

HAUT-PARLEURS

ET ENCEINTES ACOUSTIQUES

(Suite voir N° 1708)

Membrane et suspension

Pratiquement, en dehors de l'intérêt qu'offre la connaissance des paramètres de modélisation pour prévoir grossièrement la réponse acoustique et le rendement énergétique, il faut retenir que c'est la technologie de l'élément rayonnant qui conditionne la qualité d'écoute. A ce titre, les caractéristiques de la membrane doivent répondre à des critères tels que :

- légèreté pour diminuer l'inertie (indispensable pour une bonne restitution des régimes transitoires) et améliorer le rendement ;
- rigidité pour rejeter en haute fréquence les modes de vibration parasites ;
- forme optimisée pour pallier un manque de rigidité (profil conique ou exponentiel, dôme hémisphérique), mais aussi pour mieux contrôler la directivité aux fréquences élevées.

Les premiers haut-parleurs ont été classiquement munis de diaphragmes coniques dont l'angle d'ouverture était choisi par compromis entre :

- grande rigidité pour obtenir un fonctionnement en piston (avantage du cône fermé aux basses fréquences) ;
- directivité peu accusée (avantage au cône très ouvert).

A l'époque où les ensembles reproducteurs étaient utilisés en solo pour l'ensemble du spectre, un bon compromis a consisté à recourir :

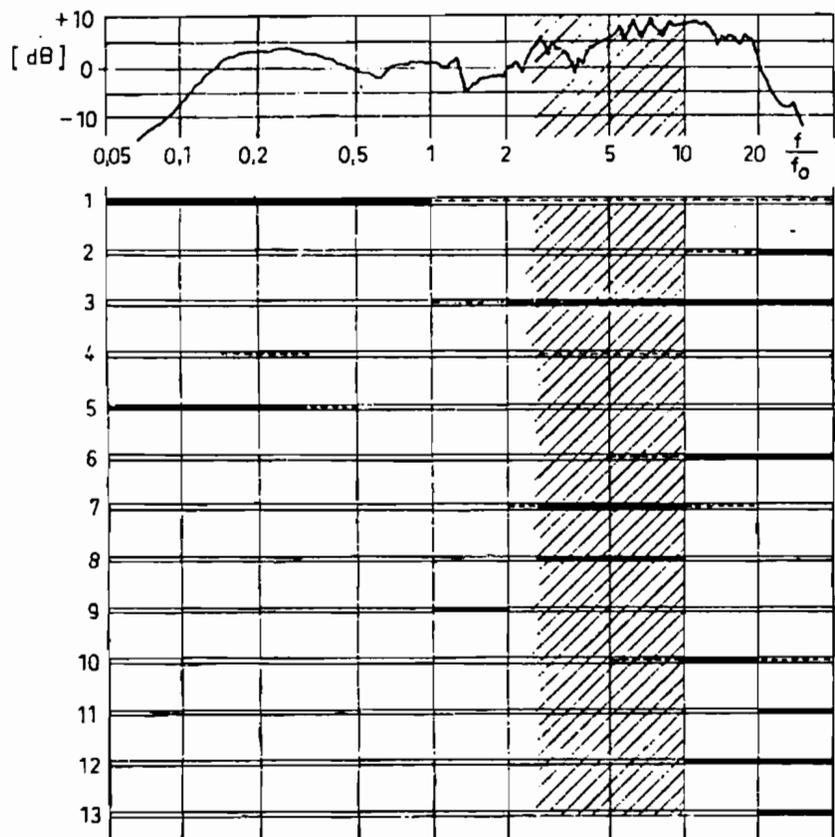


Fig. 28. - Influence des paramètres de fabrication d'un haut-parleur électrodynamique (d'après « Tesla Electronics ») :

$$f/f_0 = f/(c/\pi d)$$

$c = 340 \text{ m/s}$; d , diamètre, en m.

- | | |
|---|--|
| 1) Dimension et forme de l'écran. | 8) Résonances sur modes partiels de la membrane. |
| 2) Profondeur du cône. | 9) Réflexions sur la suspension périphérique. |
| 3) Densité du matériau constituant la membrane. | 10) Forme de la membrane. |
| 4) Amortissement pneumatique. | 11) Masse de la bobine mobile. |
| 5) Amortissement magnétique. | 12) Rigidité de la partie centrale du cône. |
| 6) Inductance de la bobine mobile. | 13) Rigidité de la liaison bobine-membrane. |
| 7) Frictions internes de la membrane. | |

– soit à un diaphragme elliptique dont la directivité est peu accusée dans le plan contenant le petit axe de l'ellipse ;

– soit à un profil courbe (exponentiel par exemple) conciliant rigidité et faible directivité.

C'est dans les années 1960 qu'on commença à appliquer à la grande série cette technique de pressage de membrane exponentielle avec la gamme des haut-parleurs SEM qui avait préalablement bénéficié d'une étude de la composition chimique des pâtes à papier conciliant légèreté et rigidité. C'est avec ce type de haut-parleur à large bande que les pionniers de la haute fidélité découvrirent les vertus de la modulation de fréquence. Même pour un haut-parleur classique, il est pratiquement impossible de dresser la liste des paramètres qui contrôlent réellement les performances d'un diaphragme.

Une tentative due à Antonin Milcak [10] est concrétisée par la figure 28 qui montre, dans une échelle de fréquence normée, les zones d'influence de 13 paramètres de réalisation relatifs à un haut-parleur classique à cône de 20 cm de diamètre.

On note qu'un tel modèle, monté sur écran normalisé (cf. Publication 268/5 - CEI 1972), couvre environ huit octaves, avec une réponse assez régulière sur trois octaves. Pour $f/f_0 = 1,5$ – valeur correspondant à 700 Hz environ – apparaît un premier accident dit « périphérique » (pic suivi d'un creux), parce que dû à la mise en résonance du système de suspension. A partir de $f/f_0 = 3$ apparaissent des irrégularités dues à des résonances partielles du diaphragme qui a cessé de vibrer en piston rigide. Ce type de défaut est parfaitement illustré par le tracé de profils calculés d'une membrane soumise à une force sinusoïdale appliquée en son centre (fig. 29) et qui font apparaître des cercles nodaux passant par les points d'intersection N, N' et N''.

En revenant à la figure 28, au-delà de $f/f_0 = 10$, on identifie mal les causes de non-linéarité où interviennent l'amortissement des ondes de flexion, l'émission secondaire par les éléments de suspension, les effets de focalisation au voisinage de la bobine mobile, etc., tous éléments qui ne sont contrôlables que par l'expérience, aidée il est vrai depuis quel-

ques années par les techniques holographiques. Ces techniques interférométriques exploitant un laser ont en effet confirmé ce que les hommes de métier connaissent depuis fort longtemps, à savoir que toute membrane mince se fractionne. Ce phénomène d'apparition de modes de flexion et torsion combinés est schématiquement illustré par les dessins de la figure 30, où les fréquences correspondant à des modes à symétrie axiale (940 Hz - 1 100 Hz - 2 800 Hz - 3 800 Hz) peuvent être évaluées au moyen des formules

$$f_1 = \frac{0,55}{2 \pi R} v;$$

$$f_2 = 1,23 f_1; f_3 = 1,23 f_2 \quad [11]$$

(R = rayon de la membrane en m ; v = vitesse de propagation dans le matériau).

Tout récemment, la technique holographique, qui sera décrite en détail au chapitre des mesures, a révélé que ces modes dépendaient de l'amplitude vibratoire, donc du niveau acoustique, confirmant, ce dont personne jusque-là n'était vraiment très sûr, qu'un haut-parleur était loin d'être assimilable à un transformateur linéaire.

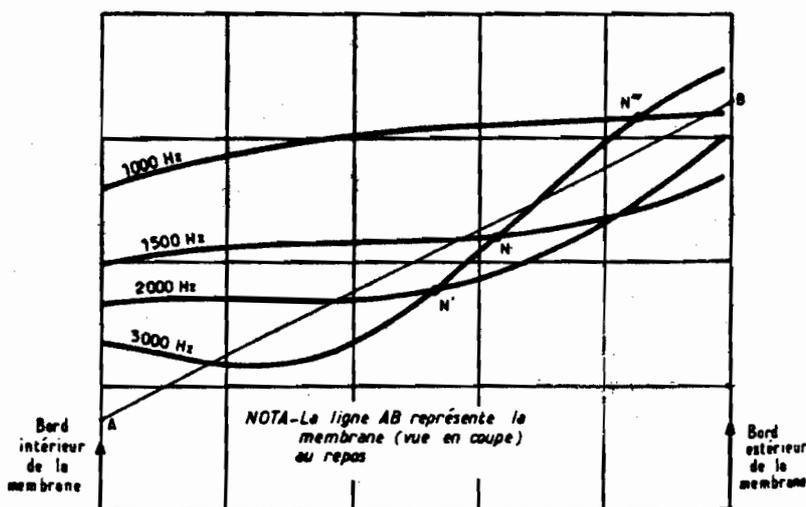


Fig. 29. – Profils calculés d'une membrane de 36 cm pour différentes fréquences où l'on fait intervenir la vitesse de propagation dans le matériau et le coefficient d'élasticité (courbes aimablement communiquées par la société Cabasse).

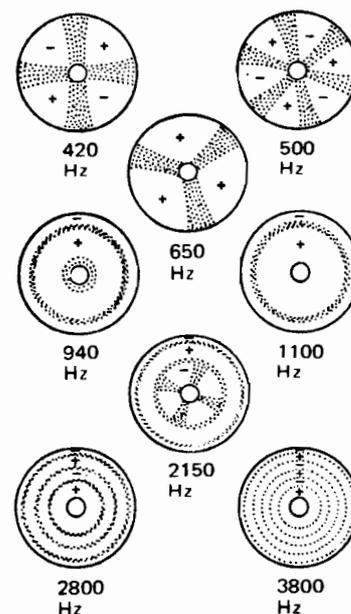


Fig. 30. – Illustration du phénomène de « fractionnement » d'une membrane conique (diamètre : 21 cm). Les signes (+) et (-) indiquent les signes des amplitudes et donc les oppositions de phase.

Voilà qui explique ce timbre si changeant avec le niveau de certains haut-parleurs et sans doute l'inaptitude apparente de certaines grandes membranes à plaire aux bas niveaux d'écoute ! C'est dire avec quelle prudence il convient d'évoquer aujourd'hui les théories classiques de la mécanique vibratoire des plaques, lesquelles tentent de corroborer les figures de Chladni [12] ; la principale difficulté tenant au caractère dispersif de la plupart des matériaux utilisés (à commencer par le papier qui peut être le siège d'ondes de surface dont la vitesse de propagation peut aller de 200 m/s à 2 000 m/s dans la gamme audible).

Ceci ne doit cependant pas freiner les tentatives pour mieux simuler le comportement réel d'une membrane qui n'est strictement assimilable à aucun des modèles étudiés par Rayleigh, Crandall et Lamb [2] (plaque encastree ou libre), en raison même des non-linéarités introduites par les suspensions.

Assez récemment, la méthode d'analyse dite « des éléments finis », utilisée pour le calcul des structures telles qu'on en rencontre dans l'industrie navale, en aéronautique ou en aérospatiale (plaques minces et coques) a été appliquée au domaine des diaphragmes de haut-parleurs. Cette méthode de calcul numérique, qui consiste à déterminer les déplacements

en un nombre limité de points d'une structure, connaissant les forces appliquées, ramène le système d'équation aux dérivées partielles à un système matriciel dont la manipulation numérique n'est accessible qu'aux gros ordinateurs.

C'est ainsi que certains programmes mis au point par la NASA ont pu être adaptés au calcul des diaphragmes

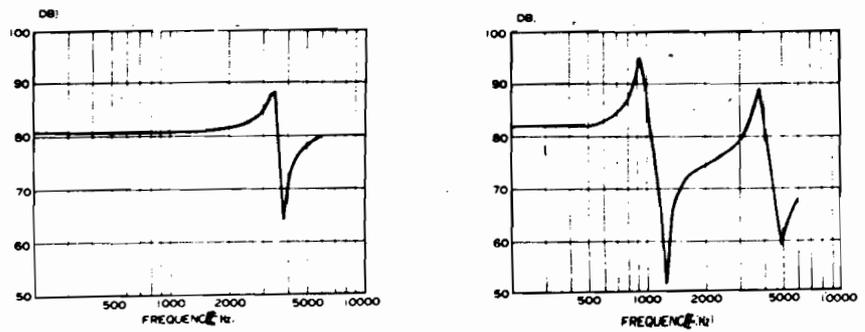


Fig. 32. - Réponses amplitude/fréquence comparées d'un diaphragme circulaire plan (diamètre : 32 cm) : a) Attaque sur ligne nodale (1^{er} mode). - b) Attaque au voisinage du centre. (Document Technics.)

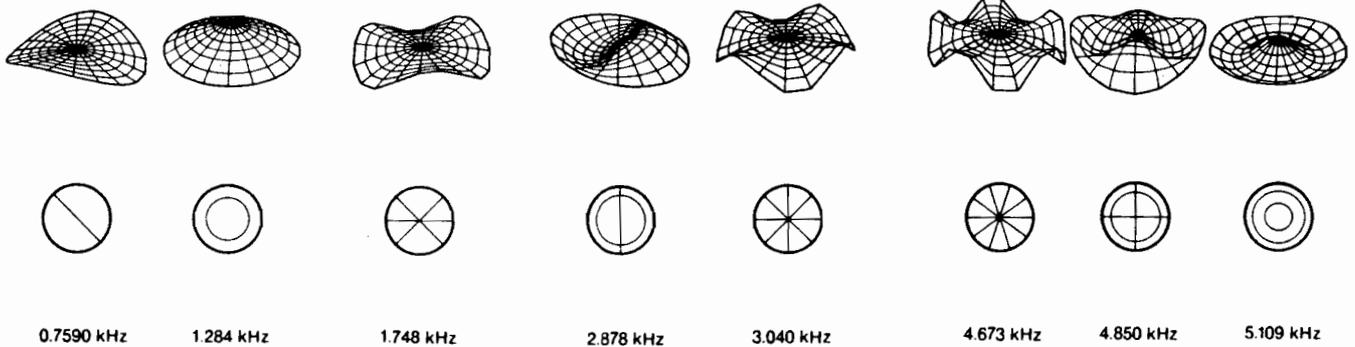


Fig. 31 a

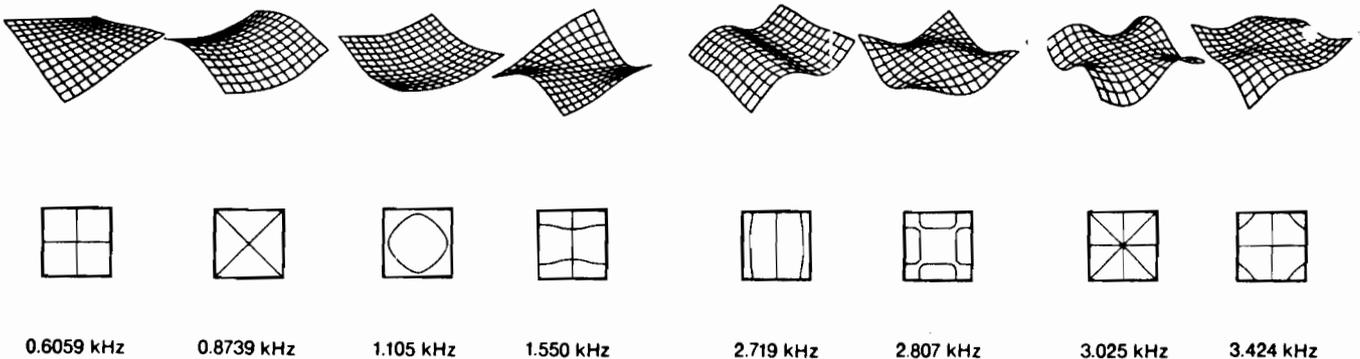


Fig. 31 b

Fig. 31. - Représentation par la méthode des éléments finis des premiers modes de vibration d'un diaphragme circulaire libre (diamètre : 30 cm) et d'un diaphragme plan carré libre (diagonale : 25 cm). (Document Technics.)

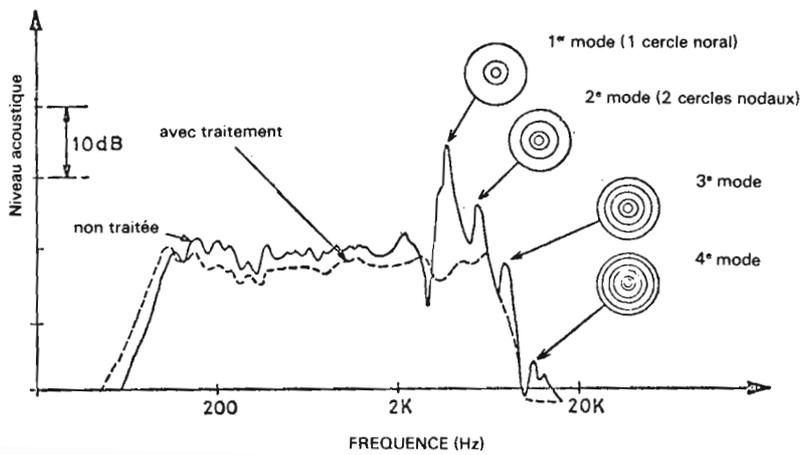


Fig. 33. — Influence du traitement d'une membrane en présence de modes de flexion à symétrie axiale identifiés par des hologrammes (Rank-Wharfedale).

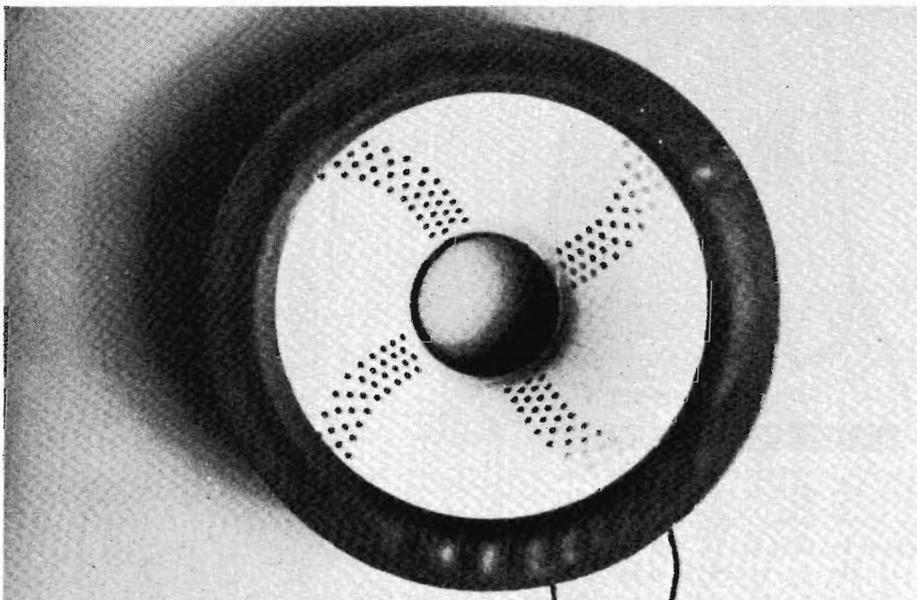


Fig. 34. — Membrane de haut-parleur médial traitée contre les modes de flexion (Rank-Wharfedale).

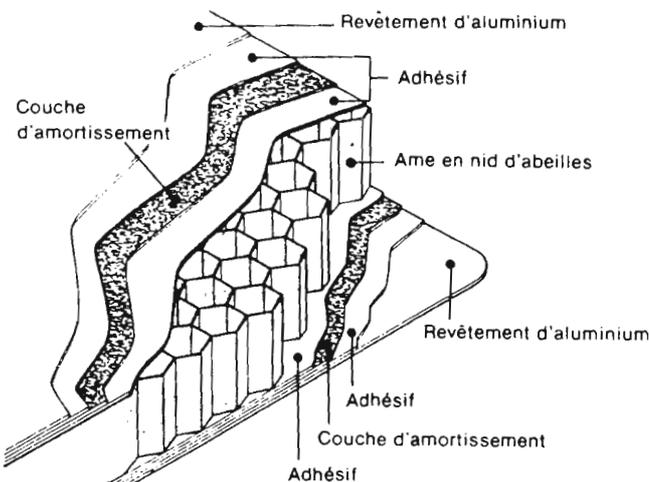


Fig. 35. — Structure de membrane plane à matériau composite (Sony 1980).

mes (programmes dérivés du NAS-TRAN), soit pour optimiser la structure des diaphragmes plans, soit pour choisir les points d'attaque à partir de l'élément moteur (lequel peut être distribué).

Les exemples qui suivent illustrent la portée considérable de ces nouvelles méthodes qui rendent complètement anachronique les méthodes d'examen visuels par poudre de lycopode ou sable fin.

Dans la figure 31, on voit les résultats théoriques obtenus avec des plaques minces circulaires ou rectangulaires, qu'on peut rapprocher des examens holographiques déjà mentionnés. La figure 32 montre l'effet calculé sur la réponse en fréquence du choix des points d'attaque d'un disque circulaire : on note qu'en adoptant un diamètre de bobine mobile coïncidant avec le premier diamètre nodal, on repousse l'accident d'amplitude de deux octaves environ.

Dans cette analyse, on constate que si le diamètre de la bobine mobile est fixe, l'augmentation du diamètre de la calotte antipoussière entraîne une diminution de la fréquence de résonance haute. Si le diamètre de la calotte est fixe, l'augmentation du diamètre de la bobine entraîne également la diminution de la fréquence haute de résonance ; de plus, le niveau d'amplitude correspondant baisse largement. On constate enfin que, à part cette variation de fréquence, aucune autre variation n'est engendrée, ce qui est en accord avec les résultats expérimentaux.

Le choix des formes et des matériaux est finalement guidé par la recherche d'une rigidité maximale qui s'oppose à l'apparition de déformations de flexion, par des traitements de surface qui en atténuent les effets (voir fig. 33). A cet égard, la solution Leak-Wharfedale consistant à percer les membranes aux endroits de contraintes maximales, puis à reboucher les trous par un vernis incolore visqueux, mérite d'être signalée (fig. 34).

Pour les formes, ceci est obtenu par des profils coniques peu ouverts, éventuellement renforcés par des rainures radiales — par des profils curvilignes le plus souvent exponentiels, voire par des contours asymétriques

ou des bossages inspirés du modèle RCA LCLA (1953). Des nervures concentriques (corrugations) permettent dans les grands haut-parleurs de diminuer la vitesse de propagation entre le point d'attaque et le point d'attache périphérique.

Pour les matériaux, D.A. Barlow [13] a indiqué qu'il convenait de rendre le terme E/ρ^3 maximum ($E =$ module de Young du matériau et ρ sa masse spécifique); ce qui revient du reste à rechercher une vitesse de propagation longitudinale élevée, tout en neutralisant les effets de surtension. Ceci justifie l'adoption de matériaux composites où l'on cherche à associer un matériau à grande rigidité à un autre matériau à faible surtension (cf. tableau IV).

Pour certains modèles destinés à la Haute Fidélité ou à la reproduction sonore de très grande puissance, on a recours :

- soit à un métal pur (Altec, Emi, Hitachi, Jordan Watts) ;
- soit à un métal poreux + contre-couche d'aluminium (Fisher) ;
- soit à des structures composites en nid d'abeilles (Technics, Sony) qui permettent la réalisation de membranes plates de grandes dimensions (fig. 35) avec une rigidité à la flexion de 500 à 1 000 fois plus grande que les complexes papier-cellulose.

Dans la majorité des cas, il est encore fait appel à une pulpe de cellulose dont la composition varie avec chaque fabrication, généralement traitée en surface par un vernis plastique (époxyde+flexibilisateur ou silicone, plastifiant dilué comme dibutylphthalate), sinon par flockage ou par enduction de tissu.

Pour choisir à bon escient un vernis pour traitement d'une membrane de haut-parleur, il faut connaître la nature exacte du défaut qu'on souhaite éliminer. Les fabricants de haut-parleurs se livrent à de multiples essais dont ils prennent bien garde de livrer les secrets. En tout état de cause, il faut choisir un produit dont l'impédance mécanique ne s'écarte pas trop de celle du matériau à recouvrir.

Si on cherche essentiellement à augmenter la rigidité de la membrane

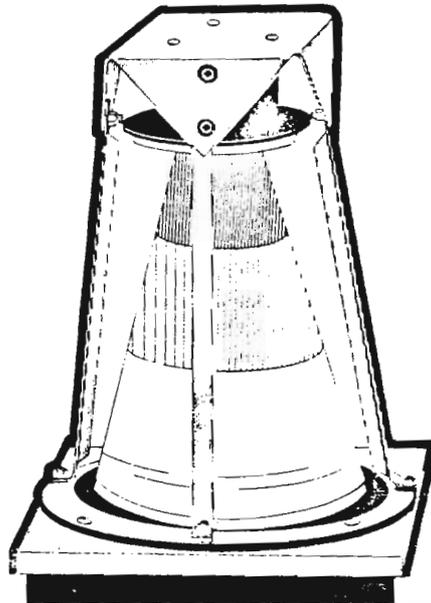


Fig. 36. - Vue schématique d'un tronç de cône traité comme une ligne de transmission constituée de plusieurs zones contiguës en titane, en aluminium et en matière plastique (Ohm Acoustics Corp).

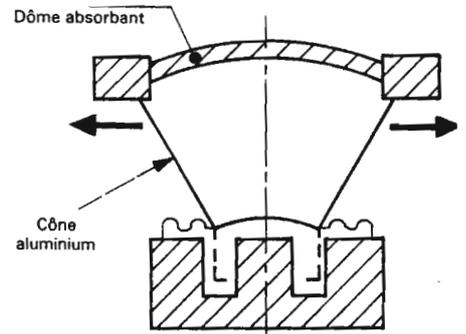


Fig. 37. - Haut-parleur à rayonnement horizontal spécialisé dans l'aigu.

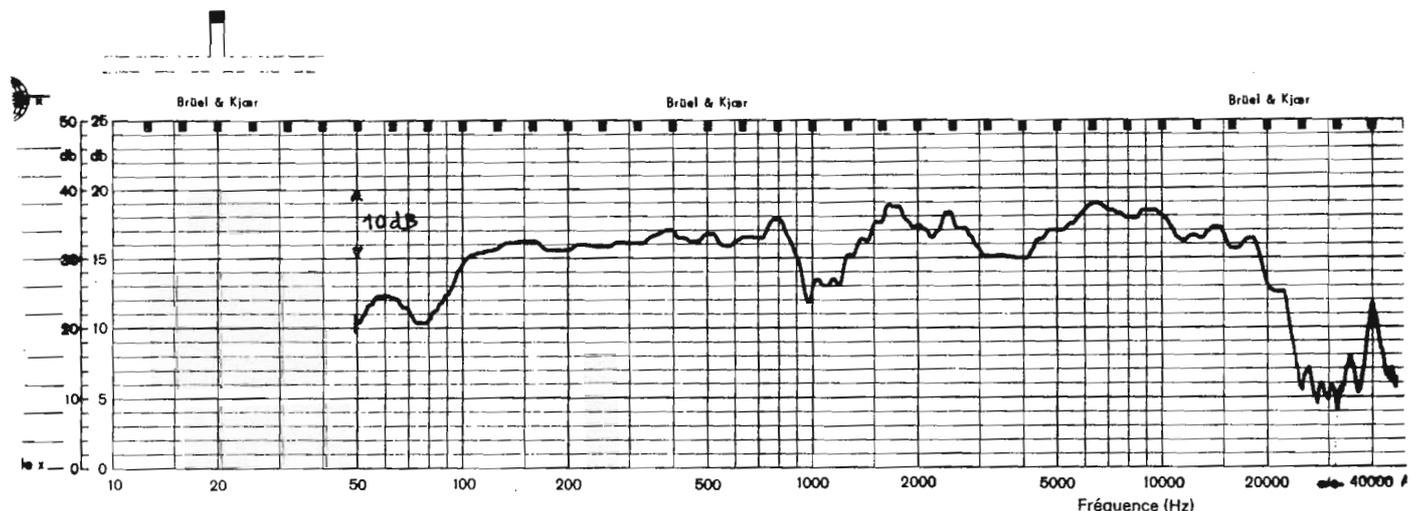


Fig. 38. - Exemple de réponse affectée d'un accident périphérique montrant une interférence, entre 900 Hz et 1 500 Hz, des ondes émises par la membrane et par la suspension périphérique d'un haut-parleur de 17 cm.

pour en éviter le fractionnement, on doit appliquer un film plastique qui reste souple au cours du vieillissement (sans craquelures ni déformations de la surface enduite).

Le meilleur procédé d'application paraît être la pulvérisation (bombe aérosol) de façon à doser régulièrement l'épaisseur du film. Le « nec plus

ultra » reste évidemment de suivre les progrès apportés par un tel traitement par mesures en chambre anéchoïde (réponse amplitude/fréquence pour l'essentiel).

Le recours à des matériaux plastiques à base de polyéthylène et de butyl (bextrène) est de plus en plus fréquent : il simplifie la fabrication par

thermoformage et améliore l'homogénéité des caractéristiques de fabrication. Ce type de matériau résiste bien aux températures élevées et à l'humidité.

Tout récemment, quelques fabricants ont commencé à s'intéresser à la fibre de carbone réputée en aéronautique pour ses qualités mécani-

	Module de Young E (N/m ²)	Densité ρ (kg/m ³)	Vitesse v (mode compression/ extension) (m/s) (1)	Facteur de perte tg δ = 1/Q	Facteur de surtension Q	Réf.
Composite	7,0 × 10 ¹⁰	1,8 × 10 ³	6,2 × 10 ³	0,05	20	A.E.S.
Aluminium	7,0 × 10 ¹⁰	2,7 × 10 ³	5,1 × 10 ³	0,002	500	
Titane	11,0 × 10 ¹⁰	4,5 × 10 ³	4,9 × 10 ³	0,002	500	
Cône papier	0,2 × 10 ¹⁰	0,5 × 10 ³	2,0 × 10 ³	0,05	20	
Fibres de cellulose	0,064 × 10 ¹⁰	0,7 × 10 ³	0,954 × 10 ³	0,14	7,08	LABORATOIRE ENI (Besançon)
Polyester	0,451 × 10 ¹⁰	1,83 × 10 ³	1,57 × 10 ³	0,05	19,9	
Nylon	0,205 × 10 ¹⁰	1,09 × 10 ³	1,37 × 10 ³	0,11	8,9	
PVC	0,345 × 10 ¹⁰	1,4 × 10 ³	1,57 × 10 ³	0,056	17,8	
Aluminium	7,0 × 10 ¹⁰	2,7 × 10 ³	5,129 × 10 ³	0,033	30	AUDAX & HARWOOD
Polyéthylène BD	0,0675 × 10 ¹⁰	0,91 × 10 ³	0,860 × 10 ³	0,08	12	
Polyéthylène MD	0,105 × 10 ¹⁰	0,94 × 10 ³	1,056 × 10 ³	0,10	10,5	
Polyéthylène HD	0,198 × 10 ¹⁰	0,95 × 10 ³	1,444 × 10 ³	0,06	17	
P.P. ⁽⁴⁾	0,155 × 10 ¹⁰	0,89 × 10 ³	1,319 × 10 ³	0,09	11,0	
Polystyrène	0,19 × 10 ¹⁰	0,99 × 10 ³	1,385 × 10 ³	0,03	31	
Polystyrène (2) plastiflex	0,19 × 10 ¹⁰	1,30 × 10 ³	1,21 × 10 ³	0,11	9,0	
PV F2 ⁽³⁾	0,35 × 10 ¹⁰	1,85 × 10 ³	2,2 × 10 ³	0,33	3	
Bextrène noir	0,23 × 10 ¹⁰	1,04 × 10 ³	1,51 × 10 ³	0,014	71	KEF
Bextrène blanc	"	1,063 × 10 ³				

(1) $v = \sqrt{E/\rho}$

(2) Bextrène

(3) polyfluore de vinylidène (film piézoélectrique - fabr. TH-CSF)

(4) polypropylène

Tableau IV. - Caractéristiques de matériaux pour membranes.

ques alliées à une faible densité ($\rho = 1,9$), mais des difficultés apparaissent en fabrication pour l'orientation convenable des fibres associées à la pulpe de cellulose classique.

Notons enfin, comme variante perfectionnée du haut-parleur conique classique, un diaphragme fonctionnant non plus en piston, mais comme une ligne de transmission adaptée dans laquelle la vitesse de propagation est ralentie de façon que l'onde sonore engendrée se déplace radialement dans l'air à la même vitesse que l'onde élastique dans le cône (brevet Walsh de 1969). On obtient ainsi une cohérence entre les deux ondes avec, comme résultat bénéfique, une réduction de masse effective, réduite à la masse seule de la bobine mobile excitatrice (fig. 36). Le même principe peut s'appliquer à un haut-parleur d'aigu à membrane en aluminium plastifié à caractéristique de rayonnement omnidirectionnel (fig. 37).

En matière de suspension périphérique, après avoir abandonné le feutre, le tissu ou le cuir, initialement réservés aux modèles soignés, au profit du

papier (faisant partie intégrante de la membrane), les fabricants sont revenus à des matières souples, tout au moins pour les éléments graves (butyl, tissu imprégné, chlorure de polyvinyle plastifié, mousse de polyuréthane). Une grande attention est désormais portée à la forme et en particulier à la concavité de l'anneau, qui ne doit pas créer d'émissions secondaires parasites, tout en minimisant les réflexions sur le bord du saladier.

Pour un haut-parleur de 17 cm de diamètre dont la surface utile de membrane fait environ 160 cm², il est courant que l'anneau de suspension périphérique représente près de 40 % de cette surface. Un tel rapport est éminemment défavorable, mais est nécessaire pour assurer une bonne linéarité de conversion électromécanique aux basses fréquences. Il en résulte toujours un risque d'interférence dans la plage de fréquences où se produit une résonance accompagnée d'un déphasage de 180° par rapport à l'émission de la membrane. Lorsque cet accident périphérique s'étale sur

plus d'un tiers d'octave, comme le montre la figure 38, il peut en résulter un déséquilibre tonal particulièrement gênant pour la restitution de la parole. Ce risque est moins grand avec les haut-parleurs de grand diamètre, compte tenu de la faible surface relative de l'anneau périphérique.

Pour les haut-parleurs de grandes séries, on en reste au pourtour gaufré prolongeant le diaphragme, traité par un produit visqueux pour amortir les réflexions.

Une solution originale, due au Japonais Kawamura, consiste à adopter une structure métallique plissée qui améliore la linéarité et réduit les pertes par frottement.

La suspension interne, dite spider, utilisée pour le centrage de la bobine mobile, connaît aujourd'hui peu de variantes au modèle classique en nylon gaufré visible sur la figure 39.

(A suivre)
P. LOYEZ



Fig. 39. — Haut-parleur de 13 cm à membrane. Bextrène, suspension externe en butyl et à large spider en nylon assurant à la fois grand débattement et référence inférieure à 35 Hz (réalisation Audax).