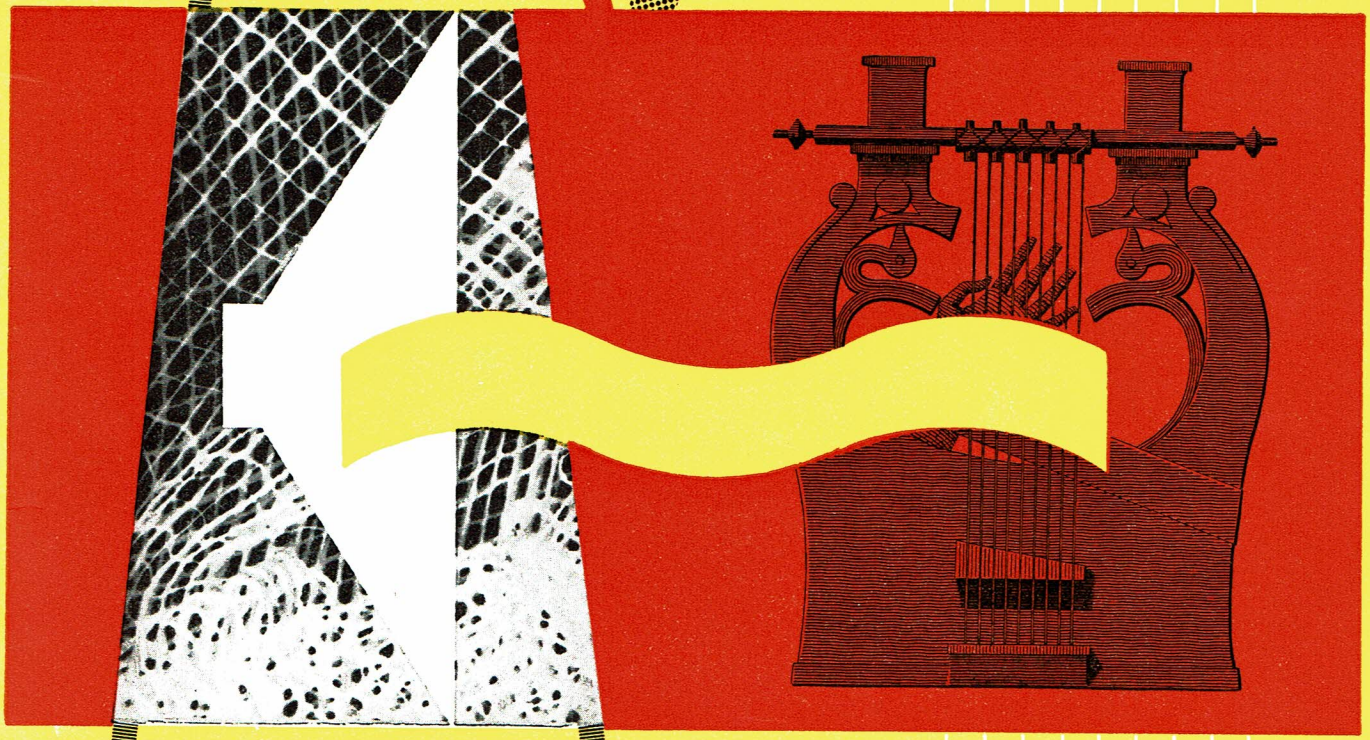
J. Dewèvre
W. Hembise

le haut-parleur

électrodynamique à diaphragme et sa charge acoustique

(étude d'une exploitation rationnelle)



M.B.L.E.

J. DEWEVRE,
gradué In. Ra. Ci (A1)

W. HEMBISE,
ing. techn. A.I.T.Br.

le haut-parleur électrodynamique à diaphragme et sa charge acoustique

(3e partie)

étude d'une exploitation rationnelle

sommaire

Les auteurs montrent dans cette note qu'un transducteur, constitué d'un haut-parleur unique, de diamètre moyen, judicieusement placé dans un coffret clos de volume réduit, présente des performances acceptables dans toute la gamme des audio-fréquences.

Un rendement satisfaisant dans le registre grave peut, en effet, être obtenu avec un tel dispositif par un choix convenable du facteur de qualité du transducteur et par la mise à profit des réflexions des ondes sonores sur les parois du local d'écoute.

Quant au rendement dans le registre aigu, divers moyens de l'améliorer sont indiqués (petit diaphragme, capuchon en cuivre, rayonnement diffus).

Une brève comparaison entre le système préconisé et d'autres systèmes termine l'étude.

C.D.U. : 621.395.623.7

VII. EQUILIBRE DE RENDEMENT

Dans notre première note (*), que nous désignerons dans la suite par note I, nous avons formulé, sur la base de la relation (52) (page 231) exprimant le rendement de référence $\eta_{ea,ref}$ de la conversion électro-acoustique (dans le registre médium), trois conditions pour l'optimisation de ce rendement.

Nous avons remarqué, à ce propos, qu'une de ces conditions (diminution de la masse unitaire) était incompatible avec l'obtention d'un équilibre de rendement dans toute l'étendue du spectre acoustique ; l'application de cette condition risque, en effet, de compromettre la réponse du haut-parleur dans le registre grave.

Or, dans notre étude des aspects subjectifs (note II) (**), nous avons insisté sur la nécessité de conserver, lors de l'audition d'une reproduction, l'impression physiologique particulière que créent les basses réelles (du moins à partir d'une limite inférieure d'environ 65 Hz) ; il importe donc de restituer celles-ci avec une intensité physique suffisante.

Aussi, envisagerons-nous ici les moyens propres à conserver le rendement électro-acoustique à l'extrémité grave du spectre sans le compromettre dans les registres médium et aigu ; en d'autres termes, nous allons analyser les conditions qui paraissent les meilleures pour l'établissement d'un équilibre de rendement physiologiquement satisfaisant dans tous les registres.

Comme nous l'avons vu dans la note II (pages 60 et 61), du côté des fréquences élevées, même si l'on s'écarte de la fréquence f_p, limite du fonctionnement en piston du haut-parleur, le rendement peut être maintenu, sinon sans difficulté du moins sans irrégularités, jusqu'à la fréquence de 6 kHz, extrémité de la zone de sensibilité maximum de l'oreille.

Afin de restituer intactes des informations de caractère transitoire, divers procédés, appliqués au haut-parleur lui-même, permettent, pour des fréquences supérieures à 6 kHz, de maintenir la réponse à un niveau justement équilibré par rapport au médium, du moins dans l'axe du haut-parleur. En dehors de cet axe, la répartition spatiale peut être améliorée par la recherche d'un emplacement du haut-parleur mettant à profit les réflexions du local d'écoute, qui ouvrent le faisceau étroit des fréquences élevées.

Ainsi, à l'heure actuelle, la restitution des aiguës n'est plus nécessairement limitée par la réponse du haut-parleur mais plutôt par la qualité insuffisante des supports de modulation (radiodiffusion, télévision, disque, ruban magnétique), de sorte que, pour bénéficier pleinement des possibilités offertes par le transducteur électro-acoustique, on est conduit à prévoir des circuits correcteurs dans les amplificateurs.

VIII. AMELIORATION DE LA REPONSE DANS LE REGISTRE GRAVE

Du côté des basses fréquences, l'obtention d'un rendement bien équilibré exige l'installation du haut-parleur dans une enceinte revêtant l'une ou l'autre des différentes formes proposées à ce jour.

Pour des raisons diverses, les recherches s'orientent actuellement vers l'élaboration d'enceintes aussi petites que possible. A ce point de vue, nous proposons une solution qui, tout en satisfaisant raisonnablement aux besoins audiologiques réels, n'exige pas, pour le dimensionnement et la mise au point de l'enceinte, des moyens techniques trop spécialisés ; cette solution consiste à réaliser l'enceinte sous forme d'un coffret clos, de très faible volume, contenant un haut-parleur de diamètre moyen et couvrant, seul, toute la gamme des audiofréquences.

Sans condamner d'autres modes plus complexes de couplage avec l'air (enceinte à évent, par exemple), nous montrerons que, malgré son extrême simplicité, le reproducteur que nous préconisons

(*) J. DEWEVRE et W. HEMBISE — *Le haut-parleur électrodynamique à diaphragme et sa charge acoustique — Etude physique* — Revue M.B.L.E, II, 3 (1959) (§ II. 5).

(**) J. DEWEVRE et W. HEMBISE — *Le haut-parleur électrodynamique à diaphragme et sa charge acoustique — Etude des aspects subjectifs* — Revue M.B.L.E, III, 1 (1960) (§ III. 2).

présente des performances parfaitement acceptables. Nous verrons ainsi qu'un haut-parleur unique peut assurer une reproduction subjectivement correcte de tout le spectre acoustique. Nous fixerons à — 6 dB l'atténuation admissible de l'intensité acoustique par rapport à celle correspondant à 400 Hz.

En ce qui concerne les puissances électriques mises en jeu, signalons que, pour un local de dimensions modestes, moyennement absorbant, un amplificateur d'une dizaine de watts suffit pour l'attaque d'un haut-parleur monté en enceinte pseudo-infinie.

VIII. 1. *Technique de la charge pseudo-infinie.*

Rappelons tout d'abord que le rôle principal dévolu à une enceinte associée à un haut-parleur est d'empêcher, aux fréquences basses, la formation d'un court-circuit acoustique entre les deux faces du diaphragme, tout comme le ferait un écran infini théorique.

Rappelons également (note I, § II. 6) que l'emploi d'une enceinte close, de dimensions réduites, permet d'obtenir une certaine réduction des distorsions harmonique et d'intermodulation, au prix, toutefois, d'une élévation de la fréquence de résonance qui passe de f_o à :

$$f'_o = f_o \sqrt{\frac{C_m + C'_m}{C'_m}} \quad (*) \qquad (57)$$

où :

f_o est la fréquence de résonance mécanique du haut-parleur fonctionnant à l'air libre ; cette fréquence f_o est de 50 Hz pour le haut-parleur « 9710 M » ;

C_m est la souplesse des suspensions du diaphragme ; elle vaut, pour le « 9710 M », 13.10^{-4} m/N (après une période de vieillissement relativement courte, la fréquence f_o s'abaisse aux environs de 40 Hz) ;

C'_m est la souplesse caractérisant le volume d'air enfermé à l'arrière du diaphragme ; en vertu de la formule (62) note I, page 233), C'_m est donné approximativement, en fonction du volume total v_o de l'enceinte, par l'expression :

$$C'_m = \frac{v_o}{\gamma\, p_o\, S^2} \qquad (62)$$

dans laquelle :

γ est le rapport $\frac{c_p}{c_v}$ des chaleurs spécifiques à pression et à volume constants et vaut 1,4 pour l'air ;

p_o est la pression de l'air ambiant ; habituellement p_o vaut : 10^5 N/m² ;

S est l'aire effective du diaphragme du haut-parleur ; pour le « 9710 M » cette surface S est de 0,025 m² ($S^2 = 625.10^{-6}$ m⁴).

Nous adopterons, pour la fréquence de résonance f'_o de l'ensemble haut-parleur — enceinte, la valeur de 65 Hz ; dans ces conditions, il faut prévoir, pour le « 9710 M », selon les relations que nous venons de rappeler, un coffret clos d'un volume de 70 dm³, la souplesse C'_m étant alors de 8.10^{-4} m/N.

Il est encore possible de réduire ce volume en recourant au processus thermodynamique suivant.

Si on remplit l'enceinte d'un matériau absorbant très poreux, tels que le kapok, la laine minérale, l'ouate de verre, la fibre de bois, disposé d'une manière lâche, les compressions et détentes successives de l'air interne tendent à devenir isothermes. Il en résulte que, dans la formule (62), il faut remplacer γ par l'unité. Le volume nécessaire à donner au coffret, pour obtenir pour f'_o la même valeur de 65 Hz , n'est plus alors que de 50 dm³. Ainsi, contrairement à une opinion généralement admise, l'introduction de matériaux poreux dans une enceinte en augmente le « volume apparent ».

Le volume du coffret étant fixé, il s'agit de déterminer l'amortissement du système mobile, c'est-à-dire le facteur de qualité Q du transducteur, afin d'obtenir une courbe de réponse optimum du haut-parleur dans le registre grave. On constate que, pour atteindre ce résultat, il faut rendre le système pratiquement apériodique. Nous verrons, en VIII. 2, les divers moyens que l'on peut mettre en œuvre pour donner à l'amortissement la valeur nécessaire.

En résumé, l'emploi d'un coffret pseudo-infini, avec lequel le haut-parleur forme un ensemble apériodique, présente les avantages suivants :

— Possibilité d'obtenir une courbe de réponse optimum pour le haut-parleur, grâce à un choix approprié du facteur de qualité Q du transducteur.

— Réduction de l'encombrement et du coût de l'enceinte par suite de son faible volume ; pos-

(*) En toute rigueur, cette formule devrait comporter un facteur qui tiendrait compte de la différence des valeurs à attribuer à M_m [formule (13), note I] suivant que le diaphragme rayonne par une face (coffret) ou par ses deux faces (air libre).

sibilités plus larges de conférer une présentation esthétique au coffret.

De plus, le choix de l'emplacement du reproducteur, le plus favorable à la formation d'images virtuelles du diaphragme, soit près d'un mur soit dans une encoignure, est grandement facilité lorsque l'enceinte est de dimensions réduites.

Nous avons vu, en effet, dans la note II, que, pour compenser la perte de rendement qui résulte de l'amortissement du système mobile, prévu pour des fréquences voisines de f_o [voir courbe en trait interrompu de la figure 8 de la note II (page 56)], on renforce le rayonnement du diaphragme par la création d'images virtuelles. Nous dirons, en VIII. 4, comment s'opère ce renforcement.

— Suppression du danger de vibrations des parois du coffret, celles-ci étant de faibles dimensions ; de semblables vibrations sont responsables de rayonnements acoustiques parasites dont l'effet auditif est particulièrement désagréable.

— Elimination, grâce au revêtement absorbant dont on tapisse intérieurement le coffret, de tout risque de coloration artificielle de l'audition dans le registre médium, résultant de l'établissement d'ondes stationnaires.

— Stabilité dans le temps du comportement du haut-parleur, en raison de l'absence de tout résonateur acoustique et, par conséquent, de toute nécessité de respecter un accord critique entre les fréquences de résonance du diaphragme du haut-parleur et du résonateur acoustique. L'affaissement du diaphragme, dû à l'assouplissement de ses suspensions, n'entraîne aucun risque de désaccord du système. De plus, il est certain que le comportement, dans le registre grave, d'un reproducteur à charge pseudo-infine et apériodique s'améliore progressivement car sa fréquence de résonance s'abaisse à mesure qu'il vieillit.

Par ailleurs, il semble illogique, selon nous, de concevoir, comme c'est la tendance habituelle, une enceinte dans le seul but d'aider, par un relevé additionnel du grave, à compenser la déficience physiologique de l'oreille aux faibles niveaux d'écoute qui, d'après l'allure des courbes de Fletcher-Munson et Robinson-Dadson, sont les plus courants. A notre avis, ce rôle doit plutôt être réservé aux correcteurs de timbres prévus dans les amplificateurs.

En ce qui concerne la courbe d'impédance électrique, dans le registre grave, du haut-parleur associé à une enceinte pseudo-infinie dans laquelle a été introduit le matériau poreux choisi (courbe analogue à la courbe 1 de la figure 12 de la note II, page 64), on s'aperçoit qu'à la fréquence de résonance f'_o, il n'y a quasi pas d'augmentation brusque de l'impédance cinétique Z_{em} et, qu'en dehors de cette fréquence f'_o, la courbe ne présente aucun accident notable dû à un mode parasite de vibration interne. Eventuellement, une rectification peut être obtenue par accroissement de la quantité de matériau absorbant à l'intérieur de l'enceinte.

On pourrait objecter que la mise en œuvre de ce procédé est préjudiciable au rendement électroacoustique du système. Mais, la perte de rendement, par augmentation de la composante résistive de la charge, ne s'élève qu'à 1 ou 2 dB. Par ailleurs, le rendement n'est guère critique à la fréquence de 400 Hz (correspondant à l'impédance nominale) qui se situe dans le domaine des fréquences où les puissances orchestrales sont les plus élevées. Quant à sa valeur dans la zone de sensibilité maximum de l'oreille (2 à 5 kHz), elle ne dépend que des modes complexes de vibrations du diaphragme, indépendants de la charge acoustique de celui-ci. Dans le registre grave, l'effet de l'absorbant décroît à mesure que la fréquence s'abaisse.

La forme à donner à une enceinte pseudo-infinie, de volume donné, n'est pas quelconque.

Si une des dimensions est grande vis-à-vis des deux autres (par exemple : 1 m × 0,25 m × 0,25 m), les modes de vibration de la colonne d'air, de hauteur l (égale à 1 m), ainsi formée, sont semblables à ceux d'un tuyau fermé.

Dans ces conditions, la réactance de l'enceinte perd son caractère purement capacitif ; en effet, aux fréquences :

$$f_r = \frac{c}{4l}, 3\frac{c}{4l}, \ldots\ldots$$

(c : vitesse du son dans l'air), il y a résonance et la réactance est minimum.

Aux fréquences :

$$f_a = 2\frac{c}{4l}, 4\frac{c}{4l}, \ldots\ldots$$

il y a anti-résonance et la réactance est maximum.

Ces propriétés peuvent évidemment être mises à profit pour influencer l'allure de la courbe de réponse du haut-parleur par le choix du rapport entre f_o et f_r ou f_a. Mais on revient ainsi à des « procédés résonnants » qui s'éloignent de l'apériodicité que nous préconisons, en même temps que l'on perd, du fait de la nécessité « d'accorder » le système, la simplicité de précalcul et la garantie d'un fonctionnement correct immédiat, sans essais préalables.

Remarque. — Dans la réalisation technologique de l'ensemble haut-parleur-coffret pseudo-infini, quelques précautions doivent être prises :

— On se met à l'abri des vibrations parasites des parois du coffret, vibrations qui peuvent éven-

tuellement se produire malgré la petite surface de ces parois, en choisissant le bois (matériau le plus couramment utilisé dans la construction des enceintes) le plus acoustiquement inerte (l'épaisseur minimum des parois étant de 2 à 3 cm) et en installant à l'intérieur du coffret, entre les parois, des traverses de raidissement.

— L'ouverture circulaire à prévoir dans une des parois de l'enceinte, en regard du diaphragme du haut-parleur, ne doit pas être ménagée au milieu de cette paroi afin d'éviter que les ondes sonores n'atteignent simultanément les arêtes de l'enceinte, créant ainsi un phénomène de diffraction préjudiciable à une bonne audition.

— Le plan de la base du cône constituant le diaphragme doit être de préférence au niveau de la face externe de la paroi car la fixation du haut-parleur à la face interne provoque la formation d'un véritable tuyau (de section et de longueur respectivement égales à la surface de l'ouverture et à l'épaisseur de la paroi : 2 à 3 cm) dont les résonances propres risquent de créer des irrégularités de réponse dans le haut-médium et le proche-aigu.

VIII. 2. *Modes d'amortissement d'un haut-parleur.*

VIII. 2. 1. **Amortissement électro-magnétique**

Cet amortissement a été étudié dans la note I ; le terme résistif, qu'il introduit dans l'expression de l'impédance mécanique totale du transducteur, est donné par la relation (34) (page 229) :

$$R_a = \frac{B^2 l^2}{R_g + R_e} \qquad (34)$$

avec :

B : induction magnétique dans l'entrefer,

l : longueur totale de l'enroulement de la bobine mobile,

R_e : résistance électrique de cette bobine,

R_g : résistance interne de la source de tension alimentant la bobine mobile.

La formule (34) montre que R_a dépend, notamment, de B et de R_g ; on peut donc agir sur la valeur de R_a :

— soit par *voie magnétique*, en faisant varier l'induction B

— soit par *voie électrique*, en modifiant R_g ; toutefois la présence du terme R_e, qui s'ajoute à R_g, rend inopérante une réduction trop poussée de R_g, en vue d'augmenter R_a.

VIII. 2. 2. **Amortissement acoustique**

Cet amortissement est obtenu au moyen d'une chambre pneumatique ménagée à l'arrière du diaphragme dont le sommet est parfaitement obturé, et creusée dans le noyau en fer doux de manière à épouser la forme du cône (voir figure 1, note I, page 222). Le laminage des filets d'air, qui se produit lors du mouvement du diaphragme, accroît le terme résistif de l'impédance mécanique du transducteur.

L'amortissement acoustique peut aussi être obtenu par un choix judicieux de l'absorbant acoustique qui garnit les faces internes des parois de l'enceinte.

VIII. 3. *Rôle du facteur de qualité Q du transducteur.*

Par définition, à la pulsation de résonance ω'_o, ce facteur de qualité est donné par la formule :

$$Q = \frac{1}{\omega'_o C_{mt} R}$$

avec

$$R = R_r + R_f + R_a + R_{ac}$$

et

$$C_{mt} = \frac{C_m C'_m}{C_m + C'_m}$$

R_{ac} désigne le terme résistif dû à l'amortissement acoustique ; (pour les autres notations, voir note I, pages 221, 223, 229 et 232).

D'autre part, nous avons montré, dans la note I, que la vitesse de déplacement de la bobine mobile et, par conséquent, du diaphragme lorsque le haut-parleur fonctionne en piston, s'exprime par la relation :

$$V = \frac{1}{Z_m + \frac{B^2 l^2}{R_g + R_e}} \cdot \frac{B l}{R_g + R_e} E_g \qquad (33)$$

En tenant compte de l'effet de l'enceinte pseudo-infinie et de l'amortissement acoustique, on peut écrire (33) sous la forme :

$$V = \frac{1}{R + j\omega M_m + \frac{1}{j\omega C_{mt}}} \frac{Bl}{R_g + R_e} E_g$$

ou bien

$$V = A \frac{1}{1 + jQ\left(x - \frac{1}{x}\right)} \qquad (63)$$

en posant :

$$A = \frac{Bl}{R\,(R_g + R_e)}\,E_g \qquad (64)$$

et

$$x = \frac{\omega}{\omega'_o} \quad \text{avec} \quad \omega'_o = \frac{1}{\sqrt{M_m\,C_{mt}}} \qquad (65)$$

Le module $|V|$ vaut alors :

$$|V| = \frac{A}{\sqrt{1 + Q^2\,(x - \frac{1}{x})^2}} \qquad (66)$$

Lorsque la longueur d'onde acoustique est supérieure au triple du diamètre du diaphragme, on démontre que le module de la pression acoustique p, à une distance r du haut-parleur, supposée grande par rapport au diamètre de ce dernier, est donnée approximativement par :

$$|p| = \frac{|V|\,S\,\rho\,\omega}{2\,\pi\,r} \qquad (67)$$

S étant l'aire effective du diaphragme et ρ la densité de l'air.

Compte tenu de (65) et (66), on a :

$$|p| = \frac{A\,S\,\rho\,\omega'_o}{2\,\pi\,r}\,\frac{x}{\sqrt{1 + Q^2\,(1 - \frac{1}{x})^2}} \qquad (68)$$

Prenons, comme pression de référence, la valeur (hypothétique) vers laquelle tend $|p|$ lorsque x tend vers l'infini ; on trouve :

$$|p_{réf}| = \frac{A\,S\,\rho\,\omega'_o}{2\,\pi\,r\,Q} \qquad (69)$$

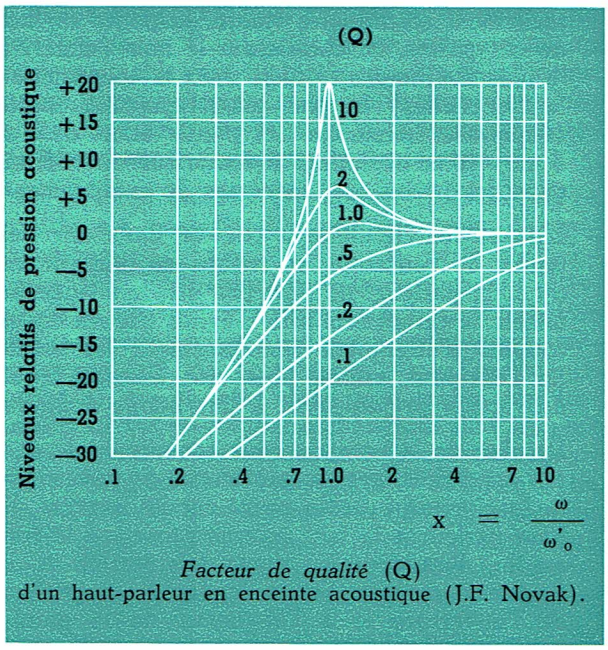
ce qui donne :

$$\frac{|p|}{|p_{réf}|} = \frac{x^2}{\sqrt{(x^2 - 1)^2 + \frac{x^2}{Q^2}}} \qquad (70)$$

Exprimé en dB, ce rapport vaut :

$$SPL = 20 \log_{10} \left| \frac{x^2}{\sqrt{(x^2 - 1)^2 + \frac{x^2}{Q^2}}} \right|$$

S P L : relative sound pressure level [d'après Novak ([20])] c'est-à-dire niveau relatif de pression acoustique.



Facteur de qualité (Q)
d'un haut-parleur en enceinte acoustique (J.F. Novak).

Fig. 13

Les courbes de la figure 13 donnent S P L en fonction de x, pour différentes valeurs de Q.

L'examen de ces courbes conduit aux conclusions suivantes :

— Pour $Q > 1$, la pointe de résonance provoque une coloration de tout signal incident, de fréquence voisine de f'_o ; de plus, la courbe de réponse accuse une chute rapide du côté des basses fréquences.

— Pour $Q < 0{,}5$, cette chute est moins rapide mais l'atténuation des sons graves affecte également les fréquences supérieures à f'_o, atténuation difficile à compenser par le procédé de couplage acoustique entre haut-parleurs ou à l'aide du circuit électronique de correction.

Il ne faut donc pas rechercher un facteur de qualité maximum qui, non seulement provoque une coloration marquée à la résonance, mais rend difficile le passage des transitoires. Il faut plutôt adopter une valeur qui rend compatibles une réponse satisfaisante au voisinage de la résonance et une réponse impulsionnelle correcte ; une valeur de Q voisine de 0,5 (y compris les effets additionnels de l'enceinte et de l'amplificateur) semble être optimum.

Ces considérations confirment que l'emploi d'un haut-parleur à champ magnétique très intense

peut susciter des désillusions s'il est monté dans un coffret acoustique à caractère partiellement résistif.

Il peut s'avérer nécessaire, en pareil cas, pour ne pas étouffer totalement les basses, d'utiliser un amplificateur à très faible facteur d'amortissement ou de réduire ce dernier par insertion d'une résistance-série.

VIII. 4. *Couplage acoustique entre haut-parleurs.*

Nous avons signalé, en VIII. 1, que l'installation de l'ensemble haut-parleur-enceinte, à proximité d'un mur du local d'écoute et, de préférence, dans une encoignure, constitue, par l'obtention d'images virtuelles du diaphragme, un moyen efficace de corriger l'affaiblissement progressif du registre extrême-grave.

A lui seul, sans l'emploi de la commande de tonalité prévue dans les circuits électroniques, ce procédé très simple est capable de procurer un gain substantiel de pression acoustique sous 100 Hz ; des vérifications expérimentales ([14]) ont prouvé qu'à 50 Hz ce gain peut encore atteindre une vingtaine de dB par rapport à la pression mesurée lorsque le reproducteur est situé loin des parois du local d'écoute.

Ce renforcement a été observé depuis longtemps mais est rarement exploité. L'effet peut être décrit de la manière suivante : si l'on place deux haut-parleurs identiques fonctionnant en piston dans un même plan, si leur distance d est faible vis-à-vis de la longueur d'onde λ, si enfin les mouvements de leurs membranes sont parfaitement synchrones et de même amplitude U, alors la puissance acoustique rayonnée totale vaut quatre fois la puissance W qu'émettrait un de ces haut-parleurs s'il vibrait seul, avec la même amplitude U (l'autre haut-parleur étant au repos).

L'explication la plus simple de ce phénomène repose sur le fait que l'intensité acoustique est proportionnelle au carré de l'amplitude de la variation de la pression d'air (pression acoustique).

Lorsque d « λ, les variations de pression en tout point de l'espace et dues à chacun des haut-parleurs, variations que nous appellerons composantes, sont sensiblement synchrones et de même amplitude ; par conséquent, l'amplitude de la variation résultante de pression est double de la variation composante. L'intensité en chaque point est donc quadruplée, de même que la puissance rayonnée totale.

Par contre, lorsque les haut-parleurs émettent un son de hauteur telle que λ soit comparable à d, les variations composantes ne sont plus de même phase de sorte que la variation résultante de pression est nécessairement inférieure au double d'une variation composante. Accessoirement, remarquons que les amplitudes des variations composantes peuvent aussi différer, mais cela n'affecte pas la conclusion qui se dégage du raisonnement, à savoir que l'augmentation marquée de puissance rayonnée par l'effet qui vient d'être décrit ne peut se faire sentir qu'aux basses fréquences qui se trouvent donc renforcées par rapport aux autres.

Examinons maintenant ce que devient l'impédance mécanique de rayonnement que voit chaque diaphragme lorsque les deux haut-parleurs fonctionnent ensemble. Comme la puissance rayonnée totale vaut 4 W, chaque haut-parleur rayonne, par raison de symétrie, une puissance de 2 W ; comme l'amplitude du mouvement du diaphragme est toujours supposée égale à U, cela indique que l'impédance de rayonnement est modifiée, phénomène qui porte le nom de « *couplage acoustique* ».

La cause physique du couplage acoustique réside dans le fait que chaque diaphragme induit sur l'autre des variations de pression supplémentaires.

On peut d'ailleurs assister à un effet tout à fait analogue, sinon identique, lorsqu'un haut-parleur est placé au voisinage d'une paroi plane ayant de bonnes propriétés réfléchissantes pour les ondes sonores. En effet, théorie et expérience montrent alors que tout se passe, dans le demi-espace du côté du haut-parleur, comme s'il existait un second haut-parleur symétrique du premier par rapport au plan de la paroi. Ce second haut-parleur est l'image acoustique virtuelle du premier. Il est bon d'ajouter que cette propriété n'est rigoureusement valable que dans le cas d'une paroi unique, d'étendue infinie ; cela n'est que très approximativement réalisé en pratique ; on a très généralement affaire à de multiples parois finies formant diverses encoignures.

Dans de pareils cas, il semble que le principe des images acoustiques soit assez discutable. Néanmoins, appliqué avec discernement, ce principe peut servir de guide lors de l'installation d'un haut-parleur.

IX. AMELIORATION DE LA REPONSE DANS LE REGISTRE AIGU

IX. 1. *Atténuation de l'accroissement de l'impédance électrique de la bobine mobile avec la fréquence.*

Nous avons vu dans la note II (§ VI. 2, page 61) que l'adjonction, au diaphragme principal du haut-parleur, d'un diaphragme additionnel de petit diamètre améliore sensiblement la réponse du haut-parleur dans le registre aigu. Il faut veiller cependant à ce que l'avantage ainsi obtenu ne soit pas compromis par un accroissement exagéré de l'impédance électrique de la bobine mobile avec la fréquence.

En effet, dans l'expression du module de cette impédance :

$$|Z_e| = \sqrt{R^2_e + \omega^2 L^2_e}$$

la résistance R_e augmente notablement quand la fréquence s'élève, par suite des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les pièces polaires, et la réactance ωL_e croît avec ω : Z_e double de valeur quand f passe de 100 Hz à 10 kHz (voir courbe en pointillé de la figure 8, note II, page 56).

Un excellent moyen pour atténuer cet accroissement d'impédance consiste à utiliser un capuchon de cuivre. Ce procédé, connu depuis les travaux de Kellog mais peu employé, présente de grands avantages :

- Il n'exige pas d'augmentation du poids de l'aimant et ne pose aucun problème technologique pour sa mise en pratique.
- Il ne provoque qu'une légère baisse de rendement parce que le placement du capuchon de cuivre ne nécessite qu'un élargissement minime de l'entrefer.

Ce capuchon de cuivre se comporte comme une spire en court-circuit, couplée à l'enroulement de la bobine.

Si l'on désigne par M le coefficient d'induction mutuelle entre la bobine mobile et la spire que forme le capuchon, et par R_c et L_c respectivement la résistance et le coefficient de self-induction de cette spire, les valeurs de la résistance R'_e et du coefficient de self-induction L'_e résultants de la bobine mobile sont :

$$R'_e = R_e + \frac{\omega^2 M^2 R_c}{\omega^2 L^2_c + R^2_c}$$

$$L'_e = L_e - \frac{\omega^2 M^2 L_c}{\omega^2 L^2_c + R^2_c}$$

Comme $R_c \ll R_e$, on voit que R'_e est très sensiblement égal à R_e.

Quant à L'_e, étant donné que, pour les fréquences élevées, $R_c \ll \omega L_c$, on peut écrire :

$$L'_e = L_e - \frac{M^2}{L_c}$$

Cette relation montre que L'_e tend vers zéro à mesure qu'on s'approche du couplage parfait pour lequel on a :

$$M^2 = L_e L_c$$

On pourrait croire que les deux pièces massives en fer doux qui encadrent l'entrefer agissent, elles-mêmes, à la manière d'une spire en court-circuit et qu'un anneau de cuivre est inutile. Il n'en est rien car, par suite de l'effet pelliculaire très prononcé dans les matériaux ferro-magnétiques, seule une mince couche de chaque pièce polaire est parcourue par des courants, et tout se passe comme si le capuchon en cuivre était remplacé par un mince capuchon en fer, auquel cas les inégalités :

$$R_c \ll R_e$$

et

$$R_c \ll \omega L_c$$

cessent d'être valables.

La figure 12 de la note II (page 64) permet de constater l'avantage qu'offre, sur le diffuseur de technique conventionnelle, un haut-parleur muni d'une chambre pneumatique et d'un anneau de cuivre dans l'entrefer.

IX. 2. *Recours au rayonnement diffus.*

Nous avons montré dans la note II (§ VI. 3, page 61), à l'aide du diagramme polaire de rayonnement (figure 11, page 63), qu'aux fréquences élevées, une directivité se manifeste suivant l'axe du haut-parleur, dans la distribution spatiale des pressions acoustiques.

Une reproduction musicale crée une sensation auditive plus semblable à celle ressentie à l'écoute directe d'une interprétation d'une grande formation orchestrale si on supprime, à la fois, cet effet directionnel et l'impression de « trou dans le mur » que l'on éprouve à l'audition d'une restitution assurée par un seul diffuseur.

Nous avons déjà signalé que cette impression peut être évitée en utilisant la technique stéréophonique.

Mais, si l'on ne dispose que d'une source radiante à monocanal d'informations, seul problème que nous nous sommes proposé d'envisager particulièrement dans cette étude, d'autres moyens doivent être mis en œuvre.

On peut, soit ouvrir l'angle de distribution horizontale des fréquences élevées en plaçant devant le diaphragme du haut-parleur un panneau muni de fentes horizontales, ce panneau jouant le rôle d'une véritable lentille acoustique divergente, soit soustraire les auditeurs à un « jet sonore direct » en dirigeant le haut-parleur vers le plafond du local d'écoute.

Ce second procédé peut être préjudiciable à l'intelligibilité des messages parlés et à une bonne restitution d'interprétations de petits ensembles instrumentaux, c'est-à-dire dans des cas où la source sonore est assimilable à une source ponctuelle. On peut obvier à cet inconvénient soit en recourant à un réflecteur conique ou exponentiel omnidirectionnel soit en profitant simplement de la réflexion sur les murs et le plafond du local d'écoute. Cette dernière méthode est très semblable à celle utilisée pour obtenir une amélioration de la réponse dans le registre grave, par formation d'images virtuelles du diaphragme. D'ailleurs, nos essais ont montré que, compte tenu du temps de réverbération du local d'écoute, temps qui doit être accepté tel qu'il est, surtout lorsqu'il s'agit d'une pièce d'habitation, il existe une position et une orientation optima du haut-parleur unique, placé dans une enceinte pseudo-infinie, pour lesquelles peuvent être atteints un équilibre de rendement satisfaisant dans toute l'étendue du spectre acoustique et une bonne restitution de toute espèce d'information.

On pourrait objecter que l'application de ce procédé

— supprime tout contrôle du rayonnement tant les réflexions peuvent devenir complexes,

— entraîne un affaissement de la bobine mobile dans l'entrefer, dû à la position verticale de l'axe du haut-parleur,

— n'améliore pas suffisamment l'intelligibilité des messages parlés par suite d'un élargissement encore trop accentué des faisceaux émis par la source,

— supprime l'effet directionnel indispensable à l'utilisation éventuelle de la technique stéréophonique.

A propos du second défaut, on a mesuré, pour le haut-parleur « 9710 M », un affaissement inférieur à 0,1 mm ; il est donc pratiquement négligeable.

Quant aux deux derniers, ils peuvent être palliés, dans une large mesure à l'aide d'un dispositif réflecteur qui, placé au-dessus du diaphragme, concentre en un faisceau étroit une fraction de l'énergie totale rayonnée.

Une reproduction en bi-canal est, toutefois, possible sans recourir à ce réflecteur si les deux haut-parleurs sont suffisamment écartés l'un de l'autre pour que les multiples réflexions « comblent » aisément l'espace qui les sépare (techniquement dit le « trou du milieu ») sans risque de mélange entre les canaux.

Remarque. — Des mesures comparatives ont été effectuées récemment ([16]), en chambre sourde et dans un local d'écoute ordinaire, sur un haut-parleur de 21 cm de diamètre, convenablement chargé et dirigé verticalement, à partir d'un générateur à bandes de bruit.

Dans le local d'écoute, on constate, à la distance courante d'écoute de 4 m, un affaiblissement du son direct par rapport aux sons réfléchis, de 6 dB à 5 kHz et de 12 dB à 10 kHz.

Une telle sollicitation du local permet, grâce à une plus large redistribution par réflexions, de récupérer, à la même distance de 4 m et pour la fréquence de 10 kHz, un niveau équivalent à celui mesuré, en chambre sourde, dans l'axe et à proximité immédiate du haut-parleur considéré.

X. CONCLUSION

A l'heure où apparaît la possibilité de mise en application de la technique stéréophonique exigeant deux ensembles haut-parleur-enceinte, un diffuseur peu compliqué et peu encombrant est particulièrement intéressant.

Le haut-parleur électrodynamique à diaphragme réunit, nous l'avons vu, ces deux qualités.

Les modèles de conceptions différentes (électrostatique et ionique) sont trop récents pour déjà s'imposer définitivement tandis que les types à pavillons exponentiels, s'ils apportent une augmentation de rendement, prennent toujours, tout comme les dispositifs coaxiaux comportant deux ou plusieurs moteurs et radiateurs, la forme de réalisations très coûteuses.

Quant aux charges par enceinte anti-résonnante à évent (type bass-reflex), leur délicate mise au point ne peut être effectuée que dans des ateliers spécialisés et ne peut donc être envisagée par l'usager lui-même alors que celle de l'enceinte pseudo-infinie ne présente pas de difficulté sérieuse.

Tout le monde n'est cependant pas d'accord sur les qualités du haut-parleur électrodynamique, à diaphragme à rayonnement direct (c'est-à-dire à diaphragme dépourvu d'un dispositif d'adaptation

avec l'air, comme un pavillon par exemple) et surtout sur les avantages de l'enceinte pseudo-infinie.

Mais, le point de vue des adversaires de celle-ci reste polarisé sur des questions de rendement dans le médium et de réponse dans l'extrême-grave, en dessous d'une limite qui est musicalement, et à fortiori phonétiquement, inutile.

Nous n'hésitons pas à affirmer que les améliorations apportées par d'autres modes de construction de haut-parleurs et d'autres systèmes de constitution de charges acoustiques ne valent pas les risques ou les frais supplémentaires qu'ils entraînent, du moins dans l'état actuel de la technique et dans les conditions ordinaires d'écoute étant donnés tous les impondérables du local et la subjectivité de jugement du contenu des programmes.

Ainsi l'utilisation d'un seul haut-parleur, monté en enceinte pseudo-infinie installé de manière à mettre à profit le rayonnement par images virtuelles, constitue une solution économique et satisfaisante du problème que pose la restitution fidèle des émissions sonores dans les locaux de petites dimensions.

Dans le cas des applications professionnelles où une plus grande puissance doit être mise en jeu (locaux de grandes dimensions), une solution logique consiste en l'emploi de plusieurs diffuseurs juxtaposés afin d'augmenter, grâce à leur couplage acoustique, l'impédance de rayonnement dans le registre grave.

BIBLIOGRAPHIE

[1] R.C. AVEDON, W. KOOY and J.E. BURCHFIELD — *Design of wide-range ultra-compact Speaker System,* Audio, mars 1959, pp. 22-26 et 68-69.
More on the Air Spring and the ultra-compact Loudspeaker, Audio, juin 1960, pp. 22-27.

[2] A.B. COHEN — *Hi-Fi Loudspeakers and Enclosures,* Rider, New-York (1956).
Acoustique architecturale pour la stéréophonie, série d'articles (adaptation française de B.A. Gayot) publiés dans « TSF et TV » de février à juin 1960.

[3] L. CONTURIE — *L'Acoustique dans les Bâtiments (théorie et applications),* Eyrolles, Paris (1955).

[4] R.E. COOKE — *L'impédance et l'angle de phase des charges acoustiques,* Radio-TV Revue, juin 1959, pp. 391-394 et 419, (adaptation française d'après la revue anglaise « Muirhead Technique »).

[5] N.H. CROWHURST — *More Bass from smaller Loudspeakers,* Radio-Electronics, juin 1960, pp. 81-87 et juillet 1960.

[6] DE BOER — *Le rendement des haut-parleurs,* Revue Technique Philips, IV, 10 (octobre 1939), pp. 313-319.

[7] D.A. DOBSON — *Closed Box Loudspeaker Enclosures,* Thèse de «Master of Science» au Massachusetts Institute of Technology (1951) (inédit).

[8] H.A. HARTLEY — *Audio Design Handbook,* Gernsback Library (n° 71), New-York (1958), chap. 10 « Speakers and Enclosures », pp. 149-172.

[9] R.D. HERLOCKER — *Simplified Speaker Testing,* Electronics World, november 1959, pp. 41-43 et 126.

[10] H.F. HOPKINS and N.R. STRYKER — *A proposed loudness-efficiency rating for loudspeakers and the determination of system power requirements for enclosures,* P.I.R.E., 36, 3 (mars 1948), pp. 315-335.

[11] J.A. HUFF — *Hi-Fi Speaker Enclosure damping Materials,* Audio, 43, 8 (août 1959), pp. 26-30.

[12] E.J. JORDAN — *Loudspeaker Enclosure Design*, Wireless World, Janvier 1956, pp. 8-14.

Baffles unbaffled, Audio, août 1956, pp. 15-17.

Principles of Loudspeaker Design, série d'articles publiés dans « Hi-Fi News » de juillet 1959 à février 1960.

[13] S. KELLY — *Loudspeakers*, J.B.S.R.A., 6, 5 (mai 1960), pp. 113-117.

[14] P.W. KLIPSCH — *Corner Speaker Placement*, J.A.E.S., 7, 3 (juillet 1959), pp. 106, 109 et 114.

Room Dimensions for optimum Listening and the half-room Principle, IRE transactions on Audio, Av-6, 1, janv.-fév. 1958.

[15] V.O. KNUDSEN and C.M. HARRIS — *Le projet acoustique en architecture* (traduit et adapté par R. Cadiergues et A. Moles), Dunod, Paris (1957).

[16] T.S. KORN et J. HOUGARDY — *Mesures des haut-parleurs dans les lieux d'utilisation*, Acustica, 9 (1959), pp. 121-126.

T.S. KORN et R. VAN DE PLAS — *Acoustical Field at normal Modes in Rooms*, J.A.S.A., 29 (décembre 1957), pp. 1267-70.

T.S. KORN — *Nouvelles tendances dans les mesures des haut-parleurs*, Radio-Electronique professionnelle belge, (juin 1960), pp. 21, 23 et 25.

T.S. KORN — *Enceinte acoustique coaxiale*, Revue du son, (mars-avril 1960), pp. 93-95.

[17] R. LAFAURIE — *Les baffles — Etude théorique et pratique des écrans et enceintes acoustiques*, série d'articles publiés dans « Toute la Radio » de mars-avril 1953 à juillet-août 1954.

[18] F.A. LOESCHER — *Das Problem der Sekundären elektroakustischer Wandler*, Gravesaner Blätter, 18 (1960), pp. 41-52.

[19] W.F. MEEKER, F.H. SLAYMAKER and L.L. MERRILL — *The acoustical Impedance of closed rectangular Loudspeaker Housings*, J.A.S.A., 22 (mars 1950), pp. 206-210.

[20] J.F. NOVAK — *Performance of Enclosures for low-resonance high compliance Loudspeakers*, J.A.E.S., 7 (janvier 1959), pp. 29-37 et J.A.E.S., 7 (octobre 1959), pp. 246-248.

[21] E. PAOLINI — *La réponse des haut-parleurs aux environs de la résonance principale*, Annales des Télécommunications, 12, 11 (novembre 1957), pp. 387,391.

[22] PLACH and WILLIAMS — *Loudspeaker Enclosures*, Audio, juillet 1951.

[23] D.F. REHBERGER — *Subdivided Hi-Fi Speaker Enclosure*, Electronics World, novembre 1959, pp. 57-59 et 112, (résumé français commenté dans la « Revue du Son » de mars-avril 1960, p. 96).

[24] J. RIETHMULLER — *D'un maillon à l'autre : les haut-parleurs*, série d'articles publiés dans « Toute la Radio » de décembre 1959 à juillet-août 1960.

[25] D.E.L. SHORTER — *Sidelights on Loudspeaker Cabinet Design*, Wireless-World, novembre 1950, pp. 382-385 ; décembre 1950, pp. 436-438.

[26] R. VAN DE PLAS — *Contribution à l'étude de la reproduction du son : Examen de la réaction de la salle sur le haut-parleur*, mémoire de licence en sciences physiques (Université Libre de Bruxelles).

[27] K. VEPA and N.K. TRIVEDI — *Useful absolute Efficiences of typical Loudspeaker Systems*, Acustica, 4, 1 (1954), pp. 329-332.

[28] E.M. VILLCHUR — *Another Look at acoustic Suspension*, Audio, janvier 1960, pp. 24-25 et 75-77.

[29] R. WEST — *The Speaker in your Home*, série d'articles dans « Hi-Fi News » de juin 1956 à mai 1957.

Diffusing the High Frequencies, Hi-Fi News, avril 1958, pp. 635-637.

[30] I. WOLFF and G. MALTER — *Sound Radiation from a System of vibrating circular Diaphragms*, Physical Review, juin 1929, pp. 1061-1065.

[31] J.A. YOUNGMARK — *Loudspeaker Baffles and Cabinets*, Journal of the British Institution of Radio Engineers, 13, 2 (février 1953), pp. 89-98.