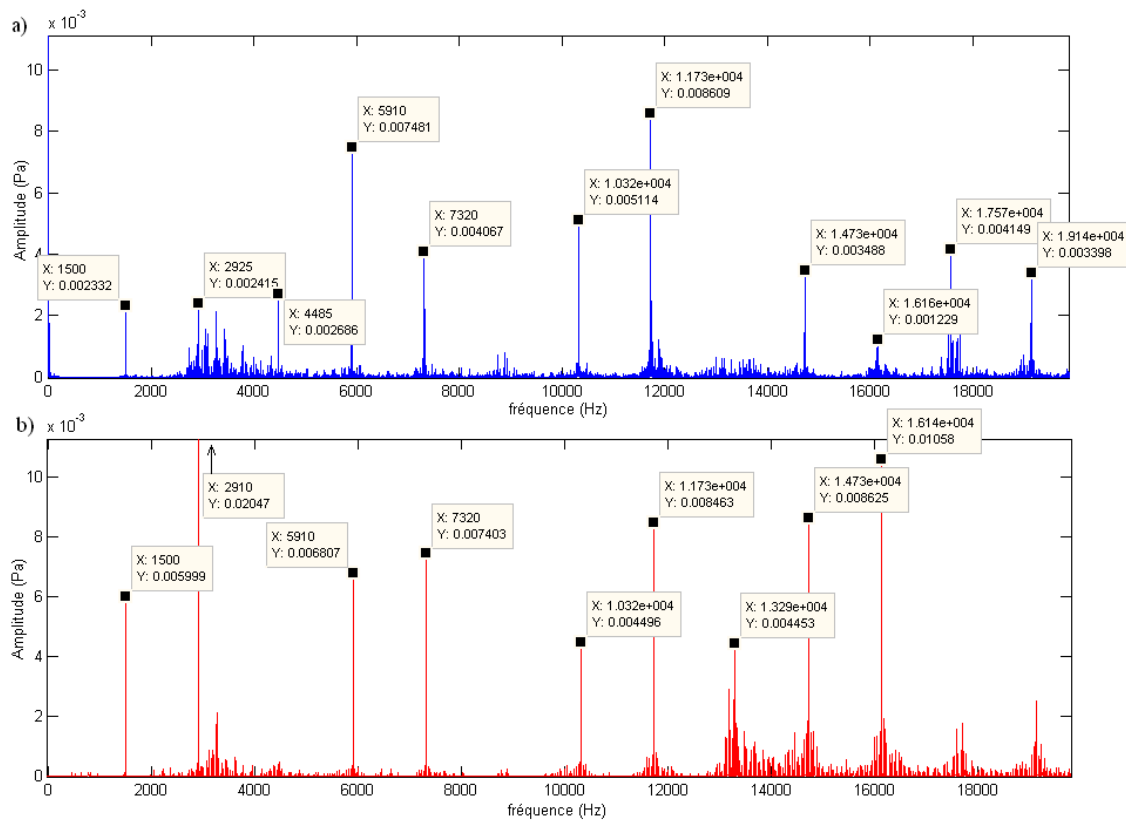


FIGURE 6 – Reconstruction digitale d’un sinus de fréquence $f = 1500$ Hz à la fréquence d’horloge $f_r = 4410$ Hz a) Spectre du son mesuré b) Spectre du son simulé

6 Conclusions et perspectives

Cette étude sur un HPD macroscopique a permis de valider la théorie concernant le rayonnement acoustique d’un HPD et de vérifier le bon fonctionnement du simulateur. Il est cependant important de garder en tête les limitations du modèle utilisé dans le simulateur compte tenu des dimensions et des caractéristiques non homogènes des speaklets. De meilleurs résultats sont attendus avec le HPD en technologie MEMS qui va être disponible prochainement. Les rayons des speaklets varieront de 400 à 2500 μm et la fabrication collective assure leur homogénéité. Le simulateur sera alors utile pour la phase de conception d’un deuxième HPD en permettant de faire varier ses caractéristiques et ainsi déterminer celles qui sont optimales pour la restitution du son.

Références

- [1] J. J. Neumann Jr., K. J. Gabriel, 2002, CMOS-MEMS membrane for audio-frequency acoustic actuation, *Sensors and Actuators* **95**, p. 175-182
- [2] J. L. Flanagan, 1980, Direct Digital-to-Analog Conversion of Acoustic Signals, *Bell Sys. Tech. J.* **59**, p. 1693-1719
- [3] B. M. Diamond, J. J. Neumann Jr., K. J. Gabriel, 2002, Digital Sound reconstruction using arrays of CMOS-MEMS microspeakers, *The Fifteenth IEEE Int. Conf. on Micro ElectroMech. Systems*, p. 292-295
- [4] P. Valousek, 2006, A digital loudspeaker : experimental construction, *Acta polytechnica* **46**, p. 40-42
- [5] N-A. Tatlas, J. Mourjopoulos, 2009, Digital Loudspeaker Arrays Driven by 1-bit Signals, *Audio Eng. Soc.* **57**, p. 38-45
- [6] J. Mendoza-Lopez, S. C. Busbridge, P. A. Fryer, 2007, Direct Acoustic Digital-to-Analog Conversion with Digital Transducer Array Loudspeakers, *Audio Eng. Soc.* **55**, p. 472-502
- [7] C. Lesueur, M. Gotteland, 1988, Rayonnement acoustique. Eléments de base In Rayonnement acoustique des structures, *Rayonnement acoustique des structures (C. Lesueur)*, p. 125, Editions Eyrolles, Paris.