

HAUT-PARLEURS ET ENCEINTES ACOUSTIQUES

IV.2 Haut-parleurs à ruban

Ces types de haut-parleurs travaillent sur le même principe que les électrodynamiques, mais en réunissant en un même élément diaphragme et bobine mobile, avec une répartition plus homogène des forces appliquées. Dans le cas d'un ruban rectangulaire, l'application directe de la loi de Laplace indique en effet que, sous l'action conjuguée d'un champ magnétique B et d'un courant I parcourant un conducteur de longueur ℓ , celui-ci est soumis à une force uniforme $F = B\ell I$.

Une réalisation classique, dont une première commercialisation semble due à la firme anglaise EMI (1945), a ensuite été reprise par Kelly (fig. 59). Elle est réservée au registre aigu, à la condition d'être complétée par un pavillon pour en améliorer le rendement.

La modélisation d'un tel haut-parleur est complexe, notamment en raison de l'existence des fentes nécessaires à la liberté de déplacement du ruban [17]. L'équivalent analogique obtenu (fig. 60) montre une structure passe-bande où la fréquence de coupure supérieure varie comme $1/d$ (d = masse volumique du matériau, e = épaisseur du ruban) et comme $B^2/\rho d$ (ρ = résistivité du matériau). On en tire les conclusions pratiques suivantes :

- Il faut réduire le plus possible l'épaisseur du ruban.
- Il faut adopter un matériau pour lequel le produit ρd est le plus faible possible.

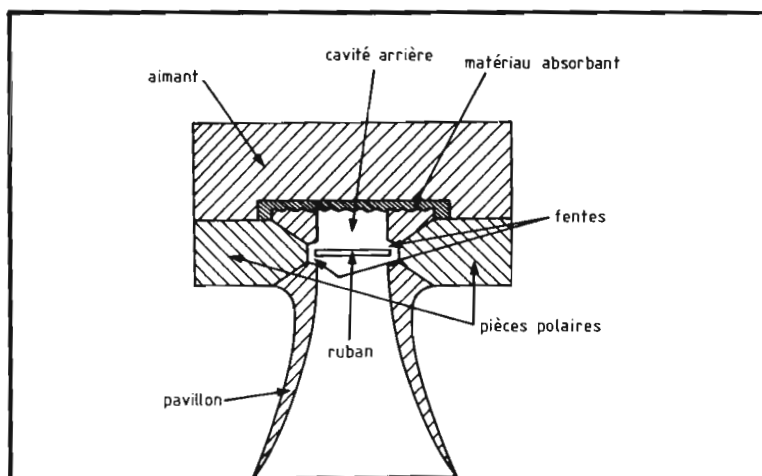


FIGURE 59. - Haut-parleur à ruban muni d'un pavillon exponentiel ou caténoïdal (solution Kelly). La masse du ruban en duralumin est de l'ordre de 10 mg.

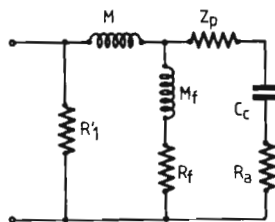


FIGURE 60
Equivalent électrique du circuit mécano-acoustique d'un haut-parleur à ruban à un seul pavillon et charge acoustique arrière.

C_c = élasticité de la cavité arrière.

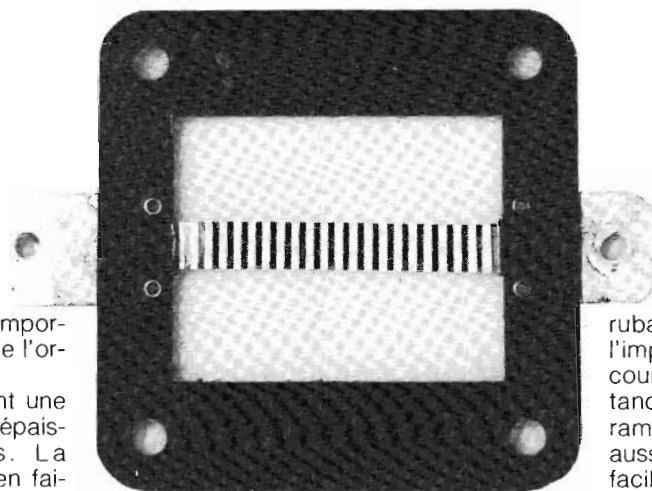
R_a = amortissement arrière.

R_1 = résistance du ruban.

M = masse du ruban.

M_f, R_f = composantes inductive et résistive de l'air à travers les fentes latérales.

Z_p = impédance de l'embouchure du pavillon.



– Il faut un champ magnétique important pour obtenir un rendement de l'ordre du pour-cent.

Sur le premier point, on obtient une robustesse acceptable avec une épaisseur de quelques microns. La deuxième condition est remplie en faisant choix de l'aluminium (suivi de très près par le magnésium et le duralumin).

La réalisation correspondant à la figure 61 fait appel à un ruban en Mylar aluminisé de 2,5 microns d'épaisseur dont le poids avoisine 10 mg, soit 20 fois moins qu'une membrane de tweeter classique. Les cannelures transversales permettent d'abaisser la fréquence de résonance propre du ruban à quelques dizaines de hertz tout en rigidifiant la structure dans le sens transversal (1).

La fragilité relative de la membrane impose certaines précautions d'emploi visant à réduire la puissance appliquée en basse fréquence, ce qui est obtenu

(1) Le courant qui se concentre sur les bords y crée des forces électromagnétiques supérieures qui ont tendance à déformer le ruban.

FIGURE 61. – Élément rayonnant d'un haut-parleur d'aigu à ruban (réalisation DECCA). Dimensions du ruban : 8 mm x 56 mm.

par filtrage à pente d'atténuation au moins égale à 12 dB/octave en dessous de 5 kHz. L'amortissement des mouvements de grande amplitude est par ailleurs réalisé au moyen de points de friction siliconés judicieusement choisis.

Un tel diaphragme a une faible directivité dans un plan horizontal, grâce à la faible largeur du ruban (hauteur 56 mm, largeur 8 mm). Une conception à rubans cylindriques permet d'obtenir un rayonnement omnidirectionnel [18].

L'adaptation entre l'impédance du

ruban (quelques dixièmes d'ohms) et l'impédance nominale impose le recours à un transformateur dont l'inductance de fuite, ainsi que la résistance ramenée au secondaire, devront être aussi réduites que possible, ce qui est facilité par le choix d'un circuit ferrite à faible entrefer, assez éloigné de l'aimant pour éviter toute saturation.

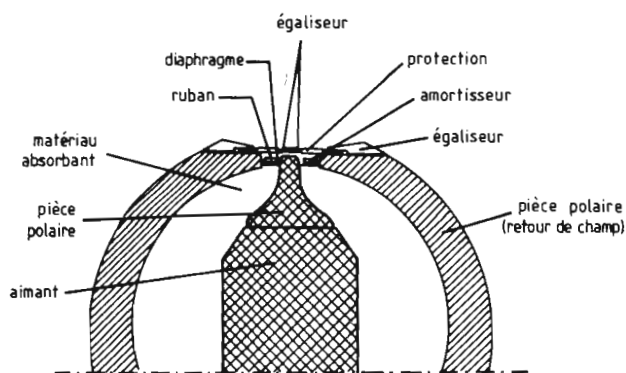
Plusieurs perfectionnements ont été apportés récemment à ce type de haut-parleur :

- 1° en remplaçant le ruban métallique par une membrane polyamide à conducteurs aluminium déposés par évaporation (technique déjà décrite – voir fig. 58) ;
- 2° en modifiant le profil des pièces polaires (biseautage) ;
- 3° en adjoignant des égaliseurs.

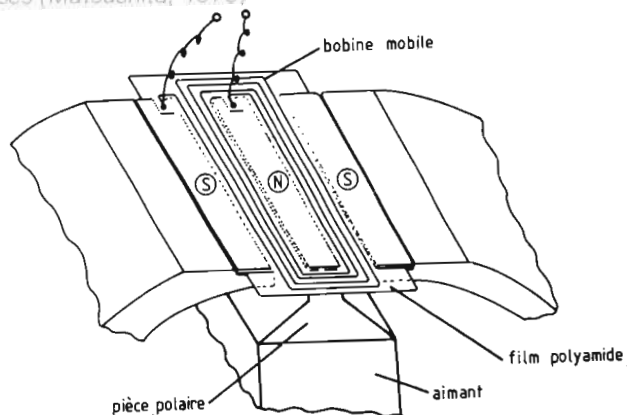
Ce faisant, la firme Matsushita a obtenu avec le modèle de la figure 62, les avantages suivants :

- constance du champ magnétique dans le plan du ruban ;
- meilleure répartition du courant guidé par les conducteurs (d'où découle une moindre déformation de l'élément mobile) ;

FIGURE 62. – Haut-parleur à ruban à trois conducteurs déposés (Matsushita, 1979)



a) vue en coupe ;



b) détail du circuit magnétique.

La membrane est en polyamide 7,5 µm résistant à une température de 435° C. Conducteurs d'aluminium d'épaisseur 6 µm. Masse totale : 8 mg.

- dissipation thermique moins concentrée (répartie sur les deux sections de conducteurs) ;
- régularisation des lobes de directivité grâce à l'adjonction d'un égaliseur frontal qui sépare le rayonnement des deux sections de bobine mobile ;
- suppression du transformateur habituel.

Le transformateur mécano-acoustique de O. Heil (1969) reprend le principe du ruban en lui associant une transformation de vitesse. La figure 63 en illustre le fonctionnement.

Le ruban plissé, constitué ici d'une membrane plastique de 12 microns d'épaisseur, est revêtu d'une série de bandes conductrices parallèles de façon que les forces engendrées par le passage du courant tendent à faire varier la largeur des plis, le tout recouvert d'un nylon isolant évitant tout court-circuit accidentel en cas d'amplitude importante.

Dans un tel transformateur, la vitesse de l'air projeté (ou aspiré) est accélérée d'environ cinq fois par rapport à celle de la membrane, ce qui concilie à la fois faible inertie et rendement élevé dans une bande de fréquence couvrant le registre médium-aigu.

La symétrie avant/arrière assure une directivité polaire de type doublet. Le rendement est amélioré par une disposition angulaire des pièces polaires constituant une amorce de pavillon.

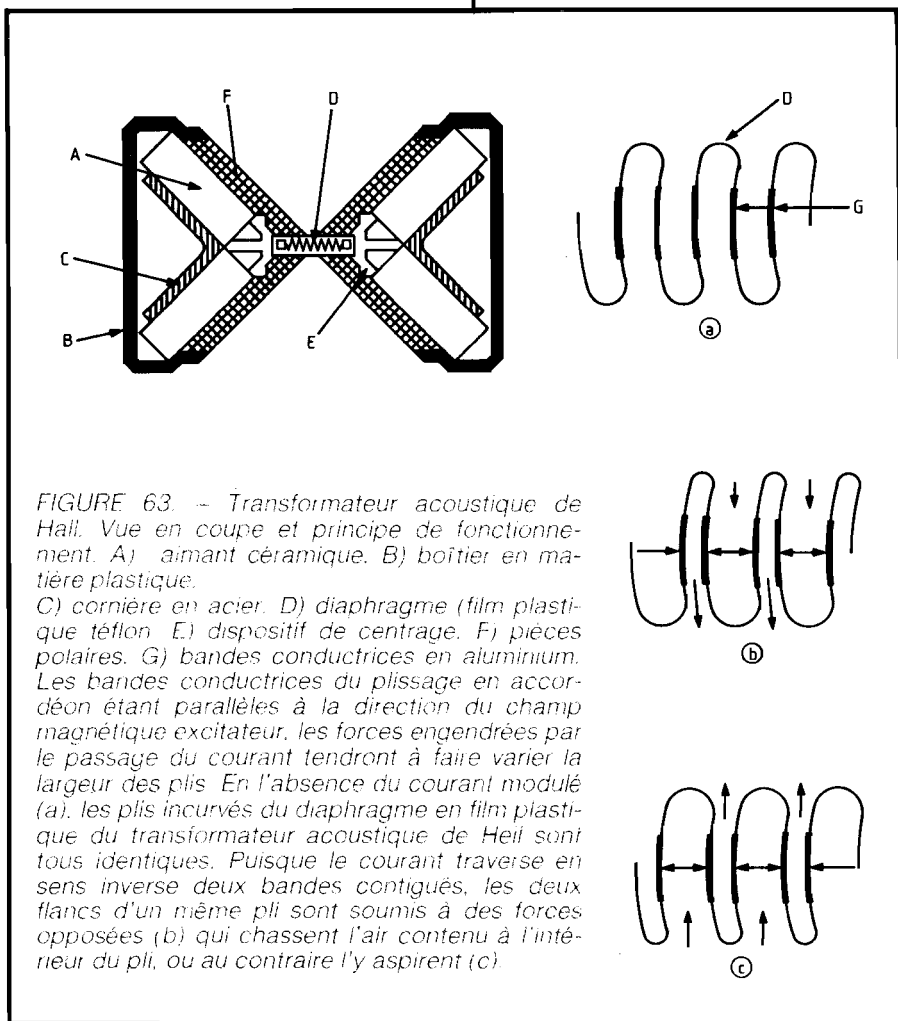


FIGURE 63. - Transformateur acoustique de Heil. Vue en coupe et principe de fonctionnement. A) aimant céramique. B) boîtier en matière plastique. C) cornière en acier. D) diaphragme (film plastique téflon). E) dispositif de centrage. F) pièces polaires. G) bandes conductrices en aluminium. Les bandes conductrices du plissage en accordéon étant parallèles à la direction du champ magnétique excitateur, les forces engendrées par le passage du courant tendront à faire varier la largeur des plis. En l'absence du courant modulé (a), les plis incurvés du diaphragme en film plastique du transformateur acoustique de Heil sont tous identiques. Puisque le courant traverse en sens inverse deux bandes contiguës, les deux flancs d'un même pli sont soumis à des forces opposées (b) qui chassent l'air contenu à l'intérieur du pli, ou au contraire l'y aspirent (c).

IV.3 Systèmes électrostatiques

La conception des haut-parleurs électrostatiques procède de l'idée d'exploiter les forces créées par des charges de signes opposés apparaissant sur les armatures d'un condensateur plan. Afin de linéariser les déplacements d'une des armatures par rapport à l'autre restant fixe, il faut :

- soit polariser par une tension continue élevée (1 000 à 2 000 V) ;
- soit recourir à un montage push-pull, désormais seul utilisé pour éliminer l'harmonique 2, en choisissant pour R une valeur très élevée de façon à faire travailler chaque condensateur à charge constante (on se reportera à la figure 1 du chapitre I pour différencier ces deux types).

En utilisant le principe des travaux virtuels, on établit, dans le premier cas :

$$W \text{ (énergie du condensateur isolé)} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \text{ avec } C = \frac{\epsilon_0 S}{a}$$

(Q = charge également distribuée sur les deux armatures, a = distance entre les électrodes, ϵ_0 = constante diélectrique).

$$F \text{ (force d'attraction)} = - \frac{dW}{da} = - \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 S}$$

soit, avec Q = CV :

$$F = - \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{a^2} V^2$$

Expression qui montre, comme dans le cas d'un écouteur électromagnétique, la présence d'une forte distorsion par harmonique 2 dans le cas d'un haut-parleur à simple effet, sauf si on polarise au moyen d'une composante continue V_0 telle que :

$$V = V_0 + v \text{ (v = tension modulante).}$$

Dans ce cas, l'expression de la force prend la forme :

$$F = -K (2 V_0 v + v^2)$$

expression qui tend vers :

$$F = -2 K V_0 v$$

pour les faibles modulations avec $V_0 \geq 10 \text{ V}$.

Dans le cas du montage push-pull (fig. 64), on symétrise le fonctionnement :

$$F = \frac{\epsilon_0 S}{2} \left[\frac{(V_0 + v)^2}{(a_0 - a)^2} - \frac{(V_0 - v)^2}{(a_0 + a)^2} \right]$$

a_0 = distance entre armature et membrane au repos.

Pour les faibles déplacements, en linéarisant l'expression ci-dessus, on aboutit à :

$$F = \frac{2 \epsilon_0 S V^2}{a_0^2} \left(\frac{a}{V_0} + \frac{a}{a_0} \right)$$

expression où le deuxième terme est l'analogue d'une force contre-électromotrice obtenue par déplacement de la membrane avec $v = 0$.

Pour une fréquence supérieure à la fréquence de coupure définie par la constante de temps RC, aucun courant ne circule dans la branche R ; on vérifie alors $i_1 = i_2$. La charge de chaque capacité est alors la même en valeur absolue (d'où le nom de push-pull à charge constante), cette charge

change simplement de côté au rythme de la modulation.

En pratique, la résistance R est obtenue en dotant la membrane d'une faible conductivité (10^7 à $10^9 \Omega$), par exemple en pulvérisant une solution de graphite pulvérulent traité mécaniquement après application (opération de gommage). Ceci permet en même temps d'amortir les résonances en bloquant les charges qui, si elles circulaient librement, viendraient s'accumuler en certains points et faciliteraient ainsi la concentration des forces électrostatiques. On assure ainsi l'équilibre statique par une légère tension de la membrane (environ 5 g/cm), de façon à éviter que les forces électrostatiques ne court-circuitent un des condensateurs en l'absence de modulation. C'est probablement là que réside la principale difficulté de réalisation pour maintenir dans le temps les caractéristiques mécaniques nominales.

Il existe peu de variantes à la réalisation classique préconisée dès 1930 par Voigt et Lorenz : une membrane métallisée tendue devant une grille perforée jouant le rôle d'électrode fixe, doublée pour fonctionnement en push-pull (fig. 65). A noter cependant l'intérêt de remplacer les grilles perforées par des rangées de fils parallèles beaucoup plus « transparentes » (solution Janzen).

Pour pallier l'inconvénient de l'alimentation externe, certains laboratoires ont tenté d'utiliser des électrets (2) dont l'usage est courant dans les microphones [19].

Dans la réalisation de type symétrique du laboratoire Matsushita, la membrane est constituée d'un film polyester de 4μ d'épaisseur, métallisée au palladium, insérée entre deux électrets perforés (voir fig. 66). Cette disposition présente l'avantage de séparer complètement les électrets, qui constituent des électrodes fixes, de la partie mobile. On peut ainsi augmenter librement l'espace diaphragme-électret en fonction de l'amplitude vibratoire souhaitée.

Le principal avantage attaché à cette technologie est :

- la légèreté de la membrane, souvent en Mylar (3) (3 mg/cm^2) sous épaisseur typique de 20μ).

Les inconvénients étant :

- une certaine fragilité (perte d'isolement et variation de la tension de la membrane) ;
- nécessité de disposer d'une source de polarisation continue ;
- impédance fortement réactive (risque d'amorçage d'amplificateurs mal conçus pour une charge capacitive de l'ordre de $2\,000 \text{ pF}$ pour un modèle à simple effet, jusqu'à $2 \mu\text{F}$ pour un modèle à double effet) ;

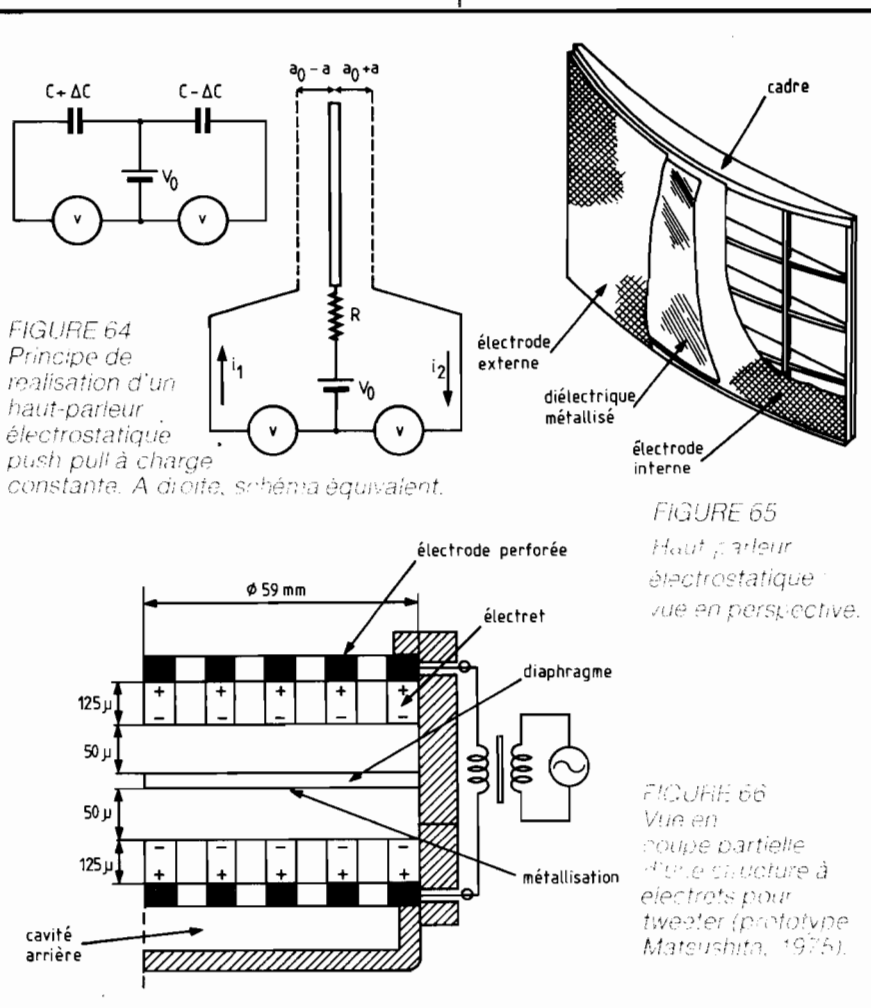


FIGURE 64
Principe de réalisation d'un haut-parleur électrostatique push-pull à charge constante. A droite, schéma équivalent.

FIGURE 65
Haut-parleur électrostatique : vue en perspective.

FIGURE 66
Vue en coupe partielle d'une structure à électrets pour tweeter (prototype Matsushita, 1975).

- faible rendement ;
- directivité élevée avec lobes secondaires accentués ;
- risque d'ionisation spontanée.

La nature de ces inconvénients explique que cette technologie soit toujours réservée aux haut-parleurs d'aigu, hormis quelques réalisations à large bande obtenues par spécialisation de panneaux électrostatiques, tel le premier modèle de P.J. Walker (4) (datant de 1955) qui est composé d'un panneau central réservé aux aigus, encadré de deux panneaux spécialisés dans le grave.

(à suivre) **P. LOYEZ**

(2) Ainsi dénommés par analogie avec le terme anglais « magnet » parce que possédant une polarisation électrique permanente. Ils sont constitués aujourd'hui à base des films polymères très isolants (Mylar, Teflon, polypropylène), métallisés sur une ou deux faces. La polarisation d'origine interne est obtenue en fabrication par refroidissement sous champ électrique du matériau préalablement chauffé. Une polarisation externe est obtenue par décharge dans un gaz (effet Corona).

(3) Le nylon présente naturellement une résistivité superficielle comprise entre $2 \cdot 10^9$ et

$10^{12} \Omega$ pour une humidité atmosphérique comprise entre 40 et 95 % (ambiance habituelle des pays occidentaux). C'est pourquoi la firme Quad utilise aujourd'hui un diaphragme en Mylar enduit d'un composé à base de nylon.

(4) Brevet conjoint de Acoustical, Ferranti, P. Walker et T. Williamson, déposé le 18 octobre 1951.

Bibliographie

- [16] Mc LACHLAN : « Elements of Loudspeaker Practice ». Dover Editeur.
- [17] R. LAFAURIE : « Le haut-parleur à ruban ». Revue du son n°s 45 et 46 (janvier et février 1957).
- [18] ALES BOLESILAV : « Wide range ribbon electrodynamic loudspeakers ». Tesla Electronics, 4/70.
- [19] NARAJI SAKAMOTO, TOSHIIYUKI GOTOH, NOBUHISA ATOJI et TAKAHISA AOI : « Communication à la 52^e convention de l'AES, New York, oct./nov. 1975.