



## **Nouvelles technologies de transducteurs électroacoustiques pour applications nomades**

E. Martincic<sup>a</sup>, G. Sassine<sup>a</sup>, A. Houdouin<sup>a,b</sup>, I. Shahosseini<sup>a</sup>, M. Woytasik<sup>a</sup>, J. Moulin<sup>a</sup>, E. Lefeuvre<sup>a</sup>, S. Durand<sup>b</sup>, N. Yaakoubi<sup>b</sup> et Y. Aurégan<sup>b</sup>

<sup>a</sup>IEF - Univ. Paris-Sud, Bat. 220, Campus d'Orsay, 91405 Orsay, France

<sup>b</sup>LAUM, Université du Maine, Av O Messiaen, 72017 Le Mans Cedex, France  
emile.martincic@u-psud.fr

La cohabitation de fonctions de plus en plus nombreuses dans les dispositifs électroniques pose aux fabricants de nombreux problèmes d'intégration. Ainsi, il est nécessaire dans les téléviseurs de salon de limiter le volume des haut-parleurs. Cette contrainte de miniaturisation est encore plus prégnante pour les applications nomades (téléphones ou ordinateurs portables, tablettes, etc). De nouveaux types de transducteurs décrits dans la littérature répondent à ces nouveaux défis d'intégration, soit par un volume global fortement diminué, soit par l'utilisation de technologies émergentes (MEMS, nanotubes, graphène), soit par l'utilisation de transducteurs en film, de volume virtuellement nul. Il est rare qu'une technologie de transducteurs permette de satisfaire tous les critères de "qualité" souhaités par les fabricants de matériel grand public. Un encombrement très réduit est souvent obtenu au détriment de la qualité sonore ou du niveau d'émission. Nous nous proposons de faire le point sur ces technologies émergentes de transducteurs, en comparant les encombrements des diverses technologies et les performances obtenues.

## 1 Introduction

Les dispositifs nomades aujourd'hui présents tout au long de nos journées permettent, via les réseaux de communication filaires ou sans fil, la réception de nombreux contenus multimédia de haute qualité (vidéo HD, son spatialisé, etc.). Toutefois, si la restitution de l'image a fait de gros progrès au cours des la dernière décennie (écrans haute définition, 3D et bientôt holographiques), la restitution de flux sonores numériques multi-canaux pêche quant-à elle par le dernier élément de la chaîne acoustique : le haut-parleur. Ce transducteur, chargé d'assurer la restitution sonore, est encore à l'ère analogique (même si des versions numériques sont à l'étude dans les laboratoires et les start-up) et présente un rendement très faible et des performances acoustiques (taux de distorsion harmonique, bande passante) médiocres.

Après avoir présenté les facteurs de dimensionnement des haut-parleurs miniatures (surface émissive, rendement et bande passante), le présent article se propose de dresser l'état de l'art dans le domaine des micro-haut-parleurs pour les différents principes de transduction électro-acoustique utilisables (électrostatique, piézoélectrique, électrodynamique, thermo-acoustique). Les principes de fonctionnement des différents transducteurs de la littérature sont expliqués et les performances acoustiques sont explicitées.

## 2 Facteurs de dimensionnement

La miniaturisation de haut-parleurs conduit à choisir des structures aussi fines que possible. Les surfaces émissives tendent alors à être planes, contrairement aux surfaces coniques des haut-parleurs macroscopiques. La puissance acoustique émise par une surface plane circulaire se déplaçant sous l'effet d'une excitation harmonique selon le mode piston est donnée par l'équation 1 [14] :

$$P_{acoustique} = 0,27 f^4 D^4 x_{crête}^2 \quad (1)$$

$f$  étant la fréquence du déplacement,  $D$  le diamètre de la surface émissive et  $x$  la valeur du déplacement par rapport au plan de la surface au repos. Il apparaît à travers l'équation 1 que la tâche de miniaturisation de haut-parleurs, c'est-à-dire la réduction des dimensions (du diamètre ici) de la surface émissive a pour conséquences naturelles une limitation de la puissance acoustique émise, de la limite basse de la bande passante ou des deux. Si on impose une fréquence basse donnée, les variables d'ajustement deviennent le diamètre de la surface émissive et le déplacement hors plan de cette surface.

L'équation 1 indique également qu'une diminution des dimensions latérales de la surface émissive d'un facteur d'échelle  $\alpha$  doit être compensée, pour conserver une puissance identique par une augmentation du déplacement de cette surface proportionnelle à  $\alpha^2$ . L'utilisation visée du  $\mu$ HP, supra, intra-aurale ou non détermine son encombrement et sa forme : la puissance nécessaire pour une application « mains libres » d'un appareil portable est plus exigeante que l'application intra-aurale. L'intensité sonore généralement recherchée est généralement de l'ordre de 80dB SPL, à 1 cm pour un système intra-aural et à 10 cm pour un système mains libres. Comme pour les haut-parleurs macroscopiques, la reproduction des basses fréquences requiert une plus grande surface émissive que la reproduction des hautes fréquences.

La puissance acoustique  $P_{acoustique}$  émise par le transducteur peut être rapportée au niveau sonore  $L_{dB}$  mesuré par [21] :

$$P_{acoustique} = 4\pi d^2 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{L_{dB}/10} \quad (2)$$

$d$  étant la distance au transducteur. Bien que modulée par la forme du transducteur pouvant affecter notamment la directivité et donc la répartition spatiale de l'énergie acoustique, l'équation (2) fournit une estimation précieuse pour situer les qualités des diverses technologies de  $\mu$ HP.

Dans le cas spécifique des applications portables, la consommation électrique des différents modules embarqués revêt une importance particulière. Le rendement énergétique de la conversion électroacoustique est défini comme le rapport de l'énergie acoustique effectivement émise à l'énergie électrique injectée dans le transducteur est de l'ordre de quelques % pour des haut-parleurs électrodynamiques macroscopiques, mais se trouve fortement réduit pour les  $\mu$ HP.

## 3 Modes d'actionnement

Plusieurs alternatives sont disponibles. Dans le cas où une grande excursion est recherchée, un actionnement à distance est nécessaire. Cet actionnement à distance peut être obtenu par un moteur électromagnétique, traditionnel dans les haut-parleurs macroscopiques. Les distances de travail plus modestes des  $\mu$ HP rendent séduisante l'alternative électrostatique.

### 3.1 Actionnement électrostatique

Pour les structures électrostatiques, le déplacement est obtenu par l'application d'une différence de potentiel électrique entre 2 surfaces, l'une d'elles étant la surface émissive acoustique (Fig. 1). En supposant les dimensions

latérales grandes devant la distance entre la surface émissive et la contre-électrode, la pression électrostatique  $P_e$  exercée sur un élément de surface porté à un potentiel électrique  $U$  peut être exprimé par :

$$P_e = \frac{\epsilon U^2}{2e^2} \quad (3)$$

$\epsilon$  étant la permittivité électrique du milieu et  $e$  la distance de cet élément de surface à la contre-électrode.

La distance à la contre électrode devient alors l'excursion maximale de la surface émissive, et donc détermine la puissance acoustique maximale. L'augmentation de l'excursion est alors réalisée au prix d'une augmentation de la tension de commande, le plus souvent composée d'une tension de signal et d'une tension de polarisation, cette dernière pouvant atteindre plusieurs dizaines, voire centaines de volts.

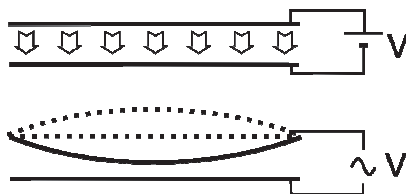


Figure 1 : principe de fonctionnement d'un haut-parleur à actionnement électrostatique.

Les choix de surface émissive effectués dans la littérature pour ce type d'actionnement sont d'avoir une membrane déformée par la force électrostatique pour la production du son. L'équation (3) indique alors que la force exercée sur la membrane est proportionnelle au carré de la tension de commande. Elle est également inversement proportionnelle à la distance inter-électrodes de chaque élément de surface, donc variable avec le déplacement de la membrane. Intrinsèquement, l'actionnement électrostatique est donc générateur d'harmoniques indésirables. Le tableau 1 recense quelques caractéristiques de  $\mu$ HP électrostatiques.

Tableau 1 : Caractéristiques de quelques  $\mu$ HP électrostatiques de la littérature.

Réf. Année	SPL dB	Dimensions/ Espace inter-électrodes	Fréq. (Hz)	Tensions Polarisation / Signal (V)
[17] 1996	90-110 @ 1 cm	1 mm / 10 $\mu$ m	60-160k	0-95 / 50
[16] 2002	70-80 simul. oreille	1,44 mm / 60-80 $\mu$ m	40-10 k	20-80 / 10
[18] 2007	73 @ 1 cm	0,7 mm / 8 $\mu$ m	4k-20k	100-200 / 50
[26] 2013	?	7 mm / 60 $\mu$ m	50-20k	100/10

Dans tous les cas recensés dans le tableau 1, l'espace entre la membrane et la contre-électrode est compris entre 10 et 80  $\mu$ m. Ces faibles distances nécessaires au maintien d'une tension raisonnable d'actionnement limitent le déplacement possible de la membrane et donc la puissance acoustique émissible.

La très faible masse de la membrane [26] permet de supposer un rendement de la conversion électroacoustique pour ce  $\mu$ HP. Les auteurs estiment le rendement obtenu dans ce travail à 6 ordres de grandeur au dessus du rendement des transducteurs électroacoustiques. Malheureusement, aucune comparaison avec d'autres  $\mu$ HP n'est avancée.

### 3.2 Actionnement piézoélectrique

Le mode d'actionnement piézoélectrique suppose un contact physique entre le matériau piézoélectrique, déformé sous l'effet d'une tension électrique, et la surface émissive, dont le déplacement produit l'onde sonore. Les matériaux piézoélectriques subissent des petites déformations sous l'effet des tensions électriques appliquées (Fig. 2). Deux modes de polarisation du cristal piézoélectrique sont possibles et conduisent à deux modes de déformation [11].

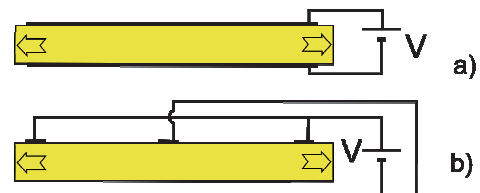


Figure 2 : modes de déformation d'un cristal piézoélectrique lors de l'application d'une tension sur les électrodes. a) mode transverse ( $d_{31}$ ) ; b) mode longitudinal ( $d_{33}$ ).

Les coefficients  $d_{31}$  et  $d_{33}$  de la matrice des propriétés piézoélectriques traduit la déformation obtenue par unité de tension appliquée. Ce coefficient est de l'ordre de quelques pm/V à quelques milliers de pm/V. Même si une tension de plusieurs centaines de V peut être gérée dans un dispositif portable, les déformations résultantes restent trop petites avec les matériaux classiques (ZnO, PZT, AlN ...) pour provoquer à elles seules l'émission d'une puissance acoustique conséquente. Les structures d'actionnement piézoélectrique pour les  $\mu$ HP font appel à une structure mécanique amplificatrice de la déformation intrinsèque du cristal (Fig. 3).

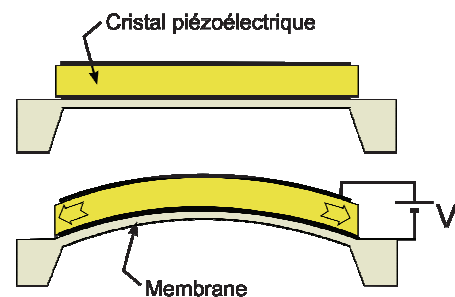


Figure 3 : déformation d'une membrane bimorphe sous l'effet de la contrainte induite dans le matériau piézoélectrique par la tension appliquée.

Dans le cas des  $\mu$ HP micro-usinés sur silicium (MEMS), un matériau piézoélectrique équipé d'électrodes est placé sur une membrane fine (typiquement quelques  $\mu$ m [3, 11, 15, 25]). L'application d'une tension sur le cristal piézoélectrique conduit à une elongation de ce cristal et la torsion de la structure bimorphe formé par la membrane et le cristal. La torsion di bimorphe n'est souvent pas suffisante pour produire l'intensité sonore désirable en basses fréquences (<10 kHz). Quelques exemples de la

littérature [3, 25] utilisent la résonance de la membrane dans les fréquences intermédiaires (quelques kHz) pour amplifier l'émission sonore, au prix d'une très forte ondulation de l'intensité sonore dans la bande audible.

Tableau 2 : Caractéristiques de quelques  $\mu$ HP piézoélectriques de la littérature.

Réf. Année	SPL dB	Dimensions	Fréq. (Hz)	Membrane
[25] 2002	80 @3 mm moyens	4,5x4,5 mm	2,5kHz-12kHz	0,1 $\mu$ m $\text{Si}_x\text{N}_y$ + 0,7 $\mu$ m LTO
[3] 2008	+ de 80dB	$\Phi$ 0,5-1 mm	1,5 kHz-20 kHz	AlN sur 1 $\mu$ m $\text{Si}_x\text{N}_y$
[11] 2009	85 @ 1cm	1,5x1,5 cm	800Hz-7kHz	PMN-PT / $\text{Si}_x\text{N}_y$
[12] 2009	90 @ 1 cm	1,8x2 cm	400-10kHz	PZT

D'autres travaux ont cependant permis d'obtenir une réponse quasiment plate dans la bande passante [11, 12]. Comme dans le cas des  $\mu$ HP électrostatiques, les mesures de propriétés des structures piézoélectriques est effectuée à une distance de 1 cm du transducteur, distance représentative des transducteurs destinés à une application supra ou intra-aurale : l'onde générée par le haut parleur est guidée jusqu'au tympan par un conduit adapté.

### 3.3 Actionnement électromagnétique

L'actionnement électromagnétique (également appelé électrodynamique) reste aujourd'hui le mode d'actionnement privilégié dans une large palette d'applications. Du fait de l'utilisation quasi universelle des transducteurs électrodynamiques les circuits électroniques de commande sont très répandus et ont un coût faible. De plus, leur tension de commande est immédiatement compatible avec les tensions usuelles de batterie des dispositifs nomades. Les dispositifs portables sont majoritairement équipés d'un  $\mu$ HP électrodynamique conventionnel. Les  $\mu$ HP électrodynamiques sont en outre les seuls transducteurs pour appareils portables à afficher une utilisation « Hi-Fi ».

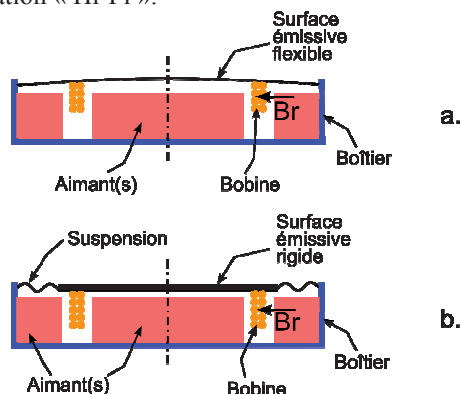


Figure 4 : principe de fonctionnement de  $\mu$ HP électrodynamiques (à actionnement magnétique).

L'actionnement est obtenu par la circulation d'un courant à travers la bobine dans un champ magnétique créé à l'aide d'un aimant permanent. La force exercée sur un segment de fil conducteur de longueur  $dl$  placé dans un

champ d'induction magnétique  $B$  et parcouru par un courant  $I$  est la Force de Laplace :

$$F_{Laplace} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (3)$$

Dans le cas d'une structure axisymétrique, seule la composante radiale du champ magnétique occasionne un déplacement de la structure. La force totale exercée sur une bobine de  $N$  spires concentriques peut être exprimée par :

$$F = 2\pi I \sum_{i=1}^N r_i B_r(r_i) = I \cdot f_{Force}. \quad (4)$$

I étant le courant parcourant la bobine,  $r_i$  le rayon de la  $i^{\text{ème}}$  spire de la bobine et  $B_r(r_i)$  la composante radiale de l'induction magnétique vue par la  $i^{\text{ème}}$  spire. La force exercée peut être exprimée comme le produit du courant parcourant la bobine par le facteur de force  $f_{Force}$ .

Une des manières de favoriser le déplacement de la membrane sous l'effet d'une force est de rendre la membrane la plus souple possible (Fig. 4.a.) [1]. Cette forte efficacité acoustique est cependant obtenue au détriment de la qualité sonore et la solution couramment adoptée dans les  $\mu$ HP consiste plutôt à réaliser une surface rigide dont la périphérie, plus souple est utilisée comme suspension. Cette solution permet de limiter ou d'éliminer les modes propres de vibration de la surface émissive dans la bande audible et notamment du mode fondamental (mode tambour). Plusieurs géométries de la membrane ont été réalisées en technologies conventionnelles, de manière à fabriquer la partie rigide de la membrane d'un seul tenant [2, 8]. Une autre solution consiste à utiliser un matériau très rigide, par exemple le silicium pour les haut-parleurs MEMS, et à rigidifier la face arrière de la surface émissive par des nervures (ou raidisseurs) : cette solution offre un bon compromis entre la rigidité obtenue permettant de repousser la majorité des modes au-delà des fréquences audibles et l'augmentation (modeste) de la masse mobile [19].

Le rendement de la conversion électroacoustique dépend de plusieurs facteurs, notamment de la masse mobile totale et des pertes par effet Joule dans la bobine [20]. Il peut être exprimé par :

$$\eta = \frac{\rho \pi r^4}{4c} \cdot \frac{1}{R} \left( \frac{f_{Force}}{M_{Bobine} + M_{Membrane}} \right)^2. \quad (5)$$

$\rho$  étant la masse volumique de l'air (1,2 kg/m<sup>3</sup> à 20°C),  $r$  le rayon de la surface émissive,  $c$  la vitesse du son (343 m/s à 20°C),  $R$  la résistance de la bobine (10  $\Omega$ ),  $M_{Bobine}$  et  $M_{Membrane}$  les masses respectives de la bobine et de la membrane. Le rendement électroacoustique revêt une importance particulière dans les dispositifs portables, puisqu'une part significative de la puissance utilisée pour la génération de son est perdue du fait du faible rendement de la chaîne de conversion électroacoustique, et du transducteur en particulier. Outre la conception de l'équipage mobile du transducteur et la résistance électrique de la bobine, les équations (4) et (5) montrent que le facteur de force a une influence directe sur le rendement de la conversion électroacoustique. La composante radiale de l'induction magnétique, à l'origine de la force d'actionnement, doit être maximisée.



Plusieurs stratégies ont été mises en œuvre pour utiliser au mieux la structure magnétique. Dans [8], Le volume total des aimants est divisé en une partie annulaire et une partie cylindrique placée en son centre. Ces 2 aimants (Figure 5.a) forment 2 circuits magnétiques utilisés pour actionner 2 membranes : l'une sur la face avant et l'autre sur la face arrière. La stratégie décrite dans [13] consiste à utiliser au maximum l'espace submembranaire pour l'aimant (Figure 5.b).

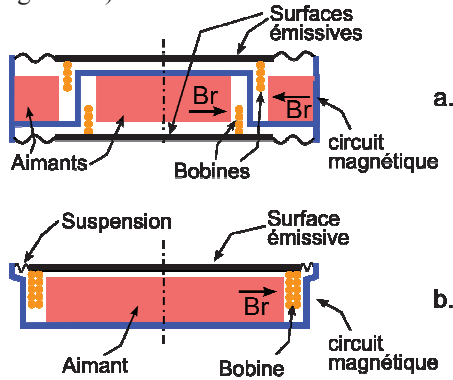


Figure 5 : variantes de positionnement du ou des aimants dans un  $\mu$ HP.

Les travaux réalisés par notre équipe portent sur un  $\mu$ HP électrodynamique dont la surface émissive est réalisée en silicium. Afin de rendre la surface émissive rigide, une structure originale a été développée et réalisée par des moyens de fabrication de la microélectronique (disponibles en salle blanche). La surface émissive est constituée d'une forme quasi-circulaire de diamètre 1,5 cm silicium dont la face arrière a été équipée de raidisseurs de manière à réduire sa masse et à repousser les modes propres de vibration de la surface émissive hors de bande audible. Les suspensions entre le support et la surface émissive, en silicium également ont été conçues pour permettre un grand déplacement hors plan et la production d'une onde sonore de 80 dB SPL à 10 cm [20].

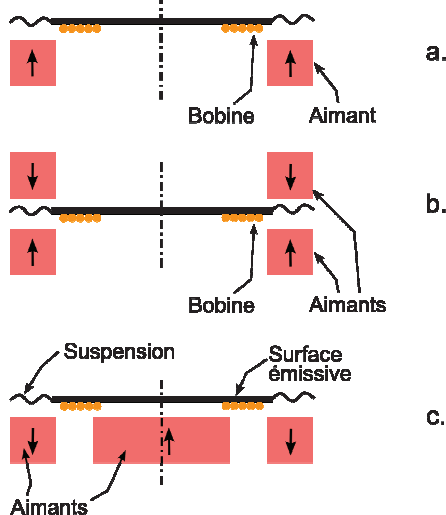


Figure 6 : les configurations des aimants correspondant à quelques résultats de notre équipe.

La bobine est micro-usinée sur la surface émissive, notamment par croissance électrolytique. L'étanchéité entre les faces avant et arrière du  $\mu$ HP est obtenue par report d'un film de PDMS formé dans un moule spécialement conçu à cette fin [5]. De nombreuses configurations d'aimants peuvent être employées dans le but d'améliorer le facteur

de force de l'actionnement et l'efficacité de la conversion électroacoustique. Deux configurations correspondant aux résultats présentés ici sont représentées à la figure 6.

Un boîtier a été conçu pour permettre la manipulation et l'assemblage de la partie micro-usinée avec les aimants. Ce boîtier comprenant une cavité de 8,5 cm<sup>3</sup> a également été employé pour la mesure des performances du  $\mu$ HP. Une vue de CAO ainsi qu'une photo du  $\mu$ HP dans ce boîtier sont présentées à la figure 7.

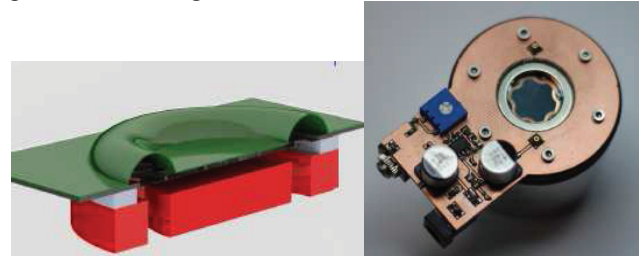


Figure 7 : Une vue de CAO en coupe de l'assemblage du  $\mu$ HP [Shahosseini2013, 5] avec deux aimants cylindrique + annulaire (gauche) et une vue du  $\mu$ HP avec un amplificateur (aimant annulaire seulement).

La puissance acoustique mesurée en salle anéchoïque en fonction de la fréquence pour différentes puissances électriques d'entrée est représentée à la figure 8. Ces mesures ont été réalisées pour différentes puissances électriques injectées au sein de la bobine. Le  $\mu$ HP en silicium a été monté sur une cavité de 8,5 cm<sup>3</sup> avec une configuration à deux aimants permanents NdFeB ayant chacun une valeur d'aimantation d'1.5T. Ces deux aimants, l'un annulaire et l'autre une pastille ont été placés à une distance de 500  $\mu$ m du côté de la bobine planaire (Fig. 6.c et 7.gauche).

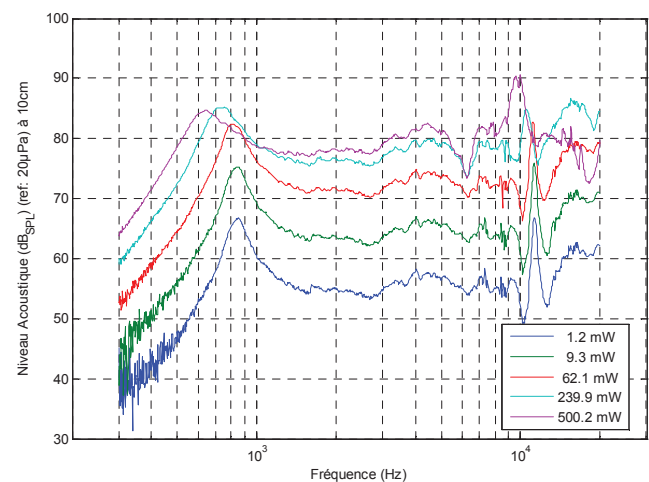


Figure 8 : niveau acoustique en fonction de la puissance électrique reçue par le  $\mu$ HP.

La configuration de la Fig. 6.c a permis l'amélioration du champ magnétique au niveau de la bobine par rapport à la configuration à deux aimants annulaires (Fig. 6.a). Le facteur de force a été amélioré d'une valeur moyenne de 0,1 pour une configuration à deux aimants annulaires de part et d'autre de la bobine (Fig. 6.b) à une valeur de 0,2 pour cette configuration. Cette amélioration du facteur de force apparaît à travers le rendement de la conversion, de valeurs mesurées entre 0,015%-0,045%. Le rendement est aussi augmenté d'un facteur  $\sim 3$  par rapport à la configuration de

la Fig. 6.a. mais également par rapport aux  $\mu$ HP comparables de la littérature.

## 4 Haut-parleurs en films minces

### 4.1 Conversion thermoacoustique

Un gaz chauffé se dilate et occupe un volume plus grand qu'à sa température de repos, ou à volume donné, une augmentation de la pression de ce gaz. Le chauffage périodique d'une surface entraîne donc le réchauffement périodique de la couche d'air en contact avec cette surface et la création subséquente d'une onde acoustique. Le chauffage d'une surface implique des transferts thermiques, i) vers l'air pour la création de l'onde acoustique et ii) vers le solide supportant le conducteur.

La compétition entre les transferts thermiques conduit à 2 régimes de fonctionnement [6] : en basses fréquences (audibles), une courbe approximativement monotone de pente positive, de l'ordre de 20dB SPL/décade [22, 24] est obtenue. En hautes fréquences, le transfert solide devient nul et la réponse devient plate [6, 23]. Par la diminution de la capacité calorifique du film émissif, les microtechnologies, puis les nanotechnologies ont amélioré le rendement de la conversion thermoacoustique de plusieurs ordres de grandeur et permis leur utilisation en électroacoustique dans le domaine audible. Ces mêmes technologies de micro-nanofabrication ont été employées pour réduire le transfert thermique vers le support, par l'emploi de polymères (PDMS, PMMA) et l'usinage de microcavités. Les auteurs soulignent cependant que la limite théorique de la conversion électroacoustique dans la bande de fréquence audible se situe 40dB au dessus des résultats obtenus [22], soit 60dB SPL à 3cm à 1 kHz (80dB à 10 kHz) pour une surface de  $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$  et une puissance électrique de 0,25 W. En utilisant l'équation (2), on peut estimer le rendement théorique maximal de la conversion thermoacoustique à 1kHz à environ  $4 \cdot 10^{-6}$ , bien que les résultats démontrés le situent 4 ordres de grandeur sous cette valeur.

### 4.3 Conversion électroactive

Les actionneurs électroactifs sont basés sur l'emploi d'un matériau très déformable, généralement un polymère de la famille des élastomères, placé entre deux électrodes. Lors de l'application d'une tension, la pression électrostatique s'exerce sur les surfaces des électrodes et tend à les rapprocher. On peut alors imaginer 2 stratégies pour obtenir une onde acoustique : une des deux électrodes peut être fixée et le déplacement concerne la deuxième électrode. La deuxième possibilité consiste à empêcher les déformations du périmètre de la structure, et à forcer ainsi un déplacement hors du plan (Fig. 9). Un diélectrique généralement en élastomère est placé entre 2 électrodes. La très grande déformation possible sans rupture et le fait qu'ils soient incompressibles permet de grands déplacements.

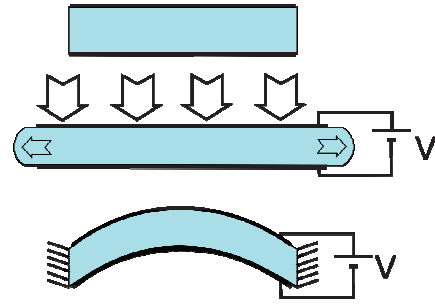


Figure 9 : principe de fonctionnement d'un haut-parleur électroactif.

Si ces principes permettent une émission sonore, les publications récentes mettent en évidence des conditions plus complexes pour obtenir un meilleur rendement [4]. Les techniques employées dans ces articles consistent à contraindre l'élastomère par l'application d'une pression sur la face arrière. Une amélioration de la transduction a été observée et la pression acoustique mesurée est augmentée d'un ordre de grandeur pour des fréquences de quelques centaines de Hz. Plus récemment, des transducteurs basés sur un élastomère à conduction ionique [10]. Sans donner d'échelle d'intensité acoustique, les auteurs montrent une réponse en fréquence de 20 Hz à 20kHz. Les élastomères employés dans la littérature sont transparents, ce qui permet d'envisager leur utilisation sur la face avant (l'écran) des dispositifs portables. La diffusion de cette technologie demandera cependant une réduction des tensions d'actionnement, de l'ordre de plusieurs kV dans le dispositif présenté dans [10].

## 6 Conclusion

De nombreuses technologies permettent de réaliser des  $\mu$ HP intégrables dans les équipements portables contemporains. La miniaturisation requise conduit à rechercher des solutions dans des technologies très variées, notamment dans les micro ou nano-technologies. Cependant, la génération de son par l'actionnement électromagnétique d'une surface reste aujourd'hui la solution la plus répandue, du fait de sa robustesse et du rendement de la conversion électroacoustique. Les  $\mu$ HP électrodynamiques sont également ceux dont les taux de distorsion sont les plus faibles parmi les technologies étudiées dans cet article.

## Remerciements

Les travaux de l'équipe ont été financés par la région Pays de Loire dans le cadre du projet MEMSPA et l'ANR dans le cadre du projet SAIPON.

## Références

- [1] F.L. Ayatollahi, B.Y. Majlis, "Materials design and analysis of low-power MEMS microspeaker using magnetic actuation technology", *Adv. Mater. Res.*, **74**, pp. 243-246, 2009.
- [2] P.C.P. Chao, I.T. Wang, "Dynamical modeling and experimental validation of a micro-speaker with corrugated diaphragm for mobile phones", *Microsyst Technol.* **13**:1241–1252, 2007
- [3] H.C. Cho, S.C. Ur, M.S. Yoon, S.H. Yi "Dependence of Material Properties on Piezoelectric Microspeakers with AlN Thin Film", IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2008
- [4] K. Hochradel, S.J. Rupitsch, A. Sutor, R. Lerch, D.K. Vu, P. Steinmann, "Dynamic performance of dielectric elastomers utilized as acoustic actuators", *Appl Phys A*, DOI 10.1007/s00339-012-6837-2
- [5] A. Houdouin, I. Shahosseini, N. Yaakoubi, E. Lefeuvre, E. Martincic, Y. Aurégan, S. Durand, "Polymer film as an acoustic sealing applied to a silicon MEMS microspeaker", AMPSECA2012, El Jadida (Maroc), 2012
- [6] H. Hu, T. Zhu, J. Xu, "Model for thermoacoustic emission from solids", *APL* **96**, 214101 (2010); doi: 10.1063/1.3435429
- [7] S.M. Hwang, K.S. Hong, H.J. Lee, J.H. Kim, S.K. Jeung, "Reduction of Harmonic Distortion in Dual Magnet Type Microspeaker", *IEEE Trans. Mag.*, **40**, n°4, 2004
- [8] S.M. Hwang, H.J. Lee, J.H. Kim, J.H. Kwon, K.S. Hong, G.Y. Hwang "Development of Hi-Fi microspeakers with a woofer and a tweeter used for mobile phones", *JAP* **97**, 10R512 s2005d
- [9] S.S. Je, N. Wang, H.C. Brown, D.P. Arnold, J. Chae, "An electromagnetically actuated microspeaker with fully-integrated wax-bonded Nd-Fe-B micromagnets for hearing aid applications", Transducers 2009, Denver., USA, 2009
- [10] C. Keplinger, J.Y. Sun, C.C. Foo, P.J.M. Rothmund, G.M. Whitesides, Z. Suo, "Stretchable, transparent, ionic conductors", *Science* **341**(6149): 984-987, 2013.
- [11] H.J. Kim, S.Q. Lee, S.K. Lee, K.H. Park, "A piezoelectric microspeaker with a high-quality PMN-PT single-crystal membrane", *Journal of the Korean Physical Society*, **54**, n° 2, 2009
- [12] H.J. Kim, K. Koo, S.Q. Lee, K.H. Park, J. Kim, "High performance piezoelectric microspeakers and thin speaker array system", *ETRI Journal*, **31**, n° 6, 2009
- [13] C.M. Lee, J.H. Kwon, K.S. Kim, J.H. Park, S.M. Hwang, "Design and analysis of microspeaker to improve sound characteristics in a low frequency range", *IEEE Trans. Mag.* **46**(6):2048–2051, 2010
- [14] R. Lehmann, "Les transducteurs electro et mecano-acoustiques, haut-parleurs et microphones", Chiron, Paris, 1963.
- [15] D.J. Morris, R.F. Need, M.J. Anderson, D.F. Bahr, "Enhanced actuation and acoustic transduction by pressurization of micromachined piezoelectric diaphragms", *Sensors and Actuators A* **161** (2010)
- [16] J.J. Neumann Jr, K.J. Gabriel, "CMOS-MEMS membrane for audio-frequency acoustic actuation", *Sensors and actuators* **95**, 175–182, 2002
- [17] P. Rangsten, L. Smith, L. Rosengren, B. Hök, "Electrostatically excited diaphragm driven as a loudspeaker", *Sensors and Actuators A* **52** (1996) 211–215
- [18] R.C. Roberts, J. Du, A.O. Ong, D. Li, C.A. Zorman, N.C. Tien, "Electrostatically Driven Touch-Mode Poly-SiC microspeaker", IEEE Sensors Conference, 2007, DOI:10.1109/ICSENS.2007.4388392
- [19] I. Shahosseini, E. Lefeuvre, I. Moulin, E. Martincic, W. Woytasik and G. Lemarquand, "Optimization and Microfabrication of High Performance Silicon-Based MEMS Microspeaker", *IEEE Sensors Journal* **13**(1), 273–284, 2007.
- [20] I. Shahosseini, E. Lefeuvre, E. Martincic, M. Woytasik, J. Moulin, S. Megherbi, R. Ravaud, G. Lemarquand, "Microstructured silicon membrane with soft suspension beams for a high performance MEMS microspeaker", *Microsyst Technol* **18**:1791–1799, DOI 10.1007/s00542-012-1477-1, 2012
- [21] E.J. Skudrzyk, "The foundations of acoustics: basic mathematics and basic acoustics", Springer-Verlag, ISBN 978-0-387-80988-5, 1971
- [22] J.W. Suk, K. Kirk, Y. Hao, N.A. Hall, R.S. Ruoff, "Thermoacoustic Sound Generation from Monolayer Graphene for Transparent and Flexible Sound Sources", *Adv. Mater.* 2012.
- [23] V. Vesterinen, A. O. Niskanen, J. Hassel, P. Helistö, "Fundamental Efficiency of Nanothermophones: Modeling and Experiments", *Nano Lett.*, **10** (12), pp 5020–5024, DOI: 10.1021/nl1031869, 2010
- [24] L. Xiao, Z. Chen, C. Feng, L. Liu, ZQ Bai, Y. Wang, L. Qian, Y. Zhang, Q. Li, K. Jiang, S. Fan, Flexible, "Stretchable, Transparent Carbon Nanotube Thin Film Loudspeakers", *Nano Letters*, **8**, n°12, 2008
- [25] S.H. Yi, M.S. Yoon, S.C. Ur, "Piezoelectric microspeakers with high compressive ZnO film and floating electrode", *J Electroceram* **23**:295–300, DOI 10.1007/s10832-008-9438-x, 2009
- [26] Q. Zhou, A. Zettl, "electrostatic graphene loudspeaker", *APL* **102**, 223109, 2013