

HAUT-PARLEURS

ET ENCEINTES ACOUSTIQUES

LA BOBINE MOBILE

Sa conception est tributaire de nombreuses contraintes, dont la plus importante est la valeur de résistance qui représente la valeur minimale du module de l'impédance complexe du haut-parleur, laquelle a l'allure typique déjà mentionnée (fig. 8). Cette résistance est choisie en fonction des valeurs de la grille normalisée (1) (cf. Publication 268-15 de la CEI), soit très généralement aujourd'hui 4 Ω ou 8 Ω. L'écart par rapport à l'impédance nominale dépend de la technique de réalisation.

En effet, l'accroissement de l'impédance avec la fréquence, qui est un facteur de diminution de l'efficacité, tout au moins dans le cas d'une atta-

que en tension, dépend de plusieurs facteurs :

- le choix du matériau constituant l'enroulement. L'adoption de l'aluminium au lieu du cuivre a l'effet indiqué par la figure 19, mais rend plus délicate l'opération de soudage des connexions externes. La section utile est augmentée en remplaçant l'émail classique par des vernis minces (moins de 30 microns d'épaisseur) autorisés par les faibles tensions appliquées,
- le mode de bobinage : nombre de couches - taux de foisonnement (qui peut être réduit en utilisant du fil à section carrée ou rectangulaire),
- la présence ou non d'une bague

d'aluminium fendue pour améliorer la dissipation thermique ou l'existence d'une bague fermée en cuivre à proximité immédiate de la bobine mobile (OLSON), soit encore l'utilisation conjointe de ces deux types de bague avec interposition entre les deux d'un manchon élastique (procédé BAKERS qui améliore la réponse aux fréquences élevées),

- la saturation plus ou moins prononcée des pièces polaires (celle-ci limite l'augmentation d'impédance).

Parmi les autres contraintes, citons :

(1) 4 Ω, 8 Ω, 16 Ω, 25 Ω, 50 Ω pour les haut-parleurs élémentaires.

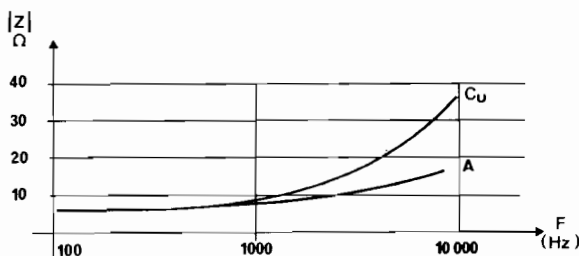


Fig. 19. - Variation d'impédance d'une bobine d'aluminium et d'une bobine de cuivre pour un haut-parleur de 21 cm ($Z_{nom} = 8 \Omega$)

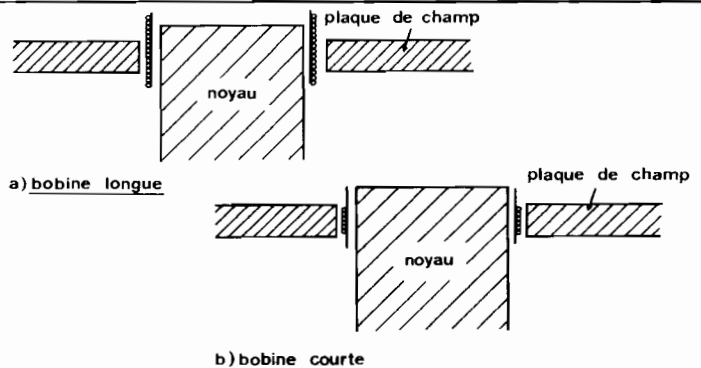


Fig. 20. - Options pour le choix de la longueur d'une bobine mobile

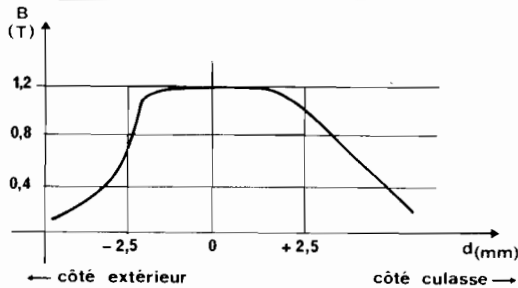


Fig. 21. - Variation de l'induction dans l'entrefer en fonction de la position de la bobine exploratrice (haut-parleur à dôme de 5 cm).

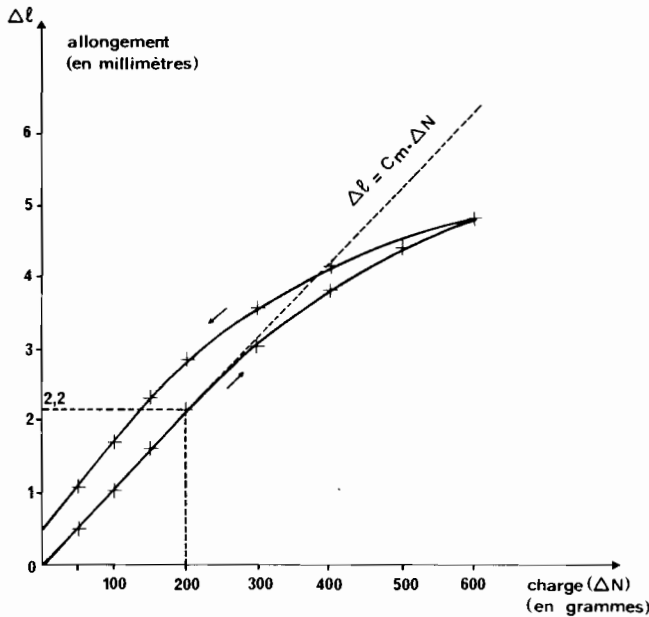


Fig. 22. - Courbe de variation du déplacement de la membrane en fonction de la charge appliquée.

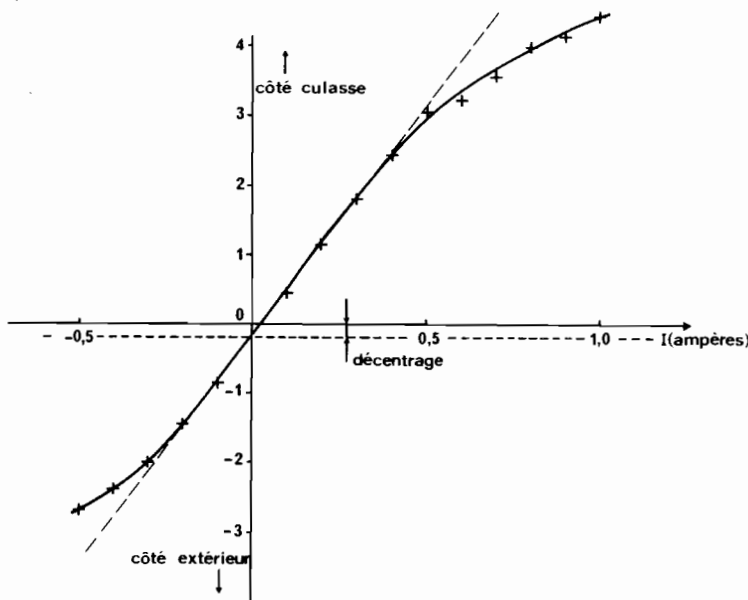


Fig. 23. - Courbe de premier déplacement d'un équipage mobile de haut-parleur grave de 13 cm (déplacement, en ordonnées, en millimètres).

- la linéarité

Il est fondamental que les spires coupent un flux constant de façon à minimiser la distorsion par harmoniques. Cette condition conduit à deux options (fig. 20).

- **Bobine longue** dont les spires dépassent de l'entrefer. Cette solution prévaut dans les haut-parleurs de grave et plus généralement dans les modèles à grande excursion (on peut citer le cas d'un modèle de 21 cm dont la bobine fait 19 mm de longueur pour une hauteur d'entrefer de 6 mm).

- **Bobine courte** dont la longueur n'excède pas 70 % de la hauteur de l'entrefer. C'est la solution réservée aux haut-parleurs de medium et d'aigu.

Pour les modèles à faible excursion (modèles d'aigu ou à chambre de compression), il est encore possible de faire affleurer les extrémités de la bobine avec les arêtes de la plaque de champ. L'essentiel sur ce point est que la variation d'induction dans l'entrefer soit faible pour toute l'excursion de la bobine, laquelle va de ± 1 mm pour un haut-parleur d'aigu, à ± 10 mm pour un haut-parleur de grave. Il doit être tenu compte de l'imprécision du centrage à la fabrication et du décentrage en vieillissement : influence de la pesanteur, gauchissement sous les effets de la température.

Une courbe typique de la variation d'induction en fonction de la position de la bobine dans l'entrefer d'un haut-parleur medium à dôme de 50 mm est visible dans la figure 21. La figure 22 illustre le phénomène d'hystérésis caractéristique de tout système de suspension, lequel contribue avec l'énergie de déformation stockée dans la membrane, au terme d'amortissement R_m du modèle analogique déjà cité (fig. 3). Cette courbe a été établie par la méthode qui sert à la détermination de l'élasticité (ou de son inverse, la raideur) de la suspension et qui sera exposée au chapitre des mesures. Dans le cas présent, on calcule la constante d'élasticité dans la zone linéaire, exprimant l en mètres, N en newtons, on obtient alors $C_m = 11 \cdot 10^{-4} \text{m/N}$.

La non-linéarité du déplacement en fonction du courant parcourant la bo-

bobine mobile est parfaitement illustrée par la courbe de la figure 23, qui fait apparaître un décentrement quasi inévitable en production de série. Ce défaut est à l'origine de distorsion par harmoniques de rang 2, tandis que la dissymétrie par rapport à la position de repos crée de l'harmonique 3. C'est la raison pour laquelle certains constructeurs proposent un système à deux moteurs agissant en push-pull. D'autres fabricants, enfin, jouent sur le profil du noyau (géométrie tronçonnée) de façon à compenser cette dissymétrie par une meilleure concentration du flux dans l'entrefer.

Le rendement

En adoptant comme terme d'efficacité intrinsèque du haut-parleur [7] la quantité

$$E = \frac{SB\ell}{R_e (M_d + M_b)} \quad (11)$$

S = surface active de la membrane (en m²)

B = induction dans l'entrefer (en T)

ℓ = longueur du fil de la bobine (en m)

R_e = résistance de la bobine (en Ω)

M_b = masse de la bobine (en kg)

M_d = masse du diaphragme (en kg)

On établit que le niveau acoustique à 1m répond à la formulation :

$$N_{dB} = 20 \text{ Log}_{10} (4775 E \cdot U_{eff}) - \psi(\omega) \quad (12)$$

Ψ(ω) représentant un terme négligeable au-dessus de 2 fois la fréquence de résonance principale.

U_{eff} = tension efficace appliquée aux bornes de la bobine mobile.

On en conclut que pour un haut-parleur à membrane donnée (S et M_d sont imposés), il convient de rendre maximal le terme ℓ/R_e (M_d + M_b), avec :

$$M_b = \rho \frac{d \ell^2}{R_e}$$

ρ = résistivité du matériau constituant la bobine.

d = masse volumique du matériau.

En résolvant par rapport à ℓ, on tire

$$\ell_{opt} = \frac{M_d R_e}{d} \quad (13)$$

Cette valeur correspond en fait à l'égalité des masses M_d et M_b, puisqu'on vérifie :

$$M_b = \rho \frac{d \ell^2}{\rho \ell / s} = ds\ell$$

L'expression de l'efficacité intrinsèque maximale s'écrit alors :

$$E_{max} = \frac{SB}{2 \rho d M_d R_e} \quad (14)$$

On voit immédiatement que E_{max} est d'autant plus grand que le terme d est faible, ce qui indique clairement le meilleur choix d'alliage, en notant :

- pour le cuivre, d = 8930 kg/m³
- pour l'aluminium, d = 2700 kg/m³

Ce raisonnement n'est malgré tout que rarement suivi, sauf pour les haut-parleurs d'aigu. D'une part, il s'avère que l'aluminium n'est pas de mise en œuvre commode (il occupera plus de place dans l'entrefer), d'autre part, on aboutit à un circuit magnétique presque irréalisable à cause d'un terme ℓ_{opt} beaucoup trop grand, impliquant finalement un entrefer trop long qui ne permet pas d'assurer le flux d'induction escompté. Enfin et surtout, on s'écarte notablement d'une valeur optimale d'amortissement liée au terme Bℓ/R_e comme nous allons le voir maintenant.

L'amortissement

Toujours en se référant au modèle de la figure 3, on note que l'amortissement global de l'équipage mobile fait intervenir l'amortissement électrique apporté par la résistance R_e de la bobine, celle-ci se combinant avec les termes R_q, R_m et R_a.

Pour calculer l'amortissement optimal, il est commode, par analogie avec les réseaux électriques, d'utiliser le facteur de surtension Q déjà introduit et dont dépendra directement la fonction de transfert électroacoustique, comme nous le verrons en détail

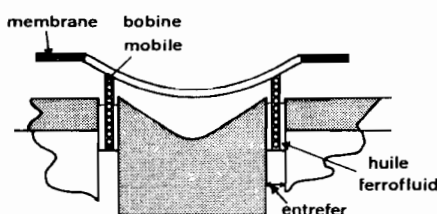


Fig. 24. - Détail du procédé « ferrofluid » pour amortissement et dissipation thermique de la bobine mobile.

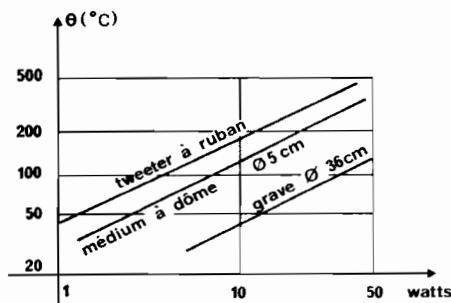


Fig. 25. - Accroissement de la température en fonction de la puissance.

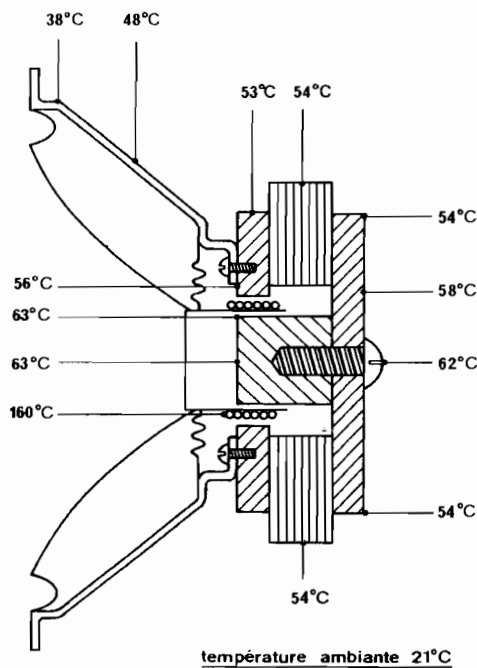


Fig. 26. - Relevé des températures sur un haut-parleur en régime permanent. (Doc. Rank-Leak-Wharfedale).

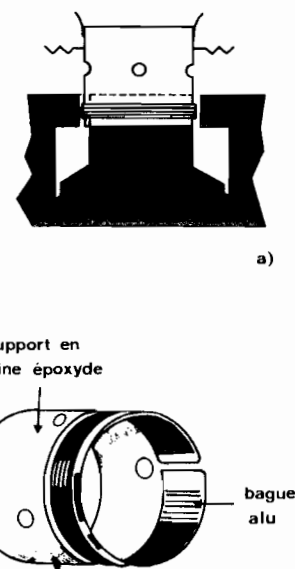


Fig. 27. - Technologie de support de bobine mobile : a) Vue en coupe du circuit magnétique. b) Détail du support.

au chapitre des enceintes acoustiques, soit :

$$Q_T = \frac{(L_m + L_e + L_a)/C_m}{R_t} \quad (15)$$

$$R_t = R_m + R_a + \frac{B^2 \ell^2}{(R_g + R_e) S^2 d} \quad (16)$$

Expression dans laquelle on peut, dans un premier temps, négliger R_g (attaque en tension) et R_e (haut-parleur chargé) où il apparaît que le réglage en réponse transitoire impose un contrôle strict du terme $B^2 \ell^2 / R$, en recherchant pour Q_T une valeur comprise entre 0,3 et 0,7.

Cette approche, suivie aujourd'hui systématiquement par les haut-parleurs à fréquence de résonance basse conçus pour enceintes closes, conduit finalement à sacrifier le rendement au profit d'un amortissement réglé au voisinage de la valeur critique, avec les bobines longues pour lesquelles on vérifie :

$$5 < B\ell < 20, B\ell = \text{facteur de force} \\ 0,3 < Q_T < 0,7, (B \text{ en Tesla, } \ell \text{ en mètre})$$

La détermination des caractéristiques de bobinage est facilitée par l'utilisation d'abaque, sinon à partir d'un programme sur calculateur électronique.

La réalisation se fait classiquement en un, deux ou quatre couches, selon les caractéristiques recherchées :

- **une couche** : légèreté - champ élevé lié à une faible largeur d'entrefer - c'est la technologie habituelle pour les tweeters ;
- **deux couches** : disposition classique pour haut-parleurs grave et médium qui permet des sorties d'enroulement d'un même côté ;
- **quatre couches** : on en attend un meilleur refroidissement et un coefficient de surtension plus élevé améliorant la réponse en basse fréquence des haut-parleurs grave à haut rendement.

Pour contrôler le facteur d'amortissement, certains constructeurs ont recours à un artifice consistant à immerger partiellement la bobine mobile dans une huile ayant de fines particules métalliques en suspension (FERROFLUID) (2). Par ce biais, on obtient du même coup :

- un amortissement de la résonance principale (très utile pour les haut-parleurs médium),

- un meilleur refroidissement de la bobine (la conductivité thermique est environ 5 fois plus élevée que dans l'air),
- une étanchéité aux poussières ou limailles (voir fig. 24).

- La tenue thermique et mécanique

Le projet mécanique est presque entièrement défini aujourd'hui par les conditions sévères de température que connaissent les petits haut-parleurs montés en coffret clos, la limitation de puissance électrique admissible étant finalement directement liée à la température de la bobine mobile comme en témoigne la figure 25 (8). Selon cette référence, la constante de temps thermique, c'est-à-dire, le temps au bout duquel la température a atteint 63 % de la valeur en régime permanent serait comprise entre 0,3 s (équipages à faibles dimensions équipant les tweeters) et 9s (bobines mobiles de diamètres supérieur à 40 mm et équipant les haut-parleurs grave). On en déduit qu'un régime de température aussi vite établi rend particulièrement vulnérables les tweeters soumis à une tension élevée ; d'où la nécessité de leur adjoindre des protections « rapides » extérieures, que nous décrivons au chapitre XIII.

L'élévation de température se révèle non seulement néfaste à la tenue mécanique de la bobine mobile, mais également au circuit magnétique, puisque selon une étude récente des laboratoires de RANK-WHARFEDALE (Angleterre), l'aimant peut se trouver porté en régime permanent à plus de 50° C (fig. 26), avec comme conséquence une chute de son énergie spécifique. C'est la raison pour laquelle RCA a jadis conçu pour ses haut-parleurs de sonorisation un dispositif de refroidissement par eau. Ajoutons enfin que l'élévation de température de la bobine mobile se traduira par une augmentation de la résistance, laquelle peut atteindre 50 % au voisinage de 160° C, pour un conducteur en cuivre. Il en résultera inéluctablement une perte de sensibilité accompagnée d'une modification des impédances de charge des filtres d'aiguillage.

Pratiquement, les exigences de tenue en température, de rigidité et de légèreté, sont classiquement rem-

plies aujourd'hui, soit en faisant appel à des supports en résine époxyde avec bague d'aluminium anodisé chargée d'évacuer les calories (fig. 27), soit par suppression pure et simple de carcasse en partant d'un bobinage à fil thermo-adhérent (fil émaillé gainé d'un film thermoplastique soluble dans l'alcool). Ces précautions permettent des fonctionnements sans dommage jusqu'à 250 °C. Pour les haut-parleurs de sonorisation, cette limite est à reculer jusqu'à 500-600 °C, en faisant appel à des adhésifs conçus pour les applications aéronautiques.

Comme cela a été déjà indiqué, l'utilisation de fluides magnétiques peut abaisser de 20 °C la température de fonctionnement (9).

Un point important concernant le bobinage est :

- d'une part, que les fils de la bobine mobile soient bien perpendiculaires à l'axe de révolution, de façon à ce que la force magnétomotrice soit bien axiale,
- d'autre part, que les prises-relais de connexion pour tresse souple, faisant la liaison entre équipement mobile et bornes extérieures, soient bien symétriques par rapport à l'axe du haut-parleur, sous peine d'introduire des déformations (dissymétrie des lobes de directivité, distorsion par sous-harmoniques).

Pour les haut-parleurs d'aigu, la chasse à l'inertie est prioritaire ; cela conduit à réduire autant que faire se peut les masses parasites ramenées par le collage, tout en garantissant la rigidité mécanique en toutes circonstances. A titre indicatif, pour un haut-parleur de médium $\varnothing = 5$ cm, on obtient :

- membrane : 0,225 g
- support de bobine : 0,24 g
- fil de bobine : 0,9 g
- divers (colle, armature de la membrane) : 0,12 g. Soit un total de 1,55 g.

Pour un haut-parleur d'aigu classique, il est aujourd'hui courant d'abaisser la masse totale de l'équipage mobile à moins de 0,2 g.

(à suivre) P. LOYEZ

(2) Il s'agit de fines particules (moins de 0,01 μ) de ferrite (Fe_3O_4) en suspension dans une huile à basse tension de vapeur, initialement développée pour la lubrification de turbines.