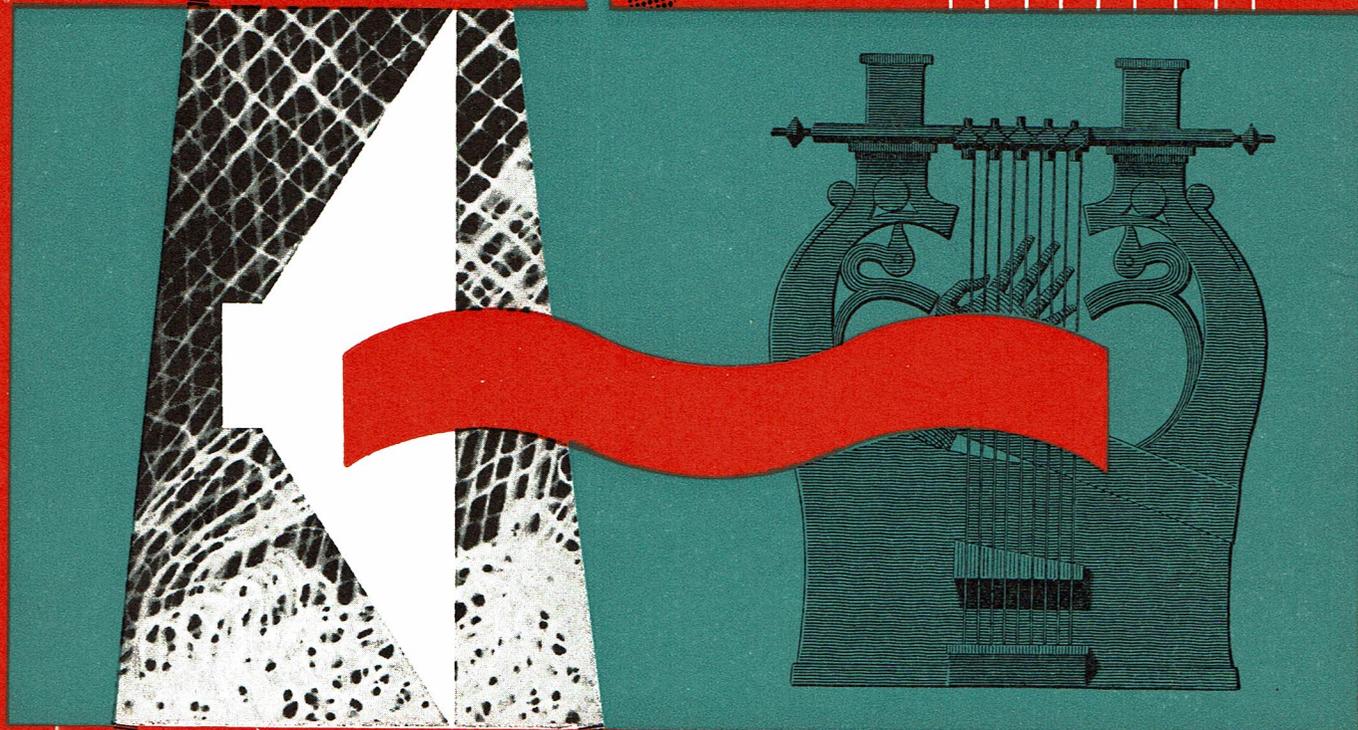


J. Dewèvre
W. Hembise

le haut-parleur électrodynamique à diaphragme et sa charge acoustique

(étude des aspects subjectifs)



J. DEWEVRE, gradué In. Ra. Ci (A1)
Chef de section du Service de Documentation
de la Division Electronique de la s/a M.B.L.E

W. HEMBISE, ing. techn. A.I.T. Br.
Attaché au Service de Documentation
de la Division Electronique de la s/a M.B.L.E

le haut-parleur électrodynamique à diaphragme et sa charge acoustique

(2^e partie)

étude des aspects subjectifs

sonnnaire

Les auteurs examinent d'abord les caractéristiques subjectives des sensations auditives: intensité et hauteur subjectives, timbre, fondamentale résiduelle, sons additionnels et différentiels, presbyacousie, effet de masque.

Ils définissent ensuite les diverses distorsions introduites par une chaîne électro-acoustique, distorsion « linéaire », distorsion « non-linéaire », distorsion de phase, et analysent leur incidence sur la perception d'un message sonore.

Ils introduisent aussi les notions de dynamique et de bande passante utiles.

Ils étudient enfin différentes courbes caractéristiques d'un haut-parleur et signalent quelques procédés permettant d'améliorer sa courbe de réponse.

C.D.U. : 621.395.623.7

Ce matériau spécial qu'est la musique transmise par circuits électriques est important car il faut bien en convenir : le domaine de la retransmission des sons, demain élargi à la Télévision, sera bientôt le seul véhicule de l'émotion musicale ou artistique.

A. Honegger, compositeur,
(préface au « *Traité de prise de Son* » de J. Bernhart, 1949)

Il ne faudrait pas croire que l'on peut aujourd'hui effectuer un projet de haut-parleur comme on effectue un projet d'alternateur et, si l'ingénieur chargé de la fabrication n'est pas bon musicien, il aura bien peu de chances d'aboutir.

Toutefois, la théorie est suffisamment au point pour expliquer l'ensemble des phénomènes observés; elle est, pour le technicien, un guide précieux.

F. Bedeau, physicien,
(introduction à sa « *Théorie du Diffuseur* », 1935)

III. — CARACTERISTIQUES SUBJECTIVES DES SENSATIONS AUDITIVES

III. 1. Fidélité de la reproduction sonore, du point de vue subjectif.

Si l'on se place au point de vue physique, la restitution fidèle d'un message sonore exige la reproduction exacte de toutes les vibrations acoustiques présentes dans le message envisagé.

Cependant, si seul le point de vue subjectif importe, l'expérience montre que cette reproduction intégrale n'est pas indispensable.

Ainsi, par exemple, lors de la transmission de la parole, on peut réduire le spectre des fréquences transmises à la bande de 200 à 3.000 Hz sans nuire sensiblement à la bonne intelligibilité du message.

Lorsque le but de la reproduction est de recréer chez l'auditeur des impressions auditives aussi proches que possible de celles qu'il aurait ressenties lors de la perception directe du message originel, le problème devient plus complexe et les critères permettant de juger de la qualité d'une reproduction doivent être basés sur les caractéristiques subjectives des sensations auditives.

III. 2. Facteurs audiologiques.

III. 2. 1. Qualités classiques d'un son

Un son est produit par les vibrations de corps matériels ; celles-ci sont transmises, par un milieu élastique (air), à l'oreille qui les perçoit grâce aux vibrations de certains de ses organes.

Un ébranlement non périodique provoque ce que l'on appelle un *bruit* tandis qu'une vibration périodique donne naissance à un *son* dit « musical » (*).

Lors de la perception d'une impression auditive, celle-ci est ressentie, par suite de la structure particulière de l'oreille, sous forme de trois impressions partielles qui font attribuer au son perçu les trois qualités fondamentales suivantes : *hauteur*, *intensité* et *timbre*.

Bien que les impressions partielles ne puissent évidemment pas être produites isolément, l'appréciation de chacune des trois qualités fonda-

(*) Toutefois, dans les conceptions musicales actuelles, la discrimination n'est plus aussi nette entre son et bruit.

mentales d'un son est cependant possible grâce à notre faculté d'abstraction mentale.

La *hauteur* (*) d'un son est sa qualité d'être plus ou moins grave ou plus ou moins aigu ; elle dépend uniquement de la période T de la composante fondamentale des vibrations sonores et il est d'usage de la repérer par la fréquence $f = \frac{1}{T}$. Un son est d'autant plus aigu que sa fréquence est plus élevée. L'expérience montre que l'effet musical de deux sons émis successivement (mélodie) ou simultanément (accord) ne dépend que du rapport $\frac{f_2}{f_1}$ de leurs fréquences, que l'on appelle « *intervalle* » des deux sons.

L'intervalle le plus simple est l'intervalle d'octave, égal à 2 : le son $f_2 = 2f_1$ est dit à l'octave aiguë du son f_1 .

On repère les hauteurs des sons musicaux par rapport à une suite de sons plus ou moins arbitraire qu'on appelle la *gamme* ; la gamme naturelle ou gamme de Zarlin (**), comprend dans une octave les notes suivantes, définies par leur intervalle à la première :

ut	ré	mi	fa	sol	la	si	ut
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

Les mêmes intervalles se reproduisent dans les différentes octaves, qu'on distingue par des indices.

Une fois les intervalles de la gamme établis, il suffit, pour définir les hauteurs des différentes notes, de fixer la fréquence de l'une d'elles.

Les fréquences des différents ut sont :

ut_0	ut_1	ut_2	ut_3	ut_4
32 Hz	65 Hz	130 Hz	261 Hz	523 Hz
ut_5	ut_6	ut_7	ut_8	
1.046 Hz	2.093 Hz	4.186 Hz	8.372 Hz	

(*) G. BRUHAT. - *Cours de Mécanique Physique*, Masson et C^{ie}, Paris (1934), pp. 514-516.

(**) La gamme la plus généralement adoptée actuellement par les musiciens est la gamme dite *tempérée* qui diffère de celle de Zarlin par la valeur de ses intervalles. Ces différences sont minimes mais elles sont néanmoins perceptibles pour une oreille exercée.

Pour être perçues, les vibrations musicales doivent avoir des fréquences comprises entre certaines limites, qui dépendent des propriétés physiologiques de l'oreille et varient d'un observateur à l'autre. Des vibrations sinusoïdales de fréquence inférieure à 20 Hz donnent l'impression d'une suite de sons rapprochés mais distincts plutôt que d'un son musical; des vibrations de fréquence atteignant 20.000 Hz ne sont perçues que par un nombre très restreint de personnes.

L'intensité(*) est la qualité d'un son d'être ressenti plus ou moins fort. Si l'on considère une onde sinusoïdale de fréquence donnée, l'intensité du son perçu en un point dépend uniquement de l'amplitude de la vibration des particules d'air en ce point. Il est naturel de prendre, pour la mesure physique de l'intensité, l'énergie transportée par l'onde sonore par unité de temps et par unité de surface. Pour des ondes sonores de forme et de fréquence différentes, on conserve la même définition de l'intensité: énergie transportée.

On mesure cette intensité, appelée *intensité physique* du son, en recevant celui-ci sur une membrane dont on repère l'amplitude de vibration(**). Les mesures d'intensité physique ont permis d'évaluer l'ordre de grandeur de l'amplitude des vibrations de l'air qui correspondent aux sons les plus faibles que l'oreille peut entendre. Pour une fréquence de 100 Hz, par exemple, cette amplitude est d'environ 10^{-7} cm; la variation de pression est approximativement de 0,02 baryes; l'intensité physique reçue est de l'ordre de 10^{-12} watt/cm².

On exprime souvent l'intensité physique ou le niveau physique d'un son (en dB) par rapport à un niveau origine: celui du son qui provoque, sur la même membrane, une variation de pression de 0,0002 barye et qui transporte une énergie de 10^{-16} watt/cm²; on l'appelle alors l'*intensité relative* ou *niveau relatif* de ce son.

L'*intensité physiologique* d'un son peut être considérée comme l'expression de l'appréciation par l'oreille du niveau physique de ce son.

Pour former une suite de référence des intensités physiologiques, on prend, par convention, la suite des impressions d'intensité produites par des sons de fréquence de 1.000 Hz et d'intensité physique croissante.

(*) G. BRUHAT. - *Cours de Mécanique Physique*, Masson et C^{ie}, Paris (1934), pp. 514-516.

(**) Pratiquement, on a recours à un *sonomètre*, comprenant microphone, amplificateur électronique et appareil de mesure étalonné; des corrections normalisées peuvent y être insérées en vue d'une lecture directe de l'intensité physiologique.

Chaque terme de cette suite est repéré en *phones*, le nombre de phones étant pris égal, toujours par convention, au nombre de dB de l'intensité physique correspondante du son de 1.000 Hz.

Pour apprécier l'intensité physiologique d'un son quelconque, on fait agir alternativement sur l'oreille le son à repérer et un son de référence (1.000 Hz) dont on fait varier l'intensité physique jusqu'au moment où les impressions d'intensité des deux sons paraissent les mêmes, l'observateur essayant de faire abstraction de la différence de hauteur et de timbre.

On attribue alors au son à repérer le nombre de phones du son de référence de même intensité physiologique.

La figure 6 donne, pour un observateur moyen, les résultats des mesures d'intensité physiologique (*).

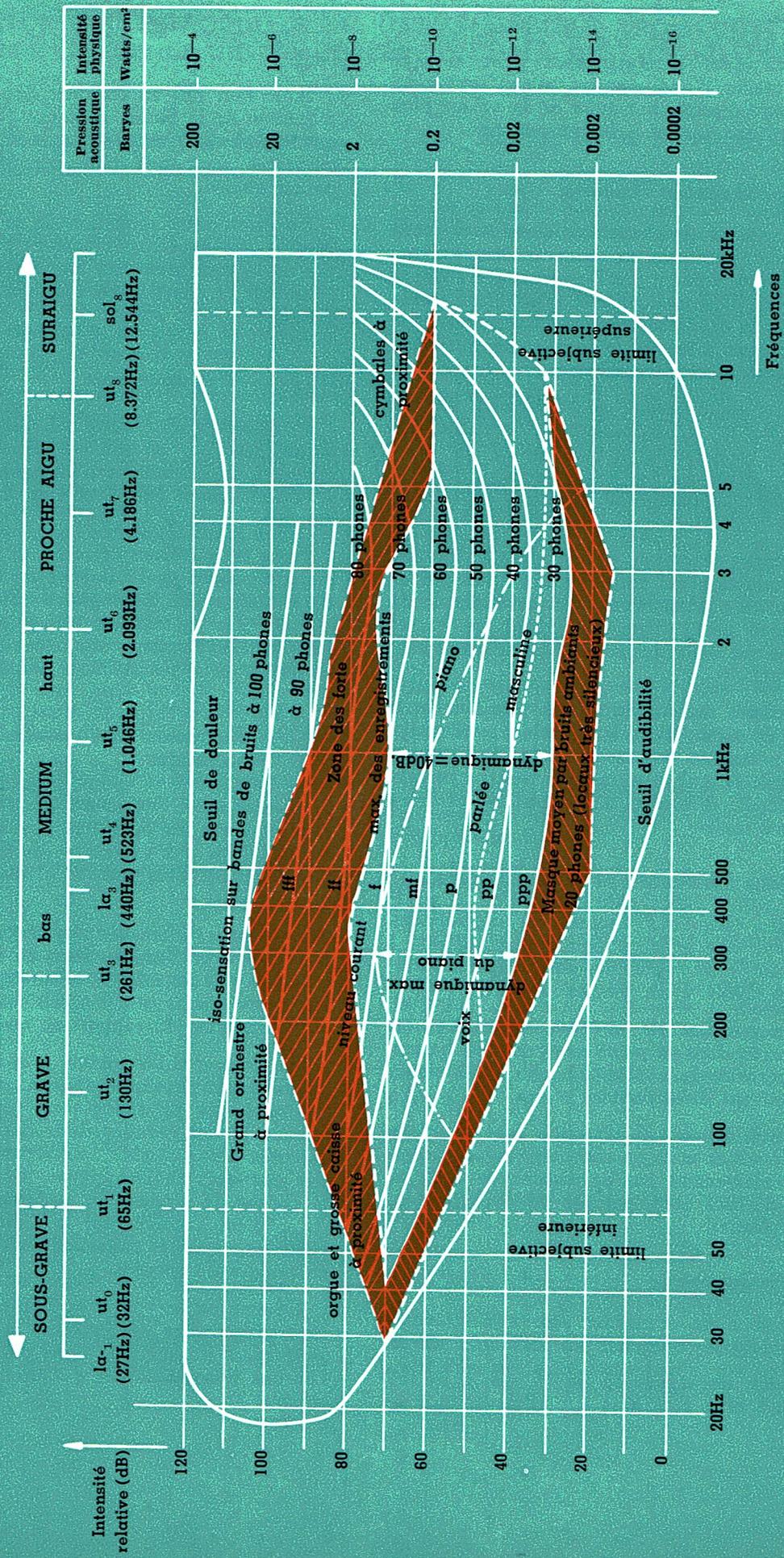
On voit d'après ces audiogrammes que le rapport entre les intensités physiologique et physique dépend essentiellement de la fréquence. Ainsi, un son d'une intensité physique relative de 60 dB crée une intensité physiologique de 50 phones si sa fréquence est de 200 Hz; l'intensité physiologique n'est plus que de 40 phones si sa fréquence est de 100 Hz; elle est seulement de 30 phones pour une fréquence de 65 Hz.

Deux sons de même hauteur et de même intensité nous apparaissent différents lorsqu'ils sont émis par deux instruments différents: on dit qu'ils n'ont pas le même *timbre*. Cela résulte du fait que les deux sons en question, bien qu'ayant la même fréquence fondamentale *f*, diffèrent cependant par leur spectre d'harmoniques (fréquences 2*f*, 3*f*, ...) auquel est liée l'impression du timbre.

III. 2. 2. Hauteur subjective

Lorsque l'intensité physiologique d'un son pur dépasse un niveau d'environ 60 phones, sa hauteur semble varier: elle paraît croître quand elle est supérieure à 2 kHz et diminuer quand elle est inférieure à cette fréquence. Par exemple, un son ayant une fréquence de 100 Hz apparaît de 90 Hz lorsque son niveau physiologique passe de 40 à 100 phones. Ces sensations peuvent être éprouvées par un observateur averti, dans une salle de concert, pour les « forte » d'extrêmes grave et aigu.

(*) Initialement, ces mesures ont été effectuées, sur un grand nombre de personnes, par Kingsbury, Fletcher et Munson, Stevens et Davis, Churcher et King, Robinson et Dadson, qui utilisèrent des sons purs. Plus tard, Pollack (thèse de doctorat à l'Université d'Harvard, en 1948), a eu recours à des bandes de bruits. Ses résultats qui s'écartent légèrement de ceux de ses prédécesseurs sont plus proches de la réalité lorsqu'il s'agit d'apprécier le comportement de l'oreille vis-à-vis des sons complexes de la musique; les courbes de Pollack n'ont toutefois été relevées qu'entre 100 et 4.000 Hz pour des niveaux physiologiques de 40 à 100 phones.



Audiogramme musical
Fig. 6

Aussi paradoxal que cela puisse paraître, la reproduction d'un enregistrement peut susciter cette impression d'une manière moins accentuée qu'une écoute directe, par suite de la valeur plus faible du niveau sonore à la reproduction.

III. 2. 3. Fondamentale résiduelle

Si la composante fondamentale d'une note grave est faible au point de ne pouvoir être perçue, l'auditeur n'a cependant pas l'impression d'absence de cette note. Il entend un *son résiduel* de même hauteur que la fondamentale manquante avec une intensité parfois même plus importante que celle correspondant à cette fondamentale.

Ce son résiduel résulte probablement, d'après Schouten, de la recomposition ou synthèse des harmoniques supérieurs, accompagnant la note, par l'intermédiaire de l'organe sélectif de perception auditive : la membrane basilaire de l'oreille interne.

Il ne faudrait cependant pas conclure à l'inutilité d'une reproduction qui conserve aux notes graves leurs caractères propres et surtout l'impression physiologique particulière que créent les basses réelles mais que des notes résiduelles ne produisent pas (Culver).

Il faut plutôt réserver la mise à profit de cette formation de sons résiduels au seul cas d'exceptionnelles notes très basses souvent déficitaires en fondamentale et, par ailleurs, difficilement perceptibles en écoute directe et à une certaine distance de la source sonore.

III. 2. 4. Sons différentiels et sons additionnels

Dans des conditions encore mal déterminées, l'oreille peut être le siège, lors d'une audition à haut niveau, d'un véritable phénomène d'intermodulation (voir à ce propos IV. 3.2).

Les sons additionnels sont peu détectables car ils sont noyés dans la suite resserrée des harmoniques supérieurs de la note originelle ; néanmoins, ils sont souvent discordants.

Par contre, les sons différentiels sont plus facilement décelables mais on considère qu'ils n'introduisent généralement pas de dissonance et ils ne sont pas d'office incompatibles avec l'esthétique musicale (Jeans).

III. 2. 5. Presbycousie

L'audition n'est conforme aux audiogrammes classiques (fig. 6) que chez les personnes jeunes.

Une chute de sensibilité de 15 dB, à la fréquence de 8 kHz, peut déjà être observée chez un

quadragénaire ; le phénomène s'accroît avec l'âge.

Il ne faut pas en conclure pour autant qu'une réduction de la bande passante (du côté des fréquences élevées) du système de reproduction passe inaperçue pour une personne affectée d'un tel déficit auditif.

En effet, cette réduction de la bande passante modifie, comme nous le verrons plus loin, la qualité de la restitution des signaux transitoires, que l'auditeur en question est toujours en mesure d'apprécier.

III. 2. 6. Effet de masque

En présence d'un autre son, l'intensité physiologique créée par un son est réduite pour certains rapports de hauteur et d'intensité physique entre le son *masquant* (qui peut être un bruit) et le son *masqué*.

Nous retrouverons cet effet de masque, dans la suite, à propos de l'influence du bruit d'ambiance d'un auditorium, responsable d'une sérieuse réduction des possibilités théoriques d'écoute ; il entraîne, notamment, une élévation de la limite inférieure du « pianissimo » perceptible.

III. 2. 7. Perception des extrémités du spectre acoustique

Comme nous l'avons vu plus haut (fig. 6), le rapport entre les intensités physiologique et physique décroît aux extrémités du spectre sonore, et cela d'autant plus que le niveau acoustique est plus faible.

Lorsque les intensités physiques des divers sons à l'endroit de l'oreille, lors de la restitution du message, ont les mêmes valeurs que celles perçues en écoute directe, il n'y a pas lieu de tenir compte de la variation du rapport en question.

Par contre, si l'on réduit, à la restitution, toutes les intensités physiques dans une même proportion, les intensités physiologiques (aux diverses fréquences) sont réduites dans des proportions différentes. Pour rétablir une répartition convenable des intensités physiologiques, il faut alors agir sur la courbe de réponse du système de reproduction de manière à compenser la réduction du rapport entre les intensités physiologiques et physiques aux extrémités du spectre.

Comme on le voit à la figure 6, la correction doit surtout être opérée dans la zone des basses fréquences du spectre ; dans celle des aiguës, les courbes d'iso-sensation s'écartent peu du parallélisme.

IV. — DISTORSIONS INTRODUITES PAR UNE CHAÎNE ELECTRO-ACOUSTIQUE ET LEUR INCIDENCE SUR LA PERCEPTION D'UN MESSAGE SONORE

IV. 1. Courbe de réponse amplitude-fréquence d'un quadripôle.

La courbe de réponse amplitude-fréquence d'un élément de la chaîne électro-acoustique ou d'un ensemble d'éléments de cette chaîne (quadripôle) est la courbe donnant, en fonction de la fréquence, le rapport de l'amplitude du signal de sortie à l'amplitude constante du signal d'entrée.

Bien souvent, pour représenter cette courbe de réponse (électrique, acoustique ou électro-acoustique), on utilise le rapport entre l'amplitude du signal de sortie et celle correspondant à une fréquence déterminée (signal de sortie de référence). Ce rapport est généralement exprimé en dB, le niveau relatif à la fréquence de référence étant de 0 dB.

On voit, d'après la définition de la courbe de réponse de la chaîne électro-acoustique, que si l'on considère le cas où les niveaux sonores du message à l'émission et à la réception sont les mêmes, il faut, pour assurer une reproduction fidèle, que cette courbe se présente dans l'intervalle utile de fréquences, sous forme d'une horizontale à 0 dB, et cela pour toute valeur constante de l'amplitude du signal d'entrée, inférieure à sa valeur maximum lors de l'utilisation normale.

C'est la courbe de réponse idéale pour le cas envisagé (égalité des niveaux sonores à l'émission et à la réception).

Nous verrons plus loin qu'à elle seule, cette courbe amplitude-fréquence ne suffit pas à assurer la fidélité de la reproduction et que d'autres conditions doivent être remplies.

IV. 2. Distorsion de fréquence (dite "distorsion linéaire").

Cette distorsion est relative à la courbe de réponse d'un quadripôle, relevée pour une amplitude du signal d'entrée suffisamment faible pour que l'on puisse négliger les effets de phénomènes non-linéaires dont le quadripôle peut être le siège.

En examinant une telle courbe de réponse, on constate qu'en pratique, elle s'écarte d'une horizontale à 0 dB. Ces écarts constituent la *distorsion de fréquence*.

Son incidence sur la perception du message sonore se manifeste par une rupture de l'équilibre des divers sons fondamentaux et par une déformation du timbre d'un son originel complexe, résultant d'une amplification inégale de ses divers harmoniques.

Nous examinerons plus en détail, dans le chapitre VI, la distorsion de fréquence d'un haut-parleur.

Remarque : La distorsion linéaire d'une courbe de réponse conduit à la notion de la *bande passante* d'un quadripôle. C'est l'intervalle de fréquences dans lequel les écarts du niveau relatif à la sortie n'excèdent pas (en valeur absolue) une valeur imposée à l'avance. On dira, par exemple, que la bande passante à ± 3 dB d'un quadripôle s'étend de 50 à 10.000 Hz.

IV. 3. Distorsion d'amplitude (dite "distorsion non-linéaire").

Cette distorsion apparaît lorsque l'amplitude du signal d'entrée atteint une valeur pour laquelle le quadripôle envisagé ne peut plus être considéré comme un élément linéaire.

La *distorsion d'amplitude* revêt les deux formes suivantes : *distorsion harmonique* et *distorsion d'intermodulation*.

IV. 3. 1. Distorsion harmonique

Lorsqu'on fait croître l'amplitude d'un signal sinusoïdal appliqué à l'entrée d'un quadripôle non-linéaire, on constate que, d'une part, l'amplitude du signal de sortie (composante fondamentale) ne reste pas proportionnelle à celle du signal d'entrée, et que, d'autre part, il apparaît dans le signal de sortie des composantes harmoniques de la fréquence du signal d'entrée.

On dit que le quadripôle introduit une *distorsion harmonique*.

Elle est généralement exprimée par son taux δ_h donné par :

$$\delta_h (\text{en } \%) = 100 \frac{\sqrt{(A_2)^2 + (A_3)^2 + (A_4)^2 + \dots}}{\sqrt{(A_1)^2 + (A_2)^2 + (A_3)^2 + \dots}}$$

où $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots$ sont respectivement les amplitudes de la fondamentale et des harmoniques constituant le signal de sortie.

Si ce taux s'avère inférieur à 10 %, il peut s'exprimer par :

$$\delta_n (\text{en } \%) = 100 \frac{\sqrt{(A_2)^2 + (A_3)^2 + (A_4)^2 + \dots}}{A_1}$$

Il est bien entendu que, pour une fréquence donnée, le taux de distorsion harmonique croît avec l'amplitude du signal d'entrée (et par conséquent avec celle du signal de sortie).

Du point de vue de la perception auditive, la distorsion harmonique transforme un son originel pur en un son complexe.

IV. 3. 2. Distorsion d'intermodulation

L'application à l'entrée d'un quadripôle non-linéaire de deux signaux sinusoïdaux d'amplitude croissante fait apparaître dans le signal de sortie, en plus des composantes harmoniques des deux fréquences d'entrée, des composantes anharmoniques de fréquences

$$mf_1 + nf_2$$

m et n étant des nombres entiers positifs ou négatifs (non nuls).

La présence de ces dernières composantes dans le signal de sortie caractérise la *distorsion d'intermodulation*.

On l'exprime généralement par son taux δ_i donné par :

$$\delta_i (\text{en } \%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{m,n} (A_{mf_1 + nf_2})^2}}{\sqrt{(A_{f_1})^2 + (A_{f_2})^2}}$$

où A représente l'amplitude de la composante dont la fréquence est indiquée par l'indice qui accompagne A .

Ici également, le taux δ_i croît avec l'amplitude des signaux d'entrée.

La distorsion d'intermodulation a pour effet d'altérer le timbre des sons originels complexes et d'introduire des partiels anharmoniques.

Remarques :

1. Lorsque le quadripôle est constitué par un haut-parleur, le phénomène d'intermodulation dont celui-ci est le siège, est difficilement contrôlable car le diaphragme, dans la plus grande partie de sa zone de fonctionnement, est affecté de vibrations partielles. Aussi prend-on surtout des mesures préventives en vue d'éviter le plus possible l'intermodulation entre un son grave et un son aigu ; on confie à cette fin, la reproduction des parties extrêmes du spectre acoustique à

des radiateurs différents, soit deux haut-parleurs distincts, soit un haut-parleur à deux cônes, solution qui sera envisagée plus loin.

2. Une autre forme d'intermodulation peut théoriquement affecter le haut-parleur ; elle est due à l'*effet Döppler*. De grandes amplitudes de déplacement du cône sont indispensables à l'obtention, dans le registre grave, d'une intensité physique suffisante. Il peut se faire, si le haut-parleur doit restituer en même temps des notes élevées, que celles-ci soient modulées en fréquence par les importantes vibrations à basse fréquence.

Le diaphragme peut, en effet, être assimilé à un générateur à fréquence fixe élevée qui se déplace, par rapport à l'oreille immobile située dans l'axe du haut-parleur, au rythme de la fréquence basse modulante (modulation de fréquence).

Le spectre de l'onde résultante comprend, en plus de la porteuse, des bandes latérales qui introduisent, dans la direction de l'axe, un certain taux de distorsion (celui-ci s'exprime par la racine carrée du rapport de la puissance contenue dans les bandes latérales à la puissance totale rayonnée).

Beers et Belar, qui ont étudié cette question, estiment qu'en pratique ce type de distorsion n'est perceptible que lorsque son taux est de 2 à 3 % ; il est peu probable que la bobine mobile soit jamais animée d'une vitesse de déplacement telle que ce taux soit atteint. On peut ajouter que, de toute façon, ce genre de distorsion est difficile à discerner parmi les autres distorsions qui se manifestent dans une reproduction musicale.

Il existe d'ailleurs des moyens capables de l'éviter d'office, à savoir :

- réduire l'importance des déplacements du cône ; ces déplacements n'étant vraiment grands qu'au voisinage de la résonance du haut-parleur, il suffit de prévoir un amortissement suffisant ; en règle générale, si une excursion correspondant à l'émission de 1 watt acoustique n'est pas dépassée, l'effet Döppler n'est pas à craindre ;
- utiliser des haut-parleurs distincts pour les registres grave et aigu ;
- diriger le haut-parleur unique vers le haut, étant donné que dans le plan de base du cône, l'effet Döppler est nul.

IV. 3. 3. Variations de tolérance dans la perception des distorsions non-linéaires

En se plaçant au point de vue de la perception physiologique de ces distorsions, on constate qu'elle dépend de nombreux facteurs qu'il faut

donc ajouter aux critères audiolologiques rappelés précédemment. C'est ainsi que :

- ces distorsions sont moins sensibles si elles sont de courte durée ;
- il est plus difficile d'identifier une déformation d'un son complexe que celle d'un son pur ;
- pour un signal sinusoïdal de fréquence supérieure à 200 Hz, l'oreille perçoit une harmonique 2 dès que le taux de celle-ci atteint 1 % ; en dessous de cette fréquence un taux beaucoup plus important est admissible, notamment si le niveau sonore est supérieur à 40-50 phons ; il peut être d'un ordre de grandeur de 10 % sans que la déformation qui en résulte ne devienne perceptible ;
- plus la bande passante est large, plus les déformations sont décelables ; Olson trouve expérimentalement un seuil juste perceptible de 0,75 % pour un système de haute qualité (45-15.000 Hz à ± 2 dB) contre 1,25 % quand on insère, dans ce système, un filtre passe-bas à fréquence de coupure de 4 kHz ;
- il est certain que, pour un son de fréquence fondamentale donnée, la gêne due aux harmoniques résultant de la distorsion augmente avec le rang de ces harmoniques ;
- un type de distorsion peut en masquer un autre : ainsi, une notable distorsion harmonique peut rendre moins perceptible une mauvaise reproduction des phénomènes transitoires ;
- on ne peut guère parler d'harmoniques de sons de fréquences supérieures à 8 kHz où la forme d'onde devient indifférente : en observant à l'oscilloscope un signal sinusoïdal que l'on déforme, on s'aperçoit, en effet, que l'impression auditive ne varie pas quelle que soit la forme d'onde que l'on produit.

IV. 4. Distorsion de phase.

Si l'on applique à l'entrée d'un quadripôle linéaire, un signal sinusoïdal $Ue^{j2\pi ft}$, le signal de sortie est de la forme :

$$e^{A(f) + j\theta(f)} Ue^{j2\pi ft}$$

où $A(f)$ caractérise la réponse amplitude-fréquence du quadripôle.

et $\theta(f)$ donne la courbe de déphasage.

D'une manière générale, la fonction $\theta(f)$ peut s'écrire :

$$\theta(f) = K(f) + \Phi(f) \pm n\pi$$

Dans cette relation, K est une constante et $\Phi(f)$ une fonction non-linéaire de la fréquence.

Si l'on admet que l'on a :

$$A(f) = C^{te}$$

$$\Phi(f) = 0$$

on peut montrer que quel que soit le signal appliqué à l'entrée d'un tel quadripôle, sa forme se retrouve exactement dans le signal de sortie ; les deux signaux sont simplement décalés dans le temps.

Si, par contre,

$$A(f) = C^{te}$$

mais

$$\Phi(f) \neq 0$$

la forme du signal est altérée. $\Phi(f)$ représente ce qu'on appelle la *distorsion de phase*.

Au lieu de $\Phi(f)$, il est plus intéressant de considérer la dérivée $\frac{d\theta(f)}{df}$. La courbe correspondant à cette dérivée donne, en fonction de la fréquence, la pente de la courbe de déphasage. Cette pente est appelée communément *retard d'enveloppe*. En l'absence de distorsion de phase, le retard d'enveloppe est constant.

Plusieurs raisons ont conduit à la considération du retard d'enveloppe :

- il est apparu que l'oreille est plus sensible à la distorsion par retard d'enveloppe $\frac{d\theta}{df}$ qu'à la distorsion de phase proprement dite $\Phi(f)$;
- il est difficile d'évaluer la distorsion de phase dans un système électro-acoustique ; on ne peut pas perdre de vue le déphasage inhérent à la propagation dans l'air, beaucoup plus important que celui provoqué par le haut-parleur. Comme d'autre part, le déphasage dû à la propagation dans l'air est parfaitement linéaire en fonction de la fréquence, il n'introduit, lors d'une mesure directe de la pente de la courbe du déphasage (retard d'enveloppe), en fonction de la fréquence, qu'un terme additif constant.

IV. 4. 1. Trainage ou distorsion de transitoires — Rôle de la bande passante

Nous venons de voir que pour éviter l'altération de la forme du signal d'entrée, il faut avoir

$$A(f) = C^{te}$$

$$\frac{d\theta}{df} = C^{te}$$

Il est évident que ces conditions ne peuvent être satisfaites en pratique pour toutes les fréquences.

Il en résulte une déformation plus ou moins grande des signaux, déformation dont l'effet subjectif est particulièrement important lorsqu'il s'agit de signaux transitoires. On parle, dans ce cas, de la *distorsion des transitoires* ou « *trainage* » : la reproduction est floue et manque de naturel.

L'expérience montre, en ce qui concerne la condition $A(f) = C^{1e}$, que pour assurer une reproduction acceptable d'un signal transitoire de durée τ , il suffit que la bande passante du transducteur s'étende jusqu'à une fréquence d'environ $\frac{5}{\tau}$. Cela revient à admettre que les composantes

de fréquence supérieure à $\frac{5}{\tau}$, présentes dans le signal transitoire, ne contribuent que faiblement à l'impression auditive produite par ce signal.

Les durées des transitoires provenant des sources sonores habituelles sont très différentes.

Dans l'information parlée, les transitoires résultent surtout de la prononciation des voyelles ; ils sont brefs, leur durée étant de l'ordre de 5 ms. A quelques exceptions près, les transitoires provenant d'instruments de musique ont des durées de 10 ms et même plus. Dans ces deux cas, le respect, dans la reproduction, de l'allure des transitoires est beaucoup plus important, pour la sauvegarde du timbre, que celui du contenu en harmoniques.

Les transitoires les plus courts dont nous ayons mesuré la durée sont ceux dus à l'exécution de notes de xylophone ; la durée de ces transitoires est très voisine de 1 ms.

On peut donc considérer, en étant très sévère, que 0,5 ms constitue la durée minimum des transitoires que l'on doit envisager en reproduction sonore (c'est d'ailleurs la durée du transitoire correspondant à un coup de canon).

Avec cette durée minimum de 0,5 ms, la bande passante du transducteur doit s'étendre jusqu'aux environs de $\frac{5}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 10.000$ Hz.

IV. 4. 2. **Corrélation entre la courbe de réponse amplitude-fréquence et la courbe retard d'enveloppe - fréquence — Conclusions pratiques**

D'après Hentsch, quand on observe les effets subjectifs correspondant aux irrégularités de la courbe amplitude-fréquence, on étudie par le fait même l'influence de la distorsion de phase qui est toujours présente.

La considération de cette courbe doit donc suffire pour connaître la qualité de la reproduction en régime transitoire (l'observation à l'oscilloscope des déformations subies par les signaux transitoires n'est pas un moyen sûr pour déterminer l'effet subjectif de ces déformations).

L'examen comparatif des courbes de retard d'enveloppe et des courbes de réponse amplitude-fréquence, effectué par Mawardi (fig. 7) a conduit ce dernier à des conclusions en parfait accord avec les affirmations de Hentsch : l'expérience montre qu'à toute irrégularité de la courbe de réponse amplitude-fréquence correspond une irrégularité de la courbe retard d'enveloppe-fréquence.

On peut donc conclure que l'allure et l'étendue de la courbe de réponse acoustique classique d'un haut-parleur donnent des indications permettant de connaître la manière dont ce dernier reproduit les transitoires qui lui sont appliqués.

Si l'allure de la courbe de réponse est parfaitement régulière, la réponse aux transitoires est correcte.

Il importe toutefois d'insister sur les quelques particularités suivantes :

— S'il est relativement facile d'obtenir une courbe de réponse horizontale pour une bande de fréquences donnée, il est très malaisé d'éviter, dans les registres extrêmes, une chute rapide de cette courbe.

Ainsi, par exemple, on peut voir, à la figure 7, que les déficiences d'un ensemble haut-parleur-enceinte, dans l'extrême grave, entraînent, à cet endroit du spectre acoustique, une chute de réponse d'au moins 12 dB par octave.

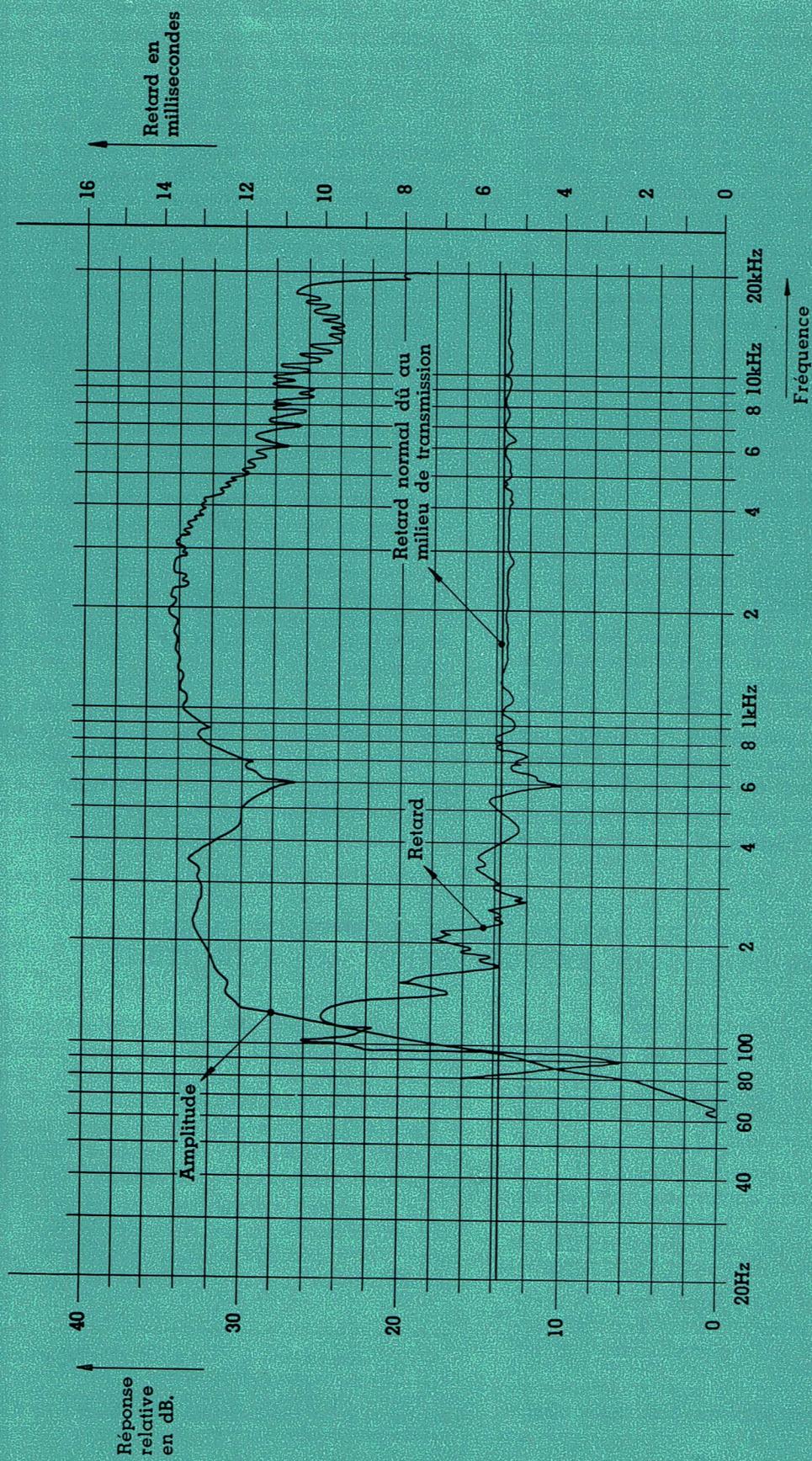
L'incidence de cette brutale atténuation se traduit dans la courbe du retard d'enveloppe par des écarts de l'ordre de plusieurs millisecondes par rapport à la valeur moyenne de ce retard d'enveloppe (mauvaise reproduction des transitoires).

Le seul remède possible à cet état de choses consiste à soigner l'amortissement total du système. On peut, de cette manière, diminuer la pente de la courbe de réponse au voisinage de la résonance fondamentale.

— Dans la partie haut médium-proche aigu du spectre acoustique, les écarts de trainage sont uniquement liés aux irrégularités de la courbe de réponse. On a donc intérêt à choisir un transducteur qui garde une réponse aussi régulière que possible.

Dans cette région du spectre, comme dans les autres, un amortissement optimum associé à une absorption poussée, à l'intérieur de l'enceinte, assurent un bon fonctionnement du transducteur ; une absorption interne énergétique empêche, en effet, la formation d'ondes stationnaires dans l'enceinte ; on évite ainsi le renforcement des vibrations partielles du diaphragme, qui se manifestent par des irrégularités de la courbe de réponse.

— Dans l'extrême aigu, il faut également veiller à ce que la pente de la courbe de réponse du haut-parleur ne soit pas trop forte, et cela



Comparaison entre une courbe de retard d'enveloppe et la courbe de réponse amplitude-fréquence correspondante (Mawardi)

Fig. 7

d'autant plus que celle du microphone de prise de son risque d'accentuer la chute de la courbe de réponse globale.

(Remarquons à ce propos que dans l'extrême aigu, le comportement d'un haut-parleur peut parfois être meilleur que ne l'indique sa courbe de réponse relevée au moyen d'un microphone de mesure, en raison de la déficience que peut présenter ce dernier).

De toute façon, dans cette partie du spectre, la chute de la courbe de réponse doit se produire pour une fréquence suffisamment élevée et avoir une pente suffisamment faible pour ne pas compromettre les possibilités audiologiques.

IV. 4. 3. Essais en régime transitoire

Le haut-parleur électrodynamique est un ensemble complexe dont seule une théorie mathématique élémentaire peut être établie.

D'autre part, il n'existe pratiquement pas de critère physique permettant de prévoir la manière dont seront perçus subjectivement, à la reproduction, les signaux transitoires.

Aussi procède-t-on à certains essais réels dont la plupart sont basés sur la méthode comparative, l'oreille, avec ses limitations propres, devant logiquement être juge final.

— On utilise des enregistrements caractéristiques bien connus de l'auditeur, contenant des exemples musicaux riches en complexités sonores.

L'auditeur compare, dans la même ambiance acoustique, le comportement du transducteur

étudié à celui d'un ensemble haut-parleur-enceinte de référence, un commutateur permettant de substituer un transducteur à l'autre.

— On compare également la musique vivante à la reproduction qu'en donne le transducteur considéré. Mais ce sont là des essais seulement réalisables dans les studios de stations de radio-diffusion ou d'éditeurs de disques. Dans un local d'écoute habituel et même en laboratoire, ce genre d'essai n'est possible que pour la parole reproduite par l'intermédiaire d'un bon microphone ; la voix masculine est particulièrement indiquée pour apprécier le comportement du transducteur, surtout en ce qui concerne l'absence de « coloration » dans la zone très critique à ce point de vue, de 100 à 200 Hz.

— Les bruits ainsi que les sons émis par les instruments à percussion de l'orchestre sont par excellence des éléments d'essais réels de fidélité globale. Ils constituent un très bon moyen de jugement car l'impression auditive qu'ils produisent est mieux mémorisée par l'oreille (bruit de verre brisé) que, par exemple, la différence des impressions du timbre de deux instruments tels que le hautbois et le cor anglais, dont on se servirait pour juger de la fidélité de reproduction.

Selon certains auteurs (8), (30), le comportement d'un haut-parleur en régime transitoire peut être analysé par une méthode « objective » ; elle consiste à recourir à des signaux en forme de trains d'ondes sinusoidales ; toutefois, cette méthode exige un important équipement de laboratoire.

V. — DETERMINATION, SUR LES BASES MUSICALES, D'UNE DYNAMIQUE ET D'UNE BANDE PASSANTE UTILES

V. 1. Dynamique.

Le terme *dynamique* est utilisé pour exprimer l'écart qui se manifeste, dans le temps, entre les intensités relatives maximum et minimum d'une émission sonore.

Ainsi, la *dynamique orchestrale*, en écoute directe, s'exprime par :

$$\text{Dynamique (en dB)} = 20 \log \frac{\text{pression (fff)}}{\text{pression (ppp)}}$$

où pression (fff) et pression (ppp) sont les pressions, mesurées au sonomètre, au moment des passages « fortississimo » et « pianississimo » d'une exécution musicale.

En fait, la dynamique exprime donc les « nuances » de celle-ci.

Remarque. — Dans les variations du niveau sonore, on distingue celles qui sont relativement lentes (> 0,1 sec) par opposition aux variations brusques qui constituent des transitoires.

La dynamique est physiologiquement limitée par les seuils d'audibilité ($2 \cdot 10^{-4}$ barye à 1.000 Hz) et de douleur (200 baryes) de l'oreille.

En l'absence de toute perturbation extérieure, la *dynamique maximum* est donc de 120 dB ; elle est largement supérieure à la dynamique orchestrale qui ne dépasse que très rarement 60 dB (*).

(*) J. Bernhart, qui a effectué de nombreuses mesures à la R.T.F., a constaté, qu'en studio et à l'emplacement du microphone de prise de son, la dynamique naturelle, pour une œuvre aussi contrastée que le « Bolero » de Ravel, ne dépasse pas 52 dB.

Du point de vue pratique, la dynamique orchestrale originelle ne peut pas être reproduite lors de la restitution du message sonore. Cette dynamique se trouve réduite, pour les raisons suivantes, à ce qu'on appelle la *dynamique utilisable* :

1° Effet de masque, dû aux bruits dans le local d'écoute, entraînant l'élévation du niveau sonore inférieur perceptible du message au-dessus du seuil d'audibilité. De nombreuses mesures statistiques, de Hoth notamment, ont permis de déterminer, dans diverses conditions d'écoute, ce seuil utilisable en fonction de la fréquence.

On voit sur la figure 6 que sa valeur moyenne suit sensiblement la courbe de 30 phones. On n'atteindrait un seuil utilisable plus faible, correspondant à la limite inférieure de la partie hachurée du diagramme que dans des cas extrêmes : local très silencieux et peu peuplé.

2° Effet des bruits engendrés dans la chaîne électro-acoustique qui s'ajoutent aux bruits ambiants.

Soulignons à ce propos le rôle joué par la bande passante du système de reproduction. Si l'élargissement de cette bande est favorable à une fidèle restitution du message sonore, il risque par contre, comme on le constate en pratique, de détériorer le rapport signal-bruit. Il en résulte que le choix de la largeur de bande doit faire l'objet d'un compromis. Il faut remarquer ici qu'il est inutile de rechercher un degré de fidélité en disproportion avec la qualité actuelle des messages enregistrés ou diffusés.

3° Abaissement du niveau sonore supérieur imposé par le volume réduit du local d'écoute. Lors des « forte » de grand orchestre, l'intensité physique à faible distance, peut atteindre 100 dB (rars passages de quelques œuvres où interviennent des instruments tels que orgue, grosse caisse, cymbales émettant leur puissance maximum).

On ne peut évidemment pas recréer dans le local habituel d'écoute, sous peine d'atteindre le seuil de douleur de l'oreille, la puissance acoustique intégrale d'un grand orchestre. D'ailleurs, la sensation auditive est équivalente si, dans le local d'écoute habituel, on crée une intensité physique identique à celle qui règne à une certaine distance des exécutants, dans la salle de concert. Quelques instrumentistes ne donnent-ils pas, dans un petit auditorium, la sensation d'un même niveau sonore qu'une importante formation dans une grande salle ?

Un niveau moyen de 50 phones (correspondant à un piano « p » d'orchestre) avec des crêtes de 70 phones (dans les forte « f ») et un seuil « ppp » à 30 phones sont considérés

comme optima dans des locaux non spécialement aménagés. Les écarts permis procurent de la sorte une dynamique de 40 dB. Or, cette valeur mesure la dynamique extrême du piano (fig. 6) dont les caractéristiques musicales sont le mieux appropriées aux petits locaux d'écoute.

Le piano montre, en effet, que l'on peut atteindre, en musique enregistrée, un respect total des nuances d'un instrument en solo ou d'une petite formation.

On peut donc conclure que c'est aux pointes de puissance du piano que doivent être ramenées, dans les locaux privés, celles de toute reproduction.

C'est d'ailleurs en vue d'une écoute à pareil niveau que sont conduites les prises de son des disques phonographiques.

Conclusion. — Pour obtenir une bonne reproduction, il faut évidemment utiliser un transducteur dont la *puissance admissible* permet de produire les niveaux sonores voulus, la puissance admissible étant la puissance maximum du signal d'entrée que le transducteur peut accepter sans qu'il en résulte une distorsion non-linéaire gênante.

V. 2. Bande passante.

V. 2. 1. Registre grave

L'examen du diagramme de la figure 6 montre qu'il est inutile de reproduire la fondamentale de sons tels que le la_1 (27 Hz) du piano, par exemple, et, a fortiori, l' ut_1 (16 Hz) de certaines grandes orgues, et, en général, de l'octave fondamentale des instruments les plus graves : contrebasson, harpe, tuba, contrebasse à cordes. Cette dernière intervenant assez fréquemment dans un grand nombre d'œuvres à reproduire, peut judicieusement servir de base pour fixer la fréquence la plus basse que le transducteur doit nécessairement reproduire. Pour cet instrument, la fréquence-limite, établie par Snow, suffisante pour que 80 % des auditeurs ne perçoivent aucune différence avec l'exécution originelle, est de 65 Hz (fig. 6); encore faut-il que la note, ayant cette hauteur, soit émise avec une intensité physique relative minimum de 60 dB. L'information musicale est donc conservée, dans le registre grave, si l'on fixe la limite inférieure de la reproduction aux environs de 60 Hz. Cette limite peut être considérée comme parfaitement logique; en effet, 95 % des partitions ne contiennent pas d'informations utiles de fréquences plus basses. C'est là que doit, par conséquent, se situer, au plus haut, la fréquence de résonance de l'ensemble haut-parleur - enceinte acoustique.

V. 2. 2. Registre aigu

Depuis les expériences fondamentales de Snow (1931), de multiples essais subjectifs, dont certains sont assez récents (*), ont été réalisés dans cette région du spectre acoustique; ils permettent de dire que :

- parmi de nombreux auditeurs d'une reproduction sonore, seules quelques personnes, pourvues d'un sens auditif particulièrement exercé, s'aperçoivent d'une soudaine suppression des sons de fréquences supérieures à 12 kHz ;
- beaucoup d'auditeurs perçoivent l'effet d'une coupure raide à 10 kHz ;
- tout auditeur est sensible à l'élimination des sons de fréquences supérieures à 7 kHz.

Ces résultats confirment le bien-fondé du choix, aux environs de 12 kHz, de la limite musicale subjective supérieure.

Cette limite est universellement admise parce que tout bon haut-parleur peut aujourd'hui la reproduire et qu'elle laisse intact l'ensemble des harmoniques proches constituant les zones formantes nécessaires à la conservation du timbre des sons et créant la « définition » instrumentale en audition directe.

Les bruits associés, qui accompagnent les sons émis et qui contribuent également à l'identification des instruments, demeurent quasi intacts.

Enfin, comme nous l'avons vu précédemment, cette limite est suffisante pour la reproduction correcte des transitoires musicaux.

V. 2. 3. Valeur d'information des différentes régions du spectre acoustique

A. Moles a analysé, avec le concours de différents genres d'auditeurs auxquels divers programmes musicaux étaient offerts, la valeur de l'information apportée par chacune des 29 bandes de fréquences en lesquelles il avait partagé le spectre acoustique, au moyen de filtres de tiers d'octave, à gain variable.

Il résulte de ces expériences que :

- l'essentiel de l'information sémantique, c'est-à-dire celle qui permet d'identifier un morceau de musique et qui satisfait aux conditions d'intelligibilité de la parole est contenu dans une gamme de fréquences s'étendant de 500 à 5.000 Hz, avec une chute raide en deçà et au delà de ces limites ;

(*) parmi lesquels se rangent les essais (sur lesquels nous nous basons) réalisés en 1955 (résultats publiés en 1959) par le « B.B.C. Research Department » sur deux groupes d'auditeurs : d'une part, des techniciens avertis et, d'autre part, des personnes inexpérimentées.

— les registres les plus importants dans l'apport d'une *information esthétique* se répartissent comme suit :

- a) du seuil inférieur aux environs du la_3 normalisé (440 Hz) ou registre grave ; c'est là qu'est concentrée la puissance instrumentale maximum; cette bande de fréquences procure de l'ampleur à la reproduction ;
- b) de 1.500 à 7.000 Hz, donc du haut médium au proche aigu ; cette bande de fréquences contient la plupart des zones formantes ; elle assure le timbre des sons musicaux et suscite l'impression de présence ;
- c) entre ces deux bandes de fréquences, s'installe un creux qui est d'ailleurs la région de sensibilité maximum de l'oreille; au-dessus de la fréquence de 7.000 Hz, la valeur de l'information diminue progressivement. Le respect de ce spectre n'est donc impératif que pour assurer au mieux le passage des transitoires.

V. 2. 4. Conclusion

Il importe donc, pour obtenir une reproduction fidèle, que la courbe de réponse en fréquence du haut-parleur s'étende de 60 à 12.000 Hz. Mais, une parfaite linéarité n'est indispensable que dans la zone des fondamentales et formantes essentielles (de 100 Hz à 4 kHz, selon la règle empirique d'équilibre acoustique, dite des « 400.000 ») à la condition expresse de ne tolérer, de part et d'autre de ces limites, en vue du respect de la réponse impulsionnelle, qu'une pente d'atténuation très faible (au maximum de 6 dB/octave).

Remarque. — Lorsque la courbe de réponse d'un haut-parleur s'écarte de cette allure optimum, on peut corriger ce défaut en agissant sur la courbe de réponse de l'amplificateur. Cette correction est souvent nécessaire dans le registre grave. En effet :

- en raison de son principe de fonctionnement, tout haut-parleur, même s'il est monté sur un écran ou dans une enceinte de dimensions adéquates, est mauvais reproducteur des sons les plus graves ;
- la plupart des supports de modulation sont, pour des raisons technologiques, volontairement déficients à cette extrémité du spectre ;
- lorsque la fréquence diminue, la sensibilité de l'oreille se trouve progressivement réduite, pour un niveau de masque constant (voir fig. 6). Dans ces conditions, la correction apportée à l'amplificateur permet à la fois de « sortir » du bruit de fond les signaux les plus faibles et d'augmenter l'intensité physique relative des « forte » dans un registre esthétiquement très important.

VI. — COURBES CARACTERISTIQUES D'UN HAUT-PARLEUR — MODES DE REALISATION PERMETTANT D'AMELIORER SA REPONSE

VI. 1. Courbe de réponse acoustique.

C'est la courbe représentative (fig. 8), en fonction de la fréquence, de la variation de pression créée, en un point donné, par une onde sonore issue du système mobile du haut-parleur ; elle est établie dans les conditions suivantes :

- en champ libre (chambre sourde ou plein air),
- sans écran ou enceinte,
- dans l'axe du haut-parleur,
- à courant d'excitation sinusoïdal, d'amplitude constante et de faible intensité.

Il s'agit donc d'une courbe de réponse acoustique *théorique* qui ne traduit pas le fonctionnement du haut-parleur dans ses conditions habituelles d'emploi, c'est-à-dire quand il est chargé, placé dans un local d'écoute ordinaire et attaqué par des signaux musicaux complexes.

Mais, il est évident que l'on ne peut pas relever la courbe de réponse acoustique du haut-parleur pour chaque cas particulier d'utilisation ; de plus, même si l'on relevait une courbe de réponse pour un haut-parleur placé dans un local donné, cette courbe fournirait plus d'informations sur les accidents dus aux résonances propres du local d'écoute que sur ceux dont le diaphragme est responsable.

Néanmoins, la courbe de réponse acoustique *théorique* fournit des renseignements très intéressants :

- elle permet de comparer les comportements de plusieurs haut-parleurs placés dans des conditions identiques de mesure ;
- elle constitue une base d'appréciation de la réponse impulsionnelle du haut-parleur et des distorsions qu'il peut provoquer.

La courbe de la figure 8 est une courbe de réponse acoustique relevée en chambre sourde. Elle a été obtenue en appliquant, à la bobine du haut-parleur considéré, un signal sinusoïdal de faible puissance (50 mW à 400 Hz), le courant parcourant la bobine étant maintenu rigoureusement constant. Le haut-parleur est séparé de toute enceinte et de tout écran afin d'éviter des effets secondaires. La pression est mesurée, dans l'axe du haut-parleur, à 50 cm de celui-ci, au moyen d'un microphone à pression, d'un amplificateur et d'un enregistreur dont le mouvement est synchronisé avec le balayage en fréquence du générateur. Afin de pouvoir étalonner l'axe des abscisses en fréquence, le générateur est momentanément mis hors circuit au moment de son passage sur la fréquence de référence, 1.000 Hz ; la discontinuité de la

courbe à cette fréquence ne traduit donc pas un comportement particulier du haut-parleur mais constitue un simple repère.

Notons encore que la remontée du registre aigu s'explique par le fait qu'il s'agit d'une mesure axiale : aux fréquences élevées, un effet croissant de focalisation se manifeste et l'intensité croît donc dans la direction de l'axe.

VI. 2. Interprétation de la courbe de réponse acoustique.

Pour interpréter la courbe ainsi obtenue, nous la fragmenterons en tronçons A, B, C, D (fig. 8) correspondant à des bandes de fréquences dans chacune desquelles le système mobile du haut-parleur a un comportement particulier, comme le montre l'étude physique de son mouvement et de son rayonnement.

Bande de fréquences A ($f < f_0$) — Octave inférieure, sous la fréquence de résonance du transducteur.

- Pour les fréquences suffisamment éloignées de celle de la résonance f_0 , l'impédance mécanique totale du système mobile a un caractère capacitif par suite de la prépondérance du terme $\frac{1}{j\omega C_m}$ dans l'expression de l'impédance mécanique.

L'amplitude du déplacement du système mobile, qui vaut :

$$U = \frac{V}{j\omega} = B I I C_m$$

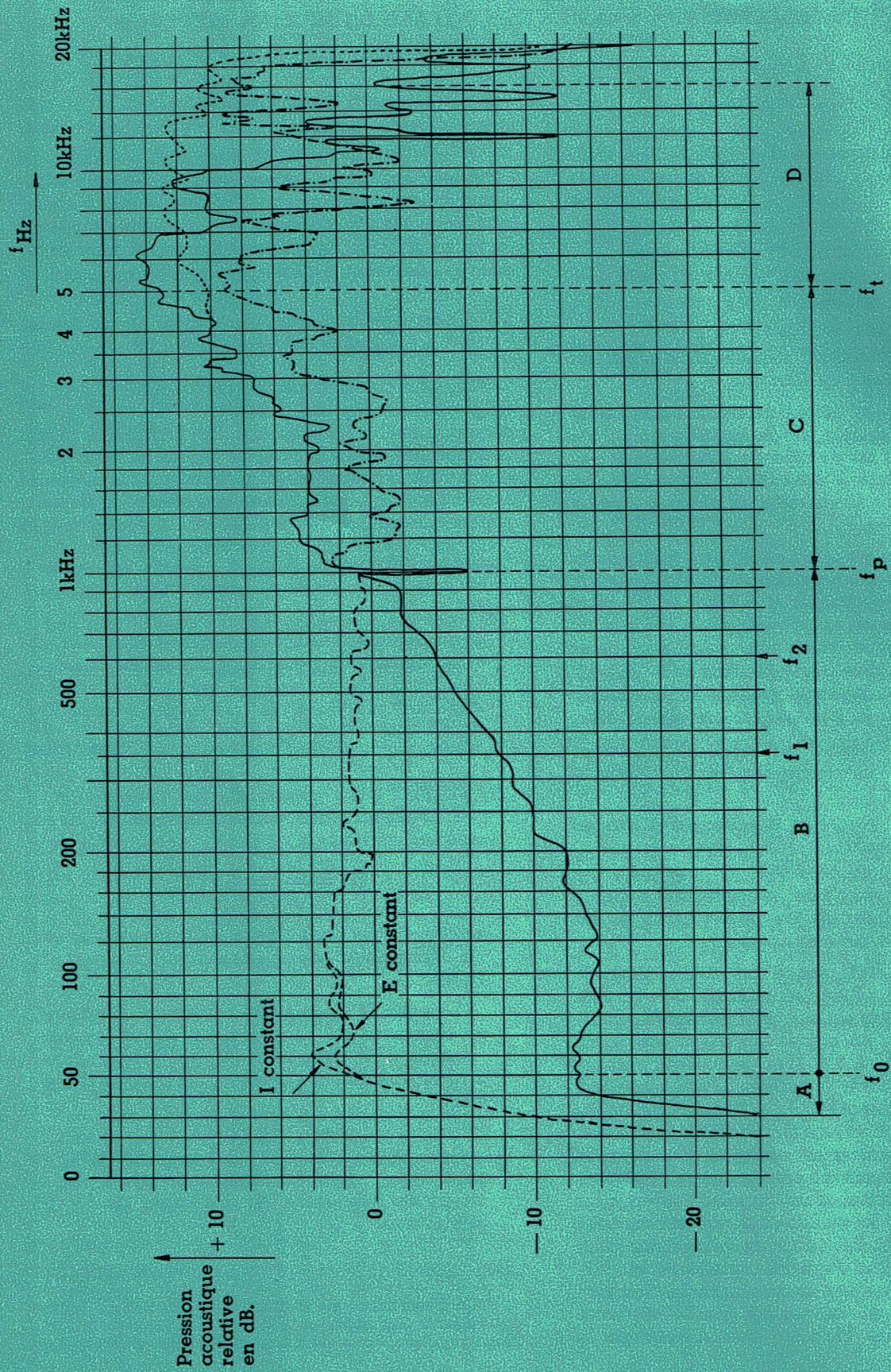
ne dépend pas de la fréquence, mais uniquement de l'amplitude du courant qui parcourt la bobine.

Lorsque le haut-parleur rayonne librement, la résistance de rayonnement R_r est proportionnelle à f^4 , et comme $|V|$ est proportionnel à f , on voit que la puissance acoustique rayonnée :

$$P_a = R_r |V|^2$$

est proportionnelle à f^6 (à I constant) (*), et subit donc, dans la partie considérée de la bande de fréquences A, une chute de 18 dB par octave.

(*) J. DEWEVRE et W. HEMBISE. - *Le haut-parleur électrodynamique à diaphragme et sa charge acoustique* (1^e partie). *Étude physique*, Revue M.B.L.E., II, 3 (juillet 1959), p. 228.



Courbes de réponse acoustique du haut-parleur « 9710 » obtenues en chambre sourde :

en trait plein : sans écran ni enceinte acoustique et sans cône additionnel ;

en pointillé : dans le registre suraigu et dans l'axe du cône additionnel ;

en trait interrompu : dans le registre grave, avec une enceinte pseudo-infinie d'un volume interne de 90 dm^3 (tension constante ou courant constant) ;

en points-tirés : dans le registre aigu, à 90° de l'axe, c'est-à-dire les diaphragmes étant dirigés verticalement.

Fig. 8

C'est ce qui fait généralement considérer un haut-parleur comme inutilisable pour des fréquences éloignées de sa fréquence de résonance.

- Pour les fréquences voisines de celle-ci, la pente de la courbe de réponse peut également être assez prononcée, en raison même du phénomène de la résonance qui se traduit, sur cette courbe, par l'apparition d'une pointe. Pour atténuer cette pointe, il faut amortir, d'une manière appropriée, le mouvement du système mobile. On peut arriver ainsi à réduire, au voisinage de la fréquence de résonance fondamentale, la pente de la courbe de réponse à une valeur raisonnable de 6 dB par octave. La perte de rendement qui résulte de l'amortissement employé peut avantageusement être compensée en renforçant le rayonnement du diaphragme par la création d'« images virtuelles » (**).
- Le comportement non-linéaire des suspensions (générateur de distorsions harmoniques et d'intermodulation), dû aux grands déplacements du système mobile exigés par la reproduction des sons graves, est corrigé par une charge pseudo-infinie qui apporte une raideur additionnelle $\frac{1}{C_m}$. Il en résulte un relèvement de la fréquence de résonance d'autant plus marqué que les dimensions du coffret totalement clos constituant la charge pseudo-infinie sont plus petites. De ce fait, un haut-parleur, destiné à être placé dans un tel coffret, devrait avoir une fréquence de résonance f_0 suffisamment basse (20 à 30 Hz) pour que la fréquence de résonance f_0' de l'ensemble haut-parleur-enceinte ne dépasse pas une valeur d'environ 60 Hz, sans devoir utiliser un coffret trop volumineux.

Mais, une fréquence de résonance f_0 aussi basse suscite de graves inconvénients :

elle entraîne une diminution de la puissance admissible ;

elle pose un difficile problème de centrage de la bobine mobile car, par suite de ses grandes déformations, le diaphragme perd la rigidité indispensable au maintien correct de la bobine dans l'entrefer ;

elle nécessite un amincissement des nervures du diaphragme tel que la périphérie de ce dernier peut être affectée de vibrations partielles additionnelles, de fréquence propre située dans le médium.

(**) On obtient des « images virtuelles » du diaphragme en plaçant le haut-parleur près des murs du local d'écoute (près d'une paroi ou dans l'angle de deux parois).

Aussi, une fréquence de résonance f_0 voisine de 50 Hz est-elle, en fait, le meilleur compromis entre ces diverses exigences. Elle nécessite un volume interne d'enceinte d'environ 100 dm³ pour ne subir qu'une légère remontée. Mais, grâce à certains artifices dont il sera question dans la troisième partie de cette étude, on peut obtenir, avec un coffret clos d'encombrement plus réduit encore, une fréquence de résonance de l'ensemble haut-parleur-enceinte ayant une valeur de 65 Hz, valeur qui correspond à la limite musicale que nous nous sommes fixée antérieurement, l'octave inférieure demeurant, par ailleurs, utilisable.

- En ce qui concerne le comportement non-linéaire du haut-parleur, signalons le défaut dit « double basse ». Ce défaut consiste dans l'apparition de l'harmonique 2 lorsque, par suite de la grande amplitude du déplacement de la bobine mobile, celle-ci est portée au voisinage des bords de l'entrefer.

Ce défaut n'est pas aussi gênant qu'on pourrait le croire car il correspond au mode d'émission habituel des instruments à fondamentales très graves ; on l'évite cependant en donnant à l'enroulement de la bobine une disposition telle que, quelle que soit l'amplitude du déplacement, un même nombre de spires se trouve dans un champ magnétique uniforme.

Bande de fréquences B) $f_0 < f < f_p$ — Fonctionnement en piston du système mobile.

L'impédance mécanique est surtout dépendante de la masse du système mobile ; elle est donc, analogiquement, de caractère inductif.

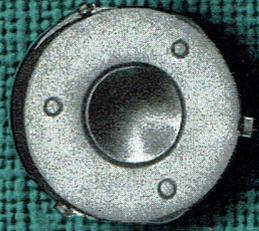
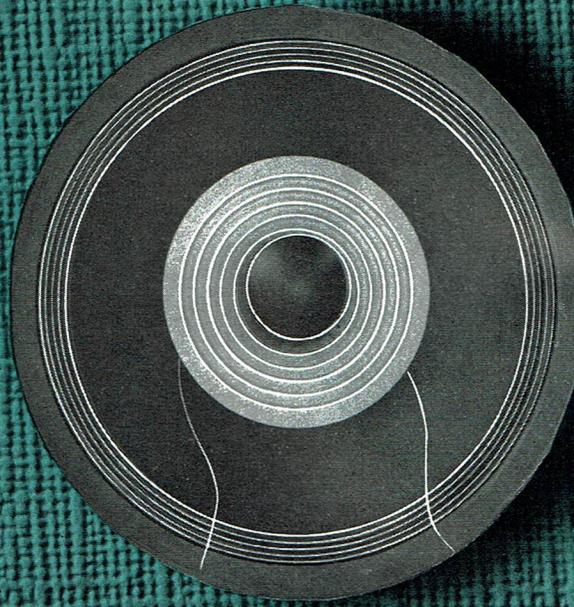
La vitesse de déplacement est inversement proportionnelle à la fréquence et la puissance rayonnée est proportionnelle à f^2 (rayonnement en dipôle), ce qui correspond à une pente de 6 dB par octave. On constate que, dans la bande de fréquences considérée, la courbe de réponse présente une grande régularité et que le fonctionnement du haut-parleur ne suscite qu'un minimum de difficultés technologiques.

Le taux de distorsion harmonique peut y être maintenu au-dessous de 1 % en utilisant une enceinte pseudo-infinie.

La reproduction des sons graves exige, nous l'avons vu, l'ébranlement d'une masse d'air assez considérable, ce qui n'est possible que si le diaphragme peut subir un déplacement appréciable ou bien si sa surface est suffisamment grande.

Mais, aucun de ces deux moyens ne peut être mis en œuvre d'une manière exagérée.

En effet, pour des raisons que nous connaissons, un grand déplacement du système mobile est



incompatible avec l'obtention d'un taux minime de distorsion ; d'autre part, la fréquence-limite de fonctionnement en piston, est d'autant moins élevée que le diamètre du diaphragme est plus grand.

Mais ici, un compromis s'avère possible : un équilibre satisfaisant grave-aigu peut, en effet, être obtenu, pour un diffuseur à gamme unique, au moyen d'un diaphragme d'un diamètre de 21 à 25 cm. Au prix de certains artifices, qui seront étudiés ultérieurement, le fonctionnement d'un tel diaphragme sera correct jusqu'à la limite inférieure utile du spectre acoustique ; d'autre part, il se comporte en piston jusqu'à environ 1 kHz (pour un diamètre équivalent de piston de 18 cm) contre 675 Hz pour un « 30 cm » (ce dernier étant plutôt destiné à la reproduction du registre grave seul, dans un système à plusieurs haut-parleurs et filtre de répartition).

Ceci explique qu'un diffuseur de diamètre 21 à 25 cm soit considéré comme optimum lorsqu'il s'agit de restituer la gamme acoustique entière au moyen d'un seul appareil.

Bande de fréquences C ($f_p < f < f_t$) — Vibrations partielles du diaphragme.

Un mouvement vibratoire imprimé au diaphragme par la bobine mobile se propage, dans le matériau qui le constitue, à une vitesse qui dépend de la nature de ce matériau ; selon les matériaux actuellement employés, elle peut varier de 500 à 2.000 m/sec.

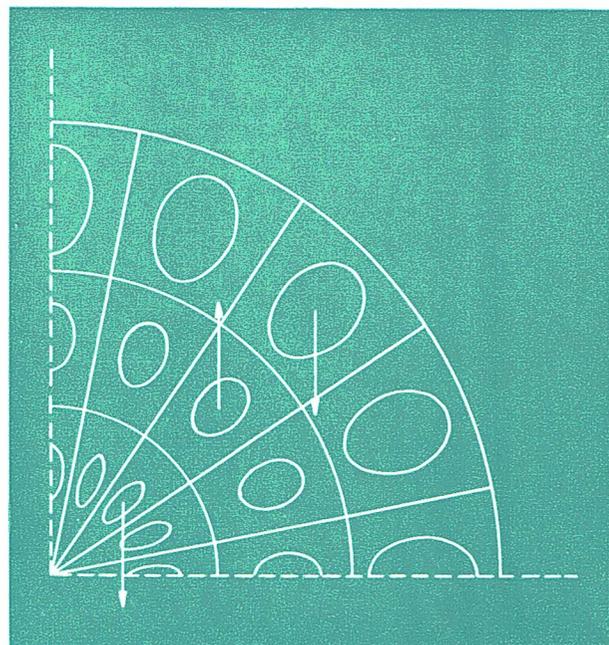
Dans la bande C ici considérée, les fréquences des vibrations sont telles que le temps mis par les vibrations pour parcourir, dans le cône, la distance du sommet à la périphérie, n'est plus négligeable devant leur période.

Le diaphragme peut, dès lors, devenir le siège d'ondes stationnaires par suite de la réflexion partielle (*) des vibrations sur le bord du diaphragme. La réduction de ce phénomène requiert une particulière attention pour les haut-parleurs de diamètre moyen, où il est le plus marqué.

Sous l'effet d'une excitation complexe, de multiples états stationnaires différents prennent simultanément naissance dans le diaphragme. Celui-ci se partage alors en diverses zones dans chacune desquelles s'établit un régime particulier de vibration. Ces différents régimes sont, en général, déphasés l'un par rapport à l'autre.

Les zones de vibrations partielles sont séparées par des lignes nodales radiales ou circulaires (lieux

des nœuds de vibration) où le déplacement est nul (fig. 9). On peut expérimentalement se rendre compte de la répartition de ces zones en déposant préalablement de la poudre de lycopode sur toute la surface du diaphragme : on observe la formation de figures dites de Chladni.



Allure des vibrations du diaphragme aux fréquences supérieures à celle où il cesse de travailler en piston ($f > f_p$)

Fig. 9

Ce comportement du diaphragme, pour des fréquences supérieures à f_p , affecte la courbe de réponse acoustique du haut-parleur de pointes traduisant les résonances particulières des diverses zones de vibrations partielles.

On a constaté que ces résonances locales contribuent à maintenir à un niveau important la réponse du transducteur jusqu'à des fréquences bien supérieures à sa limite de fonctionnement en piston.

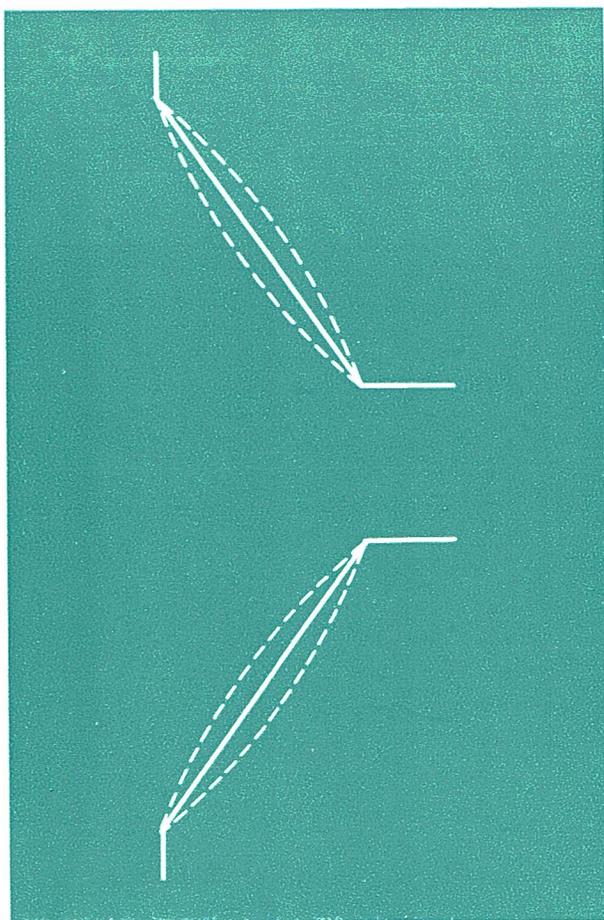
Cependant, les vibrations partielles ne doivent pas être exagérées, car elles peuvent donner lieu, dans le haut médium, à une fausse brillance.

Bien que cet effet soit apprécié par certains, il est à conseiller de limiter l'ampleur des vibrations partielles, et cela d'autant plus que certaines d'entre elles risquent même de masquer des notes graves.

Un autre phénomène, dont il faut tenir compte dans la bande de fréquences considérée, est celui qui entraîne l'apparition de ce qu'on appelle le « son rauque ».

(*) La réflexion n'est que partielle car le bord du diaphragme, constitué de nervures permettant son mouvement, n'est pas rigide.

Un haut-parleur (type « 9710M ») démonté en ses divers composants ; de gauche à droite et de haut en bas, on reconnaîtra : 1) la corbeille - 2) le diaphragme conique, vu de l'arrière, avec son disque de centrage et ses nervures périphériques (au centre, le mandrin de la bobine mobile) - 3) le moteur magnétique (au centre de l'entrefer, le capuchon de cuivre) - 4) l'avant du diaphragme principal complété par le cône additionnel de registre suraigu - 5) vue avant de l'unité complète.



Déformations convexe et concave (à échelle fortement exagérée) d'un diaphragme conique à suspension périphérique

Fig. 10

Lorsque le sommet du cône subit un déplacement axial de fréquence fondamentale donnée, ce déplacement peut engendrer une vibration en demi-onde des génératrices du cône (fig. 10). Ces vibrations se produisent d'une manière analogue à celles d'une corde élastique fixée à l'une de ses extrémités et sollicitée à l'autre par une force axiale alternative (expérience de Melde). La fréquence des vibrations transversales ainsi engendrées vaut la moitié de la fréquence de la force d'excitation.

Pour un haut-parleur dont $f_p = 1$ kHz, ce phénomène peut prendre naissance pour des fréquences fondamentales d'excitation comprises entre 1,5 et 3 kHz.

C'est l'apparition de la sous-harmonique qui donne lieu à un son rauque très désagréable mais qui ne peut se produire que dans le cas de notes soutenues.

Si l'apparition du défaut de son rauque ne détériore pas un dessin musical complexe à variations

rapides, il est susceptible cependant d'influer sur la tonalité propre d'un haut-parleur.

Aussi, les fabricants de haut-parleurs cherchent-ils à le réduire. Pour cela, ils recourent à différents procédés.

Certains adoptent pour leur diaphragme un profil curviligne bien que ce moyen conduise à une diminution de la puissance admissible.

D'autres conservent à leur diaphragme la forme conique mais le soumettent à divers traitements tels que le gaufrage ou l'application d'un vernis plastique à sa périphérie.

D'un autre côté, l'emploi d'une charge pseudo-infinie, par la raideur additionnelle qu'elle apporte au diaphragme, aide à empêcher les déformations transversales de ce dernier.

Bande de fréquences D ($f > f_i$) — Extension de la réponse dans l'extrême aigu par action d'un cône auxiliaire.

Lorsque la fréquence des vibrations augmente, la partie active du diaphragme se localise davantage aux environs du sommet du cône.

La réponse du haut-parleur s'étend d'autant plus loin dans l'aigu que le diamètre de son cône est plus petit. Un haut-parleur pourvu d'un cône de 21 cm de diamètre peut atteindre, seul, 10 kHz mais la courbe de réponse présente des irrégularités de plus en plus prononcées. En outre, les pinceaux du diagramme polaire de distribution spatiale sont de plus en plus étroits (voir VI. 2).

Aussi, pour donner à la courbe de réponse du transducteur une allure satisfaisante jusqu'à des fréquences supérieures à 10 kHz, utilise-t-on les moyens suivants :

- Le groupement de plusieurs haut-parleurs de dimensions diverses appropriées à chacun des registres grave, médium, aigu, avec l'emploi conjoint de filtres L-C de répartition, permet une utilisation rationnelle des propriétés de diaphragmes de diamètres différents ; de plus, ce procédé diminue les possibilités de distorsion d'intermodulation. Mais, outre sa complication, il offre trois inconvénients techniques plus ou moins sensibles :
 - a) détérioration des transitoires, résultant de la distorsion de phase que présente chacun des transducteurs dans les régions de coupure des filtres L-C ;
 - b) diminution de l'amortissement du système mobile provenant de l'insertion en série avec la bobine d'excitation des éléments résistifs des filtres L-C (facteur peu influent dans le cas d'une enceinte pseudo-infinie) ;

c) caractère non punctiforme de la source sonore, qui entraîne, du moins pour l'auditeur placé à faible distance, un manque d'homogénéité dans l'émission d'un même instrument.

Pour éviter ce dernier inconvénient, certains constructeurs n'utilisent qu'un seul petit haut-parleur séparé (universellement dénommé « tweeter ») placé dans l'axe même du reproducteur principal.

- Une forme exponentielle donnée au cône unique améliore la reproduction des sons les plus aigus. Cette méthode réduit malheureusement la puissance admissible dans le grave.
- L'utilisation de nervures additionnelles ou l'interposition d'un matériau élastique dans le diaphragme favorise la reproduction des aigus grâce au découplage ainsi obtenu entre le sommet du cône et sa périphérie.
- L'adjonction d'un diaphragme additionnel de petit diamètre concentrique au diaphragme existant et collé au sommet du cône principal conduit à un résultat similaire.

Nous examinerons ce dernier procédé d'une manière plus détaillée puisque c'est celui qui est préconisé comme apportant une solution satisfaisante et qui ne présente aucun des inconvénients dont nous venons de parler.

Le diaphragme auxiliaire reprend totalement en charge les vibrations du grand cône à partir de 10 kHz. Il se rend cependant déjà utile à partir de 3 kHz comme élément de dispersion spatiale pour les fréquences médianes (voir à ce propos, sur la figure 11, l'allure du diagramme polaire pour $f = 6$ kHz).

Ce second cône doit répondre aux conditions suivantes :

- il doit être constitué du même matériau que le cône principal ;
- être plus petit et plus rigide que ce dernier, c'est-à-dire de caractéristique mieux appropriée à la reproduction de l'extrême aigu ;
- être très léger de manière à ne pas augmenter sensiblement la masse totale du système mobile ;
- être parfaitement solidaire de la bobine mobile ;
- son bord externe doit être libre de manière à accroître l'amplitude des modes supérieurs de résonance et partant le rayonnement aux fréquences élevées.

Quand l'ensemble des deux diaphragmes est excité par un courant dont la fréquence aug-

mente, la répartition de l'énergie vibratoire entre les deux diaphragmes s'effectue comme suit :

- aux fréquences basses, les deux diaphragmes se comportent comme un tout indéformable ;
- à mesure que la fréquence s'élève, une partie externe de plus en plus importante de la membrane principale s'immobilise ;
- aux fréquences très élevées, le grand cône est pratiquement inerte tandis que le petit cône assure seul la reproduction sonore.

Remarquons que l'association de cônes s'avère particulièrement délicate quand on veut éviter l'apparition d'un creux dans le médium sur la courbe de réponse ; c'est ce qui se produit dans certaines réalisations qui n'ont pas été spécialement étudiées.

Si le système bi-cône cause une légère augmentation de la masse de l'équipage mobile, il offre le grand avantage d'élargir la bande passante utile jusqu'à 20 kHz (voir courbe en trait interrompu de la figure 8 où l'on a situé la fréquence de transition moyenne f_t à 5 kHz) tout en n'exigeant l'emploi que d'un seul aimant, avec un rendement uniforme. Cette extension de la réponse au-delà de la limite d'audibilité et l'absence d'irrégularité marquante rendent possible une excellente reproduction des transitoires.

Nous étudierons dans la suite un autre dispositif qui contribue également à maintenir une bonne réponse dans le registre aigu, par constance de l'impédance.

VI. 3. Diagramme polaire de rayonnement.

Ce diagramme donne la pression sonore existant en tous les points également distants du sommet du cône du haut-parleur.

On le relève pratiquement, en chambre sourde ou en champ libre, dans un plan donné, au moyen d'un microphone à pression (fig. 11).

On effectue ordinairement plusieurs essais identiques, chacun d'eux correspondant à une fréquence d'excitation donnée du haut-parleur. Pour chaque fréquence-témoin, les pressions sonores repérées dans les différentes directions, sont exprimées en dB, la pression mesurée, dans les mêmes conditions, sur l'axe du cône étant considérée comme niveau de référence (0 dB) ; elles sont

portées sur des rayons d'une circonférence, menés parallèlement aux directions dans lesquelles elles ont été mesurées. Ainsi, la figure 11 montre un diagramme polaire du haut-parleur 9710 M à double cône, obtenu pour quelques fréquences du registre aigu, dans un plan contenant l'axe des deux diaphragmes (*).

Le diagramme polaire est quasi semi-circulaire pour des fréquences basses ; la pression acoustique est donc constante quelle que soit la direction dans laquelle on la mesure. Pour les fréquences élevées, au contraire, une directivité se manifeste suivant l'axe du haut-parleur. Cette répartition spatiale des pressions acoustiques en fonction de la fréquence peut s'expliquer de la manière suivante : lorsque la longueur d'onde de la vibration n'est pas grande par rapport aux dimensions du diaphragme, une interférence entre les rayonnements des diverses zones de vibrations crée une augmentation de la pression acoustique axiale.

Aux fréquences de 6, 8 et 10 kHz, prises comme bases de comparaison, le diagramme polaire d'un haut-parleur à double cône (fig. 11) présente, contrairement à celui du même haut-parleur non muni du petit cône additionnel (diagramme figurant en cartouche), des lobes plus larges.

Les écarts de l'intensité acoustique, suivant les diverses directions, par rapport à l'intensité dans l'axe, constituent ce que l'on peut appeler la *distorsion de distribution spatiale*.

Cette distorsion, généralement fonction de la fréquence, limite considérablement les places où l'auditeur jouit d'un équilibre musical vrai. Cependant, même dans ce dernier cas, il faut noter que l'impression auditive n'est semblable à celle de l'écoute directe que si la source sonore peut être assimilée à une source ponctuelle (messages parlés, petits ensembles instrumentaux).

Dans la reproduction d'une interprétation de grand orchestre, au contraire, le haut-parleur (source ponctuelle) produit une impression semblable à celle que l'on éprouve en écoutant directe-

(*) Outre ce diagramme polaire de rayonnement d'un haut-parleur, on peut définir également un « facteur de directivité ». C'est, selon R. Lehmann, à une fréquence donnée, le rapport du carré de la pression acoustique rayonnée, mesurée en un point donné de l'axe du haut-parleur, à la moyenne des carrés des pressions sur la surface d'une sphère ayant le haut-parleur comme centre et passant par le point considéré.

Exprimé en dB, le facteur de directivité porte aussi le nom d'« indice de directivité ».

Certains constructeurs ne fournissent aucun de ces renseignements ; d'autres ajoutent simplement, sur la courbe de réponse acoustique habituelle, un second relevé du registre aigu dans une direction faisant un angle de 45°, par exemple, avec l'axe du haut-parleur.

ment cet orchestre au travers d'un trou pratiqué dans un mur séparant l'auditeur des exécutants.

Pour éviter cette impression, on a été amené à utiliser la technique stéréophonique (emploi de deux canaux de reproduction) qui apporte la possibilité d'une localisation spatiale des éléments de la source.

Dans une note ultérieure, nous envisagerons l'utilisation des réflexions sur les parois du local d'écoute comme moyen d'élargissement d'une source radiante à monocanal d'information.

VI. 4. Courbe d'impédance électrique.

La courbe d'impédance électrique d'un haut-parleur (fig. 12) traduit la variation, en fonction de la fréquence, du module de son impédance électrique totale Z_{et} , somme de l'impédance électrique Z_e de la bobine et de l'impédance cinétique Z_{em} (*), ou, ce qui revient au même, la variation de la tension aux bornes de la bobine mobile pour une excitation à courant constant.

S'il semble, à première vue, que la courbe d'impédance électrique ne procure que des renseignements sur le comportement électrique du haut-parleur, elle donne toutefois des informations techniques intéressantes.

- L'impédance électrique totale Z_{et} , variant avec la fréquence, ne peut constituer une constante caractéristique du haut-parleur. On utilise dans ce but l'*impédance nominale*, c'est-à-dire une valeur particulière de $|Z_{et}|$: soit la valeur de $|Z_{et}|$ à une fréquence de référence de 1 kHz soit, d'après certaines normes, la valeur minimum de $|Z_{et}|$.

Selon la définition adoptée, l'impédance nominale du haut-parleur, dont $|Z_{et}|$ est représenté par la courbe 1 de la figure 12, serait respectivement de 7 Ω et de 6 Ω (cette dernière se situant, dans ce cas, à 300 Hz).

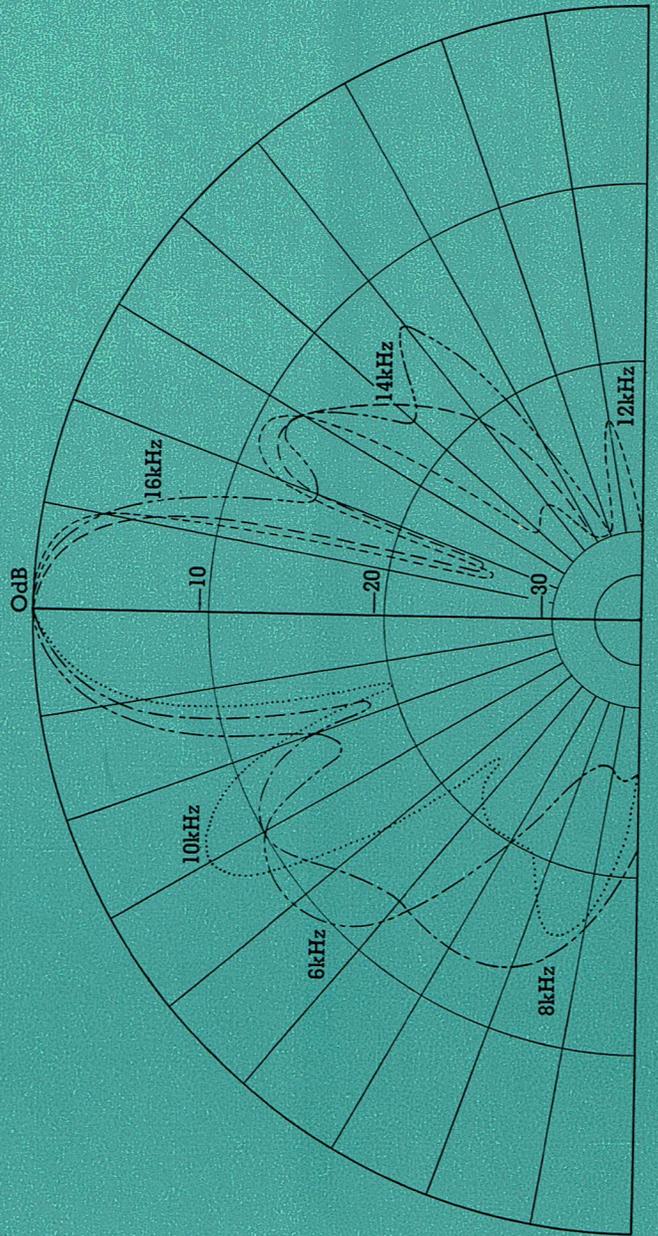
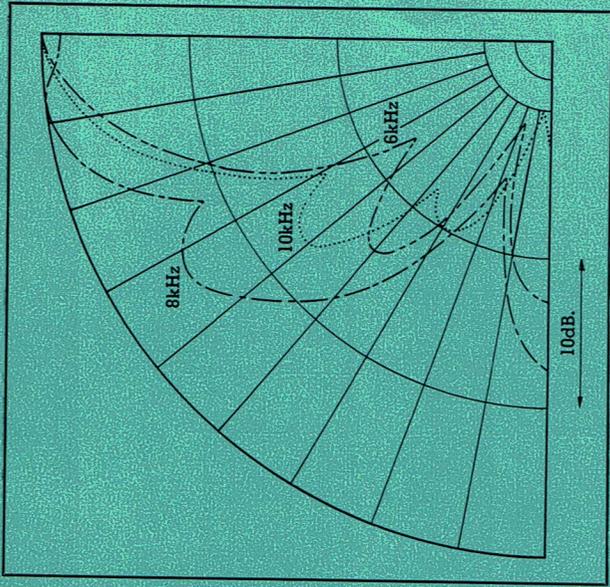
- La courbe d'impédance électrique permet de connaître la fréquence de résonance du haut-parleur isolé : c'est sensiblement la fréquence pour laquelle $|Z_{et}|$ passe par un maximum.

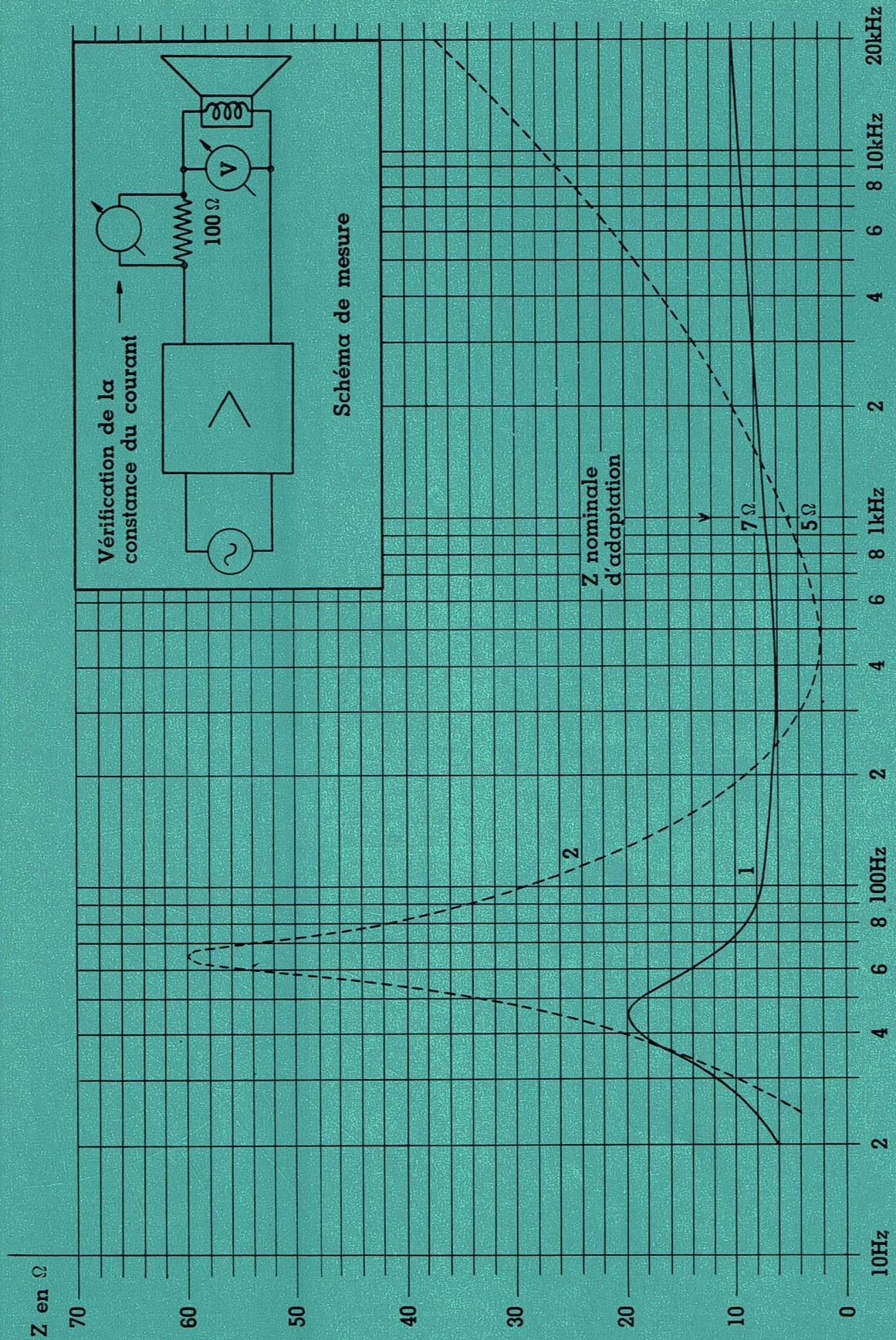
Lorsque le haut-parleur est associé à une enceinte, la courbe d'impédance électrique relevée dans ces conditions peut présenter plusieurs fréquences de résonance dues à l'interaction entre le haut-parleur et son enceinte.

(*) voir *Etude Physique* (Revue M.B.L.E. II, 3, p. 228).

Diagramme polaire de rayonnement aux fréquences élevées
 du haut-parleur « 9710M » à bi-cône
 En cartouche : le diagramme correspondant d'un diffuseur
 de 21 cm sans cône additionnel

Fig. 11





Courbe d'impédance électrique (n° 1) d'un haut-parleur muni d'un dispositif d'amortissement pneumatique et d'un anneau de cuivre dans l'entrefer (« 9710M » ; $Z = 7 \Omega$ à 1 kHz) comparée à celle (n° 2, en trait interrompu) d'un haut-parleur de technique conventionnelle (« AD4800M » ; $Z = 5 \Omega$ à 1 kHz)

Fig. 12

— La courbe d'impédance électrique fournit également des indications sur l'effet des amortissements.

Ainsi, la comparaison des courbes 1 et 2 de la figure 12, correspondant respectivement à un haut-parleur « 9710 M » et à un haut-parleur « AD 4800 M », montre que l'auto-amortissement pneumatique énergique dont est doté le premier, entraîne un affaiblissement nota-

ble de l'impédance $|Z_{et}|$ à la fréquence de résonance.

— La courbe d'impédance électrique montre aussi que l'accroissement de $|Z_{et}|$, dans l'aigu, dû à la self-induction de la bobine mobile, se trouve fortement atténué, pour le haut-parleur « 9710 M », grâce à l'utilisation d'un capuchon de cuivre (voir fig. 1, étude physique) sur l'action duquel nous reviendrons ultérieurement.

BIBLIOGRAPHIE

- [¹] H. ANGLES D'AURIAC *Qualité théorique et qualité réelle en Radiodiffusion*, Bulletin de l'O.I.R., (1948), 18, (pp. 343-346), 19, (pp. 414-419), 20 (pp. 534-541).
- [²] G.L. BEERS and H. BELAR *Frequency-Modulation Distortion in Loudspeakers*, P.I.R.E., (avril 1943), pp. 132-138.
- [³] J. BERNHART *Traité de prise de son*, Ed. Eyrolles, Paris (1949).
- [⁴] C. BORDONE *Some Aspects of non-linear Distortion of Loudspeakers*, Acustica, (1954), vol. 4, 5, pp. 563-566.
- [⁵] G. BRIGGS *Reproduction sonore à haute fidélité* (Adaptation française de R. LAFAURIE), Ed. Radio, Paris, (1955).
- G. BRIGGS and R.E. COOKE *Loudspeakers* (5th ed.), Idle-Bradford, Wharfedale (1958).
- [⁶] F.H. BRITAIN *Loudspeakers: Relations between subjective and objective Tests*, Journal of the British Institution of Radio Engineers, vol. 13, 2, (février 1953), pp. 105-109.
- F.H. BRITAIN and E. WILLIAMS *Loudspeakers Reproduction of continuous-Spectrum Input*, Wireless Engineer, vol. 15, 172, (janvier 1938), pp. 16-20.
- [⁷] J. CHERNOF *Principles of Loudspeakers Design and Operation*, I.R.E. Transactions on Radio, (sept.-oct. 1957), pp. 117-127.
- [⁸] M.S. CORRINGTON *Correlation of Transient Measurement on Loudspeakers with listening Tests*, J.A.S.A., (janv. 1955), pp. 35-39.
- M.S. CORRINGTON and M.C. KIDD *Amplitude and Phase Measurements on Loudspeakers cones*, P.I.R.E., (sept. 1951), pp. 1021-1026.

- [9] Ch.A. CULVER *Musical Acoustics*, Mc Graw-Hill, New-York, (1956)
- [10] W.J. CUNNINGHAM *Non-linear Distorsion in dynamic Loudspeakers due to magnetic Effects*, J.A.S.A., vol. 21, (mai 1949), pp. 202-207.
- [11] P. DAVID *Sur quelques points discutés de la technique radioélectrique : dans quelle mesure l'étude d'un haut-parleur en régime permanent permet-elle de prévoir son comportement en régime transitoire?*, Onde électrique, vol. 17, 198 (juin 1938), pp. 309-319.
- [12] Ch.A. EWASKIO and O.K. MAWARDI *Electroacoustic Phase Shift in Loudspeakers*, J.A.S.A., vol. 22, (juillet 1950), pp. 444-448.
- [13] H. FLETCHER and W.A. MUNSON *Loudness, its Definition, Measurement and Calculation*, (1933), réédition in *Audio*, (nov.-déc. 1957), (jan.-fév. 1958).
- [14] G. GUYOT *Etude sur les haut-parleurs en régime transitoire*, Revue Générale de l'Electricité, (juin 1948), pp. 245-253.
- [15] J.C. HENTSCH *La fidélité des haut-parleurs dans la reproduction des phénomènes transitoires*, Bulletin technique des P.T.T. suisses, 6, (1951), pp. 201-211.
- [16] I.J. HIRSH *La mesure de l'audition*, (traduction de J. BOUCHE), Presses Universitaires de France, Paris (1956).
- [17] D.F. HOTH *Room Noise Spectra at Subscribers Telephone Locations*, J.A.S.A., vol. 12, 4 (avril 1941), pp. 499-504.
- [18] V. JEAN-LOUIS *L'ingénieur du son en radiodiffusion, cinéma et télévision*, Ed. Chiron, Paris.
- [19] J. JEANS *Science et musique*, (traduction de F. MORIN et J. MONOD), Ed. Hermann, Paris (1939).
- [20] F. LANGFORD-SMITH *Radio Designer's Handbook*, Iliffe et Sons, London (1953).
- [21] R. LEHMANN *Les conditions d'étalonnage des haut-parleurs*, Revue du Son, 57, (janvier 1958), pp. 10-12, 58, (février 1958), pp. 55-57. *Les haut-parleurs dynamiques à radiation directe*, Revue du Son, 21, (janvier 1955), pp. 4-9.
- R. LEHMANN et P. CHAVASSE *Conditions de la vérification acoustique des haut-parleurs*, Cahiers d'Acoustique, V, (1953), pp. 67-82.
- [22] Mc LEAN *Loudspeaker Design and Application*, I.R.E. Transactions on Audio, Au-5, (mars-avril 1957).
- [23] J.J. MATRAS *Acoustique appliquée*, Cours de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Tomes I et II, Paris.

- [24] J. MOIR *High Quality Sound Reproduction*, Chapman and Hall Ltd, London.
- [25] A. MOLES *Théorie de l'information et perception esthétique*, Collection « Etudes de Radio-Télévision », Flammarion, Paris (1958). *Dynamic Range and the Reproduction of Contrast*, E.B.U. Bulletin, I, 4, (nov. 1950), pp. 332-338.
- [26] V. RETTINGER *Loudspeaker Distortion due to the Döppler Effect*, Audio, (juil. 1959), pp. 28 et 63.
- [27] D.W. ROBINSON *A new Determination of the equal-Loudness Contours*, I.R.E. Transactions on Audio, (jan.-fév. 1958), pp. 6-13.
- [28] E. SEEMANN *Beurteilung der Einschwingverzerrungen von Lautsprechern an Hand der Frequenzgänge*, Bulletin technique des P.T.T. suisses, 4, (1952), pp. 121-127.
- [29] J.F. SCHOUTEN *Le son synthétique*, Revue technique Philips, 4, 175, (juin 1939).
- [30] J.J. SCHURINK *Transient Response Distortion of Loudspeakers*, High Fidelity Monitor, I, 4, (nov. 1959), pp. 93-101.
- [31] D.E.L. SHORTER *A Survey of Performance Criteria and Design Considerations for high-Quality monitoring Loudspeakers*, Proceedings I.E.E., vol. 105, 24, (nov. 1958), pp. 607-623.
- D.E.L. SHORTER,
W.I. MANSON et
E.R. WIGAN *Effets subjectifs d'une limitation des fréquences aiguës*, Revue de l'U.E.R., 57, (oct. 1959), pp. 22-28.
- [32] L.J. SIVIAN, H.K. DUNN and S.D. WHITE *Absolute Amplitudes and Spectra of certain musical Instruments and Orchestras*, I.R.E. Transactions on Audio, AU-7, (mai-juin 1959), pp. 47-75.
- [33] G. SLOT *From Microphone to Ear*, Philips Technical Library, (2^e éd.), 1959.
- [34] W.B. SNOW *Audible Frequency Ranges of Music, Speech and Noise*, J.A.S.A., vol. 3, 1, (juillet 1931), pp. 155-166.
- [35] W.R. STROH *Phase Shift in Loudspeakers*, I.R.E. Transactions on Audio, AU-7, 5, (sept.-oct. 1959), pp. 120-124.
- [36] R. VERMEULEN *L'examen des haut-parleurs*, Revue Technique Philips, 4, 12, (déc. 1939), pp. 371-380.
- [37] E.M. VILLCHUR *Handbook of Sound Reproduction*, Radio Magazines Inc., New-York (1957).
- [38] F. WINCKEL *Klangstruktur der Musik*, (Ouvrage collectif réalisé par l'Université technique de Charlottenburg), Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin (1955).

S/A MANUFACTURE BELGE DE LAMPES ET DE MATERIEL ELECTRONIQUE
80 RUE DES DEUX-GARES BRUXELLES 7 — TELEPHONE : 21.82.00 (20 LIGNES)