

L'AUDIOPHILE



7^e ANNÉE. N° 35 .PRINTEMPS 1985. 38 F

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

L'amplificateur Némésis

2. Montage et mise au point

Jean Hiraga

Dans le dernier numéro de L'Audiophile est paru un article exclusif concernant un amplificateur de puissance baptisé « Némésis ». Son originalité, sa conception monotransistorisée a suscité un grand intérêt parmi nos lecteurs, ceci aussi bien en raison de la simplicité de sa réalisation pratique qu'en raison de ses performances subjectives peu communes.

Nous allons aborder cette fois le côté pratique de la réalisation du « Némésis », c'est-à-dire l'implantation, le montage, le châssis, lesquels exigent certaines précautions telles que celles que l'on pourrait trouver en H.F. Une description complète des plus petits détails du câblage évitera ainsi les mauvaises surprises et les fastidieuses heures de mise au point. Les lecteurs remarqueront également quelques petites modifications des valeurs de condensateurs et de résistances. Elles proviennent d'une mise au point rigoureuse effectuée non pas à partir du transformateur de sortie de pré-série, mais à partir de la version de série. Des mesures complètent cette mise au point.

En fin d'article, on abordera la version push-pull qui devrait déboucher, si de bons résultats sont obtenus, à une réalisation pratique suivie d'une description complète du câblage et de la mise au point.

L'originalité du circuit amplificateur de puissance Némésis réside dans l'utilisation d'un seul transistor. Le montage décrit dans le précédent numéro utilise un transistor de structure MOS-FET, d'origine japonaise et de marque Hitachi, le 2SK 135.

Le transistor 2SK 135

Ce transistor MOS-FET, canal N fait partie d'une gamme de transistors de même puissance et de caractéristiques pratiquement identiques mis à part la valeur maximale de la tension drain-source. Pour les versions de

canal N, il s'agit des références 2SK 132, 133, 134 et 135 pour lesquels le V_{DSS} atteint les valeurs respectives de 100, 120, 140 et 160 volts. La version 2SK 135 est sur ce plan le modèle le plus robuste. Bien que la tension d'alimentation ne soit que

de l'ordre de 40 V, la courbe I_D/V_{DS} que l'on avait pu voir dans le numéro 34, page 19, figure 12 montre le placement de la droite de charge, charge qui est inductive et non résistive. Il se produit alors, lors de l'apparition d'un signal négatif, des tensions transitoires pouvant atteindre un maximum de 110 volts. La figure 1 montre les caractéristiques de SOAR de ces 4 versions qui permettent de comprendre pourquoi le choix s'est fixé sur le 2SK 135 et non sur le 2SK 134 qui est une version beaucoup plus populaire. Chacune de ces versions possède, en plus de sa référence, un code de tri en courant (comme 5B1 par exemple).

Hitachi réserve d'autre part le suffixe H, pour les versions 2SK 134H et 2SK 135H, aux applications industrielles en commutation et en alimentations à découpage.

Les lecteurs sont d'autre part très certainement au courant du remplacement progressif des boîtiers TO-3 par des nouveaux boîtiers moulés à semelle métallique horizontale. Dans un avenir peut-être assez proche, il est fort possible que le constructeur japonais Hitachi décide de supprimer les séries 2SK 132, 133, 134 et 135 pour ne laisser sur le marché que les versions de remplacement de référence 2SK 225, 2SK 226 et 2SK 227, modèles de

remplacement respectifs des 2SK 133, 2SK 134 et 2SK 135. Ces versions en boîtier moulé sont d'ailleurs déjà en vente au Japon depuis juin 1984. Des essais seront d'ailleurs fait ultérieurement sur le modèle 2SK 227, pour lequel les caractéristiques sont en tous points semblables à celles du 2SK 135. La figure 2 montre les différences existant entre le boîtier du 2SK 135 et celui du 2SK 227. Noter que sur le 2SK 135 la hauteur du capôt recouvrant la puce est plus haute que celle d'un boîtier TO-3 classique, genre 2N 3055.

Température du boîtier

Sur le 2SK 135, la température de jonction est de 150°C. La dissipation de la chaleur émise s'effectue par l'intermédiaire de la semelle métallique que l'on doit relier au radiateur. Les conditions de travail du transistor ainsi que les dimensions du radiateur vont porter le boîtier à une température donnée, celle-ci ayant également une rétro-action sur certains paramètres. Pour les transistors de puissance bipolaires, le coefficient de température positif peut conduire à des risques d'emballement thermique, notamment en classe A et surtout lorsque plusieurs transistors sont montés en parallèle. Un débit en courant légèrement plus élevé d'un des deux transistors montés en parallèle va provoquer une légère augmentation de la température du boîtier (et de la puce), ce qui va réduire le seuil de tension émetteur-base de ce transistor, conduisant à une augmentation du courant collecteur. C'est la répétition de ce cycle qui est connue sous le nom d'emballement thermique.

Sur un transistor MOS-FET de puissance, le coefficient de température est non pas positif mais négatif. Dans le numéro 34 de L'Audiophile, la figure 7 montre en effet que pour une

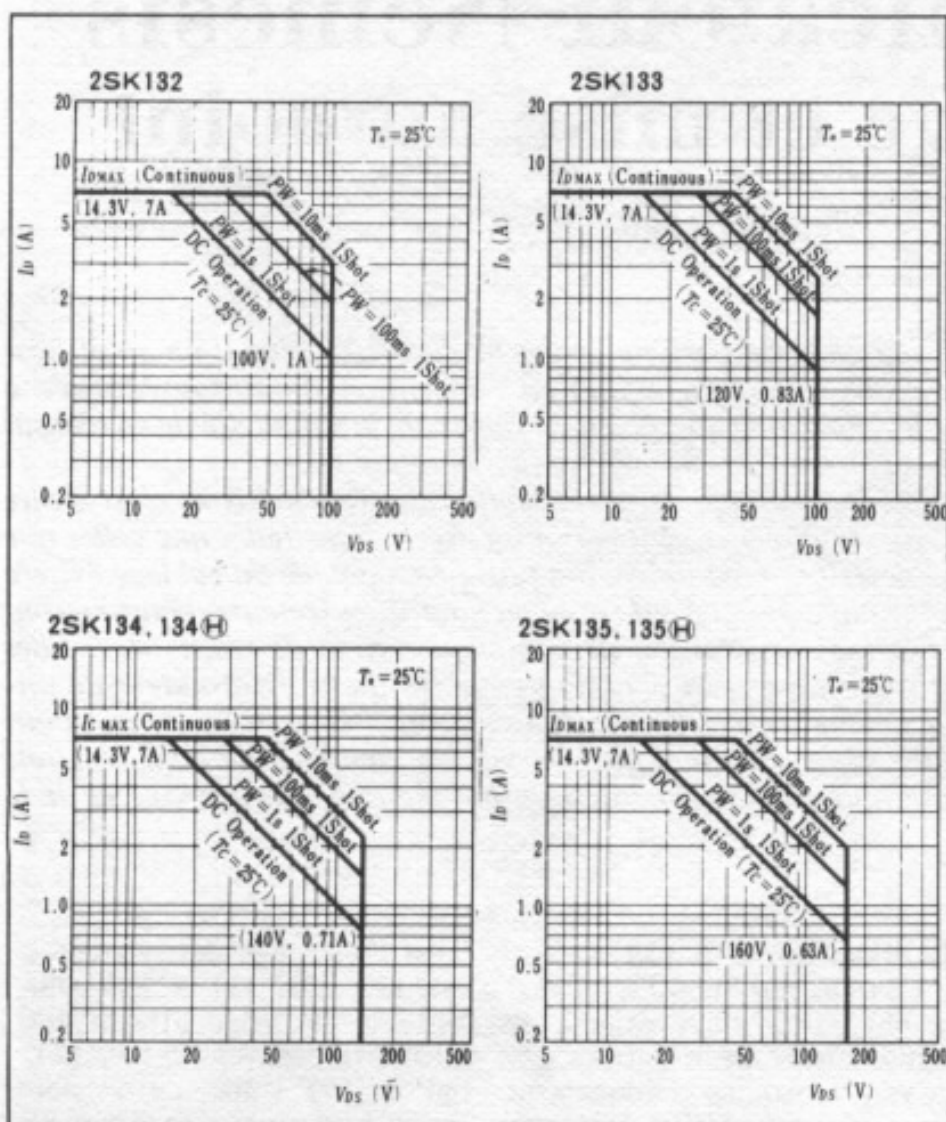


Fig. 1 : Aires de fonctionnement de sécurité des transistors MOS-FET 2SK 132, 2SK 133, 2SK 134 et 2SK 135.

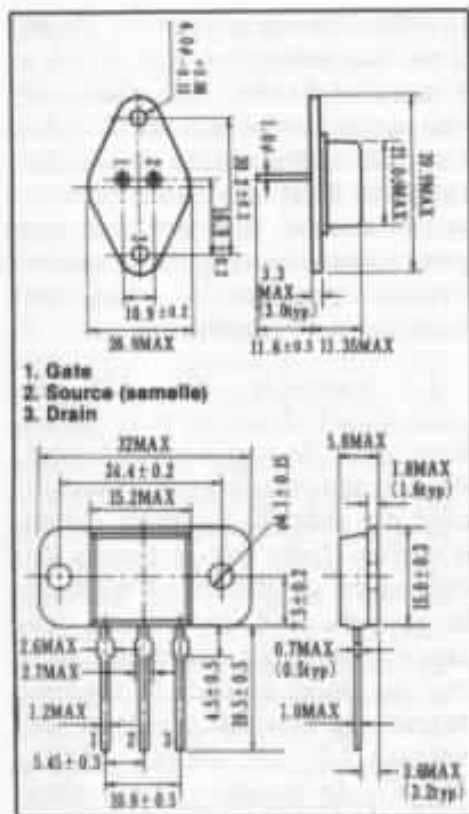


Fig. 2 : Boîtiers des transistors 2SK 135 (A) et 2SK 227 (B), ce dernier, remplacement du 2SK 135 étant une version moulée à semelle métallique.

température de boîtier de 25°C un V_{GS} de 1,8 V produit un courant de drain I_D de 1,025 A. Si, pour une même tension de V_{GS} , la température du boîtier passe à 75°C, le courant de drain I_D n'augmente pas mais diminue et passe à une valeur de 0,72 A. C'est pourquoi, de ce point de vue, la mise en parallèle de plusieurs transistors MOS-FET ne comporte pas les risques des transistors bipolaires, mais produit au contraire une sorte d'effet stabilisateur.

Mais il ne faut pas croire pour autant que cet effet stabilisateur assure des marges de sécurité de fonctionnement très importantes. Il faut encore tenir compte des limites de température que peuvent supporter le boîtier du transistor. La puissance totale de 100 watts annoncée par le constructeur concerne en effet une température de boîtier ne dépassant pas 25°C. En admettant que la température de boîtier passe à

125°C, la puissance totale à ne pas dépasser ne serait plus de 100 watts mais de seulement 18 watts. Dans ces conditions, pour une tension de V_{DS} de 40 V, le courant de drain I_D ne pourrait dépasser 0,45 A sans danger. Le graphe de la figure 3 montre les limites de puissance totale à ne pas dépasser, en fonction de la température du boîtier. Les caractéristiques de SOAR de la figure 1 n'indiquent en effet que les courbes correspondant à une température de boîtier de 25°C, dans le cas d'un fonctionnement en débit continu (classe A ou indication DC opération sur le graphique). C'est pourquoi il est important de tenir compte, lors de l'implantation et du choix des radiateurs des trois paramètres suivants :

- caractéristique I_D/V_{DS}
- caractéristique I_D/V_{GS}
- caractéristique $P_{tot.}/T_c$ à ne pas dépasser.

Dans le cas de l'amplificateur Némésis, la dissipation totale étant de l'ordre de 40 watts, la température du boîtier ne doit pas dépasser 95°C, ceci que l'on tienne ou non compte de l'effet de coefficient de température négatif du 2SK 135. L'important étant de tenir compte de la puissance dissipée réelle et de la température réelle du boîtier en travail continu.

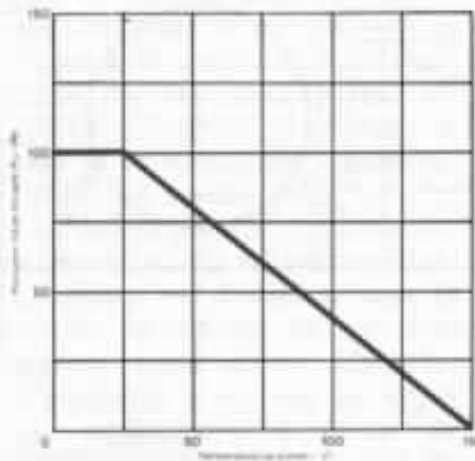


Fig. 3 : Transistor 2SK 135. Dissipation maximale en fonction de la température de fond du boîtier.

Sur l'amplificateur Némésis, les premiers prototypes utilisaient un châssis en aluminium anodisé d'épaisseur 1 mm. Les impératifs de liaisons ultracourtes à réaliser lors du câblage (liaison entrée-gate en particulier) nous ont fait choisir la solution la plus simple consistant à fixer le transistor à plat sur le dessus du châssis, ce dernier faisant office de radiateur.

Des mesures de température effectuées à l'aide d'une sonde ont montré qu'au bout d'une heure de fonctionnement continu, la température du boîtier atteignait 65°C. Ce qui laisse une marge de sécurité suffisante, c'est-à-dire correspondant soit à 25°C supplémentaires, soit à 20 watts dissipés supplémentaires (pour une température de 65°C).

Pour plus de sécurité, la nouvelle version du Némésis, bien que de présentation identique à celle du prototype, utilise un châssis dont l'épaisseur est cette fois de 3 mm. Avec ce nouveau châssis, la température du boîtier passe alors à environ 50°C. Elle passe même à 45°C si l'on supprime la feuille de mica isolante que l'on doit placer normalement sous la semelle métallique du boîtier. De la graisse de silicone permet ainsi une meilleure évacuation de la chaleur émise par le transistor. Cette solution est tout à fait possible dans le cas du Némésis lorsque le réseau de contre-réaction de source est supprimé. La source, c'est-à-dire le boîtier du transistor se trouve alors relié à la masse, donc au châssis de l'amplificateur et la faible distance entre l'entrée et le transistor permet une fixation directe sur le châssis.

Les calculs montrent qu'il serait théoriquement possible, à condition d'abaisser la température du boîtier à 30°C, d'obtenir une puissance modulée proche de 20 watts et de dépasser une dissipation totale de 50 watts.

Le châssis

La figure 4 donne les dimensions et les cotes de découpe à effectuer dans le châssis. Ce châssis mesure 396 mm x 235 mm et sa hauteur est de 42 mm. Le dessus est réalisé à partir d'une plaque d'aluminium pliée, à bords arrondis. La finition est brossée et teintée couleur champagne. Les côtés latéraux et le dessous sont réalisés d'une seule pièce (tôle d'acier d'épaisseur 1 mm, finition noire). L'opération de câblage en est facilitée et on obtient une excellente rigidité lorsque le châssis et le fond sont réunis et vissés ensemble.

Bien que ce châssis spécialement conçu pour le Némésis soit actuellement disponible auprès de La Maison de L'Audiophile, la figure 4 permettra à l'amateur intéressé par cette réalisation de

réaliser lui-même un châssis à partir de plaques, de cornières ou de profilés d'aluminium. Les découpes étant nombreuses, de même que les différents perçages, ces opérations doivent s'effectuer sans pliure ou déformation accidentelle des plaques, ce qui rendrait le châssis peu rigide. N'oublions pas que celui-ci doit supporter un poids important, que le transformateur de sortie pèse 6 kg et le reste pratiquement autant. Les condensateurs électrochimiques sont eux aussi lourds et volumineux puisqu'il s'agit de la série CO 38 fabriquée par Sic Safco (ou série CO 39 ou TFRS). Ces condensateurs ont un diamètre de 76 mm et une hauteur de 153 mm, visserie comprises. Ils sont munis de bornes à vis qu'il est

possible de serrer soit à l'aide d'un tournevis plat, soit à l'aide d'une clef à tube. Les colliers de serrage sont placés sous le châssis, pour une question de présentation et il est important de bien serrer ceux-ci lors du montage pour éviter des risques de courts-circuits pendant le transport éventuel de l'amplificateur.

Le transistor 2SK 135, la prise Cinch d'entrée et le transformateur de sortie sont montés dans le sens transversal et sur un côté du châssis. La prise Cinch d'entrée, fixée sur le dessus du châssis est positionnée à 6 cm de la gate du 2SK 135. Cette distance réduite au minimum permet de placer en série le condensateur de liaison d'entrée, de valeur 2,2 μF (ERO MKC, 250 V), de longueur 3 cm ainsi

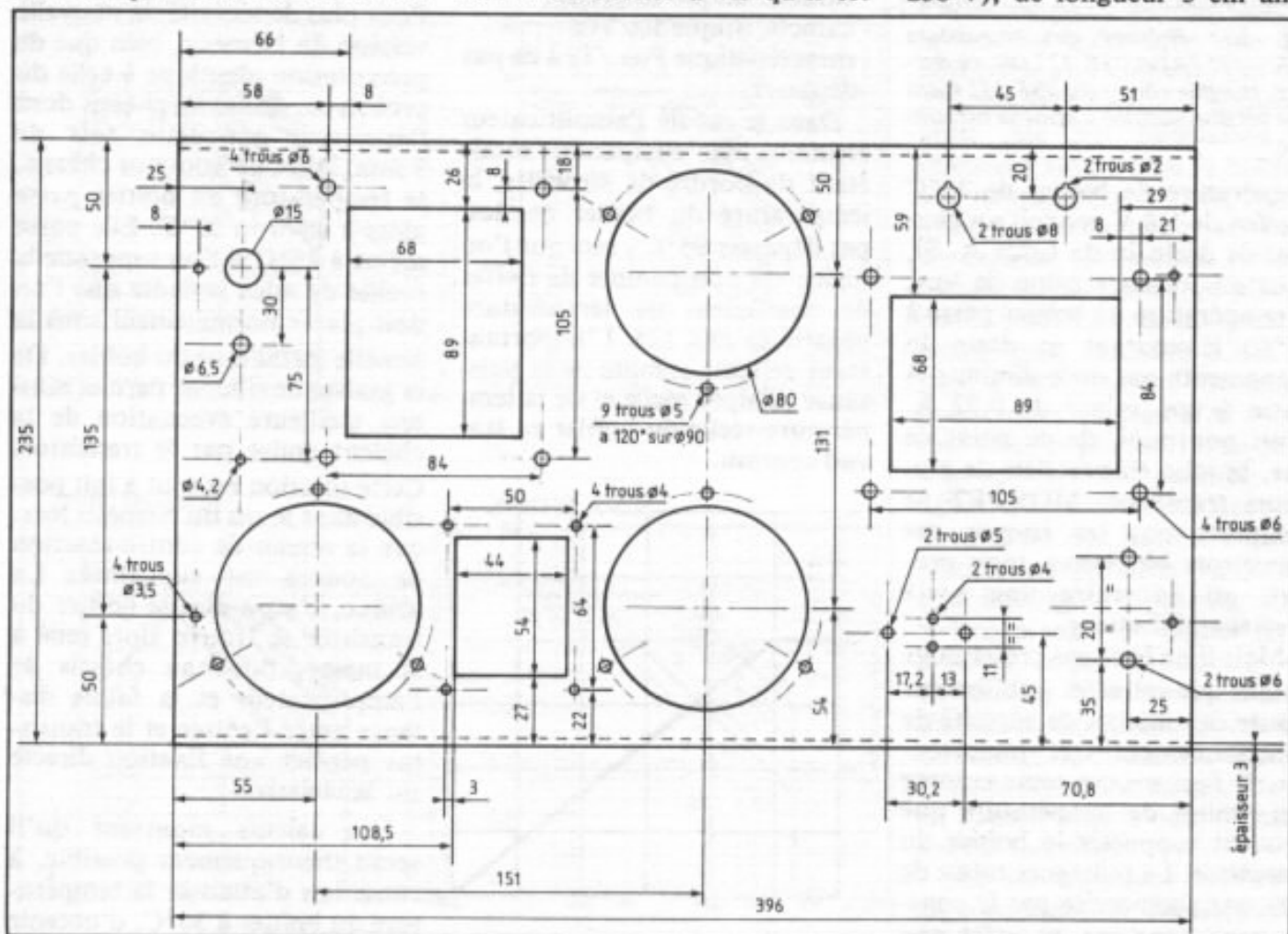


Fig. 4 : Dimensions et cotes de découpe du châssis de l'amplification Némésis. La hauteur du châssis est de 42 mm. De l'aluminium de 3 mm d'épaisseur est utilisé. Le fond, en acier de 1 mm d'épaisseur, est plié sur deux côtés pour former les flasques.

que la résistance d'arrêt (anti-oscillation) de valeur $1,2 \text{ k}\Omega$ (film d'oxyde de tantale). La version décrite ici travaillant sans réseau de contre-réaction, la source (boîtier) est reliée directement à la masse et de la graisse de silicone assure une bonne conduction thermique avec le châssis. Une des vis de fixation du transistor comporte, du côté câblage, une cosse à souder qui viendra se fixer sur la ligne de masse. Cette ligne de masse, constituée d'une tige de cuivre de section rectangulaire (largeur 4 mm , épaisseur $1,2 \text{ mm}$, longueur 49 cm) est pliée à 90° en deux endroits et relie le - du pont redresseur à la cosse à souder de la prise Cinch. La partie médiane de la section droite de cette tige est soudée sur une bande de cuivre qui relie les connexions - des deux condensateurs électrochimiques de $100\ 000 \mu\text{F}$ 40 V . Cette bande de cuivre, de longueur $15,5 \text{ cm}$ (largeur 13 mm et épaisseur 1 mm) permet un serrage très efficace des vis de connexion des bornes des condensateurs, ce qui permet de profiter au mieux des possibilités de ces condensateurs. Une seconde bande de cuivre, de même largeur et de même épaisseur mais moins longue (14 cm) relie les bornes + des deux condensateurs. Noter que le point froid de l'enroulement primaire doit être relié au + de l'alimentation. On pourra donc éventuellement rajouter une troisième bande de cuivre pour former une ligne positive d'alimentation en forme de « T ». Dans ce cas on pourra soit visser, soit souder ensemble les deux bandes, la bande à ajouter devant avoir alors une longueur de 9 cm . Ajoutons à ce propos que pendant toute l'opération de câblage et de soudure il n'est pas conseillé de serrer les vis maintenant la tige et les bandes de cuivre sur les condensateurs de filtrage. L'opération de soudure n'en serait que plus dif-

ficile et un échauffement excessif des armatures de ceux-ci pourrait conduire à une perte de fiabilité. D'autre part, un fer à souder de puissance égale ou supérieure à 100 watts est conseillé pour les soudures à effectuer sur la tige et sur les bandes de cuivre. Pour réussir les soudures sur celles-ci il est important d'avoir une panne de fer en état de parfaite propreté et de bien chauffer les plaques avant d'appliquer la soudure. Dans ce cas, la soudure doit pouvoir fondre directement sur la plaque de cuivre, à proximité de la panne du fer, le flux de soudure assurant alors un décapage très efficace. Il est navrant de constater que des soudures ratées ou tout simplement « collées » ne sont pas rares et limitent la fiabilité et les performances du montage.

Les petits composants passifs, condensateurs et résistances ne sont qu'au nombre de 12. Cinq d'entre eux sont réservés à la maîtrise des oscillations parasites. Les lecteurs remarqueront des modifications des valeurs de ces composants par rapport à celles publiées dans le numéro 34. Ainsi, le réseau $47 \text{ k}\Omega / 0,1 \mu\text{F}$ disposé entre la gate et le drain, fait place à un nouveau réseau série de valeur $1 \text{ M}\Omega / 0,047 \mu\text{F}$, lequel est soudé directement sur les bornes du transistor. Le condensateur de 10 pF qui était placé en parallèle sur ce réseau a été supprimé et est remplacé par un condensateur de 220 pF qui prend place entre la gate et la source du transistor. Enfin, un réseau série $1,5 \text{ k}\Omega / 1 \mu\text{F}$ prend place en parallèle sur le primaire du transformateur. Ce réseau est destiné à lisser la courbe de réponse du transformateur entre 20 et 100 kHz . L'ensemble a été mis au point sur oscilloscope à partir de signaux carrés. Dans le cas du Némésis, il est difficile de dissocier les différents facteurs conditionnant l'état d'instabilité (ou

de début d'instabilité). En effet, la mesure de bande passante ou de phase du transformateur ne peut être faite que dans les conditions réelles de fonctionnement. La mesure effectuée sous un courant continu primaire très faible (quelques mA) procure une linéarité parfaite entre 10 Hz et près de 300 kHz . Par contre sous 1 A , la valeur de la self primaire chute, limite la bande passante aux fréquences basses et produit également des rotations de phase au-dessus de 15 kHz . Au-dessus de cette fréquence, on ne peut plus considérer le transistor comme étant chargé par une charge selfique pure, vu qu'il faut tenir compte des capacités, résistances et selfs parasites. De ce fait, le remplacement du premier transformateur de sortie, encore à l'état de prototype au moment de la mise sous presse du n° 34, par la version définitive du même transformateur a suffi pour nous obliger à réviser les valeurs initiales des composants passifs concernés. Dans la situation actuelle, il n'a cependant pas été possible de maîtriser parfaitement les débuts d'oscillation haute fréquence en présence du réseau de contre-réaction de source. Il semble s'agir d'un problème de capacité parasite primaire/secondaire provenant d'un couplage trop serré, lui-même étant destiné à minimiser au mieux les pertes entre ces deux enroulements. Le rétablissement de la stabilité entraînait en effet une limitation assez sévère de la bande passante qu'il aurait fallu limiter à environ 15 kHz (à -2 dB). D'autres expérimentations permettront de savoir ultérieurement s'il est possible d'aboutir à un bon compromis tout en conservant le même transformateur de sortie. En l'absence de contre-réaction, le circuit est avantagé par une bonne sensibilité moyenne d'entrée (soit 1 V pour 10 W en sortie) tandis que l'application

de la boucle de contre-réaction (voir schéma du n° 34), avantageuse sur le plan de la distorsion (qui passe au 1/3 de sa valeur initiale) et de la largeur de bande passante, entraîne par contre une perte importante de cette sensibilité d'entrée (qui passe alors à 3 V). Bien que l'amplificateur conserve des performances très étonnantes dans les gammes des fréquences médium et aigues, l'absence de contre-réaction entraîne une baisse sensible du facteur d'amortissement qui passe de 15 à une valeur proche de 1. De ce fait, un haut-parleur relié à la sortie de l'amplificateur se trouvera beaucoup moins amorti, ce qui conduira celui-ci à une tendance à suramplifier subjectivement les fréquences graves, comme l'explique la figure 5. C'est ce facteur d'amortissement qui est responsable en partie d'une différence «d'ampleur sonore» constatée entre les amplificateurs à tubes (dont le facteur d'amortissement est souvent inférieur à 40) et les amplificateurs transistorisés fortement contre-réactionnés (pour lesquels le facteur d'amortissement peut dépasser 200).

Les composants passifs

Les résistances sont limitées au nombre de 5. Les modèles utili-

sés, de puissance 1/2 W sont les traditionnelles résistances à couche d'oxyde de tantale, de tolérance 1 %. Dans le cas du montage décrit ici, il a été utilisé une résistance de 1 M Ω de 1 W, tolérance 5 % à film de carbone ainsi qu'une résistance de 10 k Ω de même type pour l'élément placé entre la sortie de la self de filtrage et les diodes Led servant à la polarisation de la gate à 2,4 V. Le condensateur de 2,2 μ F placé en parallèle sur l'électrochimique de 6 800 μ F 10 V est de marque Ero et de type MKC, l'isolement de celui-ci étant de 250 V. Le même type de condensateur est utilisé en entrée, en tant que condensateur de couplage. Le condensateur de 0,047 μ F est d'origine ITT, de type PMT/2R. Le condensateur de 1 μ F qui vient prendre place, avec la résistance de 1,5 k Ω , sur le primaire du transformateur de sortie est d'origine Rifa, de type MKC, tension d'isolement 160 V. Quant au condensateur de 6 800 μ F 10 V, celui-ci de type électrochimique en version taille basse à faible résistance série, est d'origine CEF.

En raison de la valeur élevée des condensateurs de filtrage, un pont redresseur d'ampérage élevé a été utilisé, afin de suppor-

ter le courant transitoire d'allumage. Sur la version décrite ici, un modèle d'origine japonaise, de marque IR (International Rectifier) et de référence PB 102F. Il s'agit d'une version spéciale pour applications audio à très faible temps de recouvrement inverse, conçue pour éviter la génération de pics parasites que l'on peut mettre en évidence sur les diodes au silicium conventionnelles. La liaison entre le drain du 2SK 135 et le point chaud du primaire du transformateur de sortie utilise un câble d'origine Isoda, de technologie hybride. Il en est de même pour les deux liaisons reliant les bornes de sortie au secondaire de ce transformateur. Ces câbles de technologie hybride utilisant de l'aluminium (outre trois autres métaux et alliages), il est nécessaire d'effectuer un pré-étamage de ces câbles à l'aide de soudure spéciale, genre Alusol 45D.

Les autres liaisons internes utilisent du câble multibrins de section 1,5 et 2,5 mm². Le fusible est un modèle de 5A. Une des diodes, Led de diamètre 3 mm, est montée en série avec la diode BVY 95 et fait office de témoin lumineux. Noter que ces diodes ainsi que le transistor 2SK 135 possèdent de légères dispersions, ce qui peut conduire à de légères dispersions du courant I_D ou de la tension de polarisation. La valeur de la self de filtrage passe 0,2 H (contre 0,15 H sur le prototype) la résistance série étant de 0,8 Ω . La chute de tension aux bornes de cette self doit être normalement de l'ordre de 0,9 V à 1 V. Ajoutons, à propos de cette self de filtrage placée en tête, que celle-ci est d'une très grande efficacité. Les résidus de filtrage, formant des dents de scie, déjà fortement atténués après le pont redresseur en raison de la valeur élevée du premier condensateur de filtrage disparaissent totalement après la self de filtrage. Un effet aussi

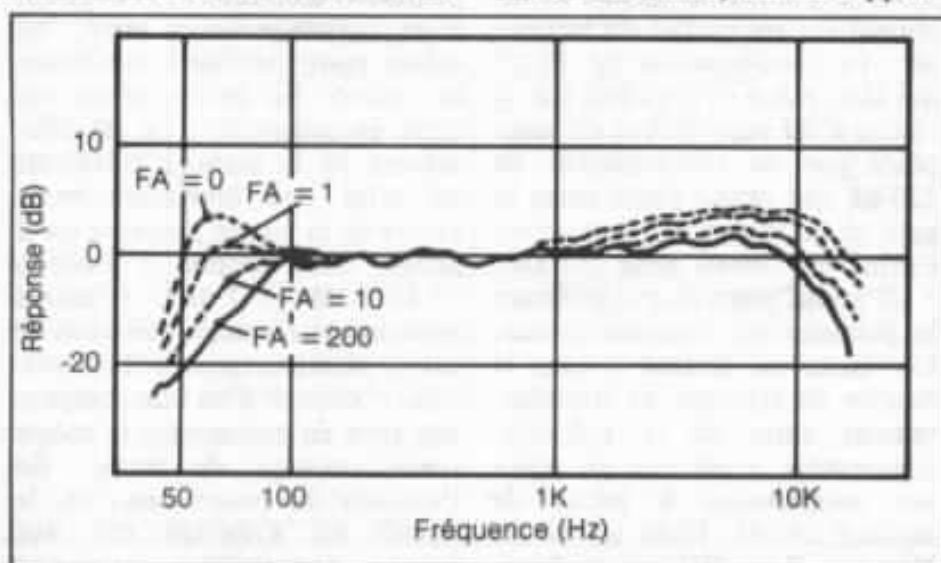


Fig. 5 : Effet du facteur d'amortissement sur la courbe de réponse niveau/fréquence du haut-parleur.

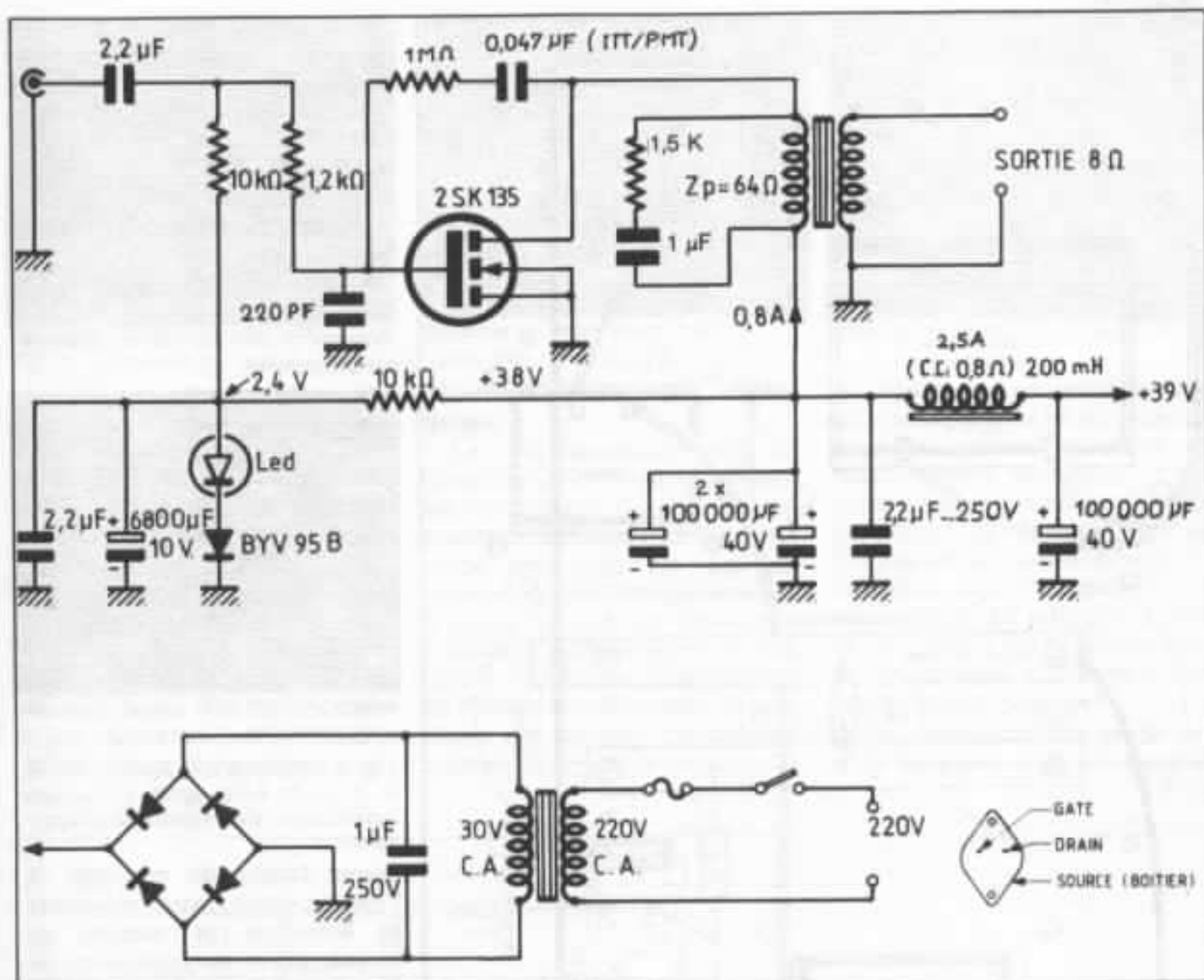


Fig. 6 : Circuit de l'amplificateur de puissance Némésis dans sa version définitive. Les deux réseaux RC sur le primaire du transformateur de sortie d'une part et entre gate et drain d'autre part, ont pour rôle de stabiliser le montage ainsi que la capacité de 220 pF entre la gate et la masse. L'alimentation a gagné en capacité : les 33 000 $\mu\text{F}/40\text{ V}$ de la version préalable sont remplacés ici par des 100 000 $\mu\text{F}/40\text{ V}$. Il est toutefois possible de réaliser l'alimentation sur les bases précédemment décrites soit pour des raisons de budget, soit pour des raisons d'encombrement.

marqué n'aurait pu être obtenu si cette self avait été remplacée par une résistance de 0,8 à 1 Ω . Sur ce point, il est regrettable de constater que les amplificateurs transistorisés d'aujourd'hui n'utilisent pas de self de filtrage, que les étages de puissance sont très souvent alimentés directement à partir de la sortie redresseur, les étages d'entrée et driver étant par contre reliés à des alimentations régulées.

Réponse aux signaux carrés

La figure 8 montre des photos représentant la réponse aux

signaux carrés de l'amplificateur Némésis, obtenus après optimisations des valeurs des réseaux stabilisateurs et anti-oscillation. Malgré la présence du transformateur de sortie, la réponse est excellente et on remarque qu'il a été possible d'annuler presque totalement tout résidu d'instabilité haute fréquence, ceci même à 20 kHz. La difficulté dans cette mise au point réside dans l'obtention de la bande passante la plus large possible associée à un temps de montée très bref du signal carré, ce signal ne devant pas présenter pour autant de

trace de dépassement ou de suroscillation.

Réponse sur signal sinusoïdal

Celle-ci est excellente, même à 200 Hz ou l'on est pourtant proche de la coupure basse (70 Hz à -2 dB). A 40 kHz, la forme du signal reste parfaite, la coupure se situant à 95 kHz (-3 dB) (figure 9). L'ensemble de ces résultats est étonnant compte tenu du fait que le circuit n'utilise aucun circuit de contre-réaction négative.

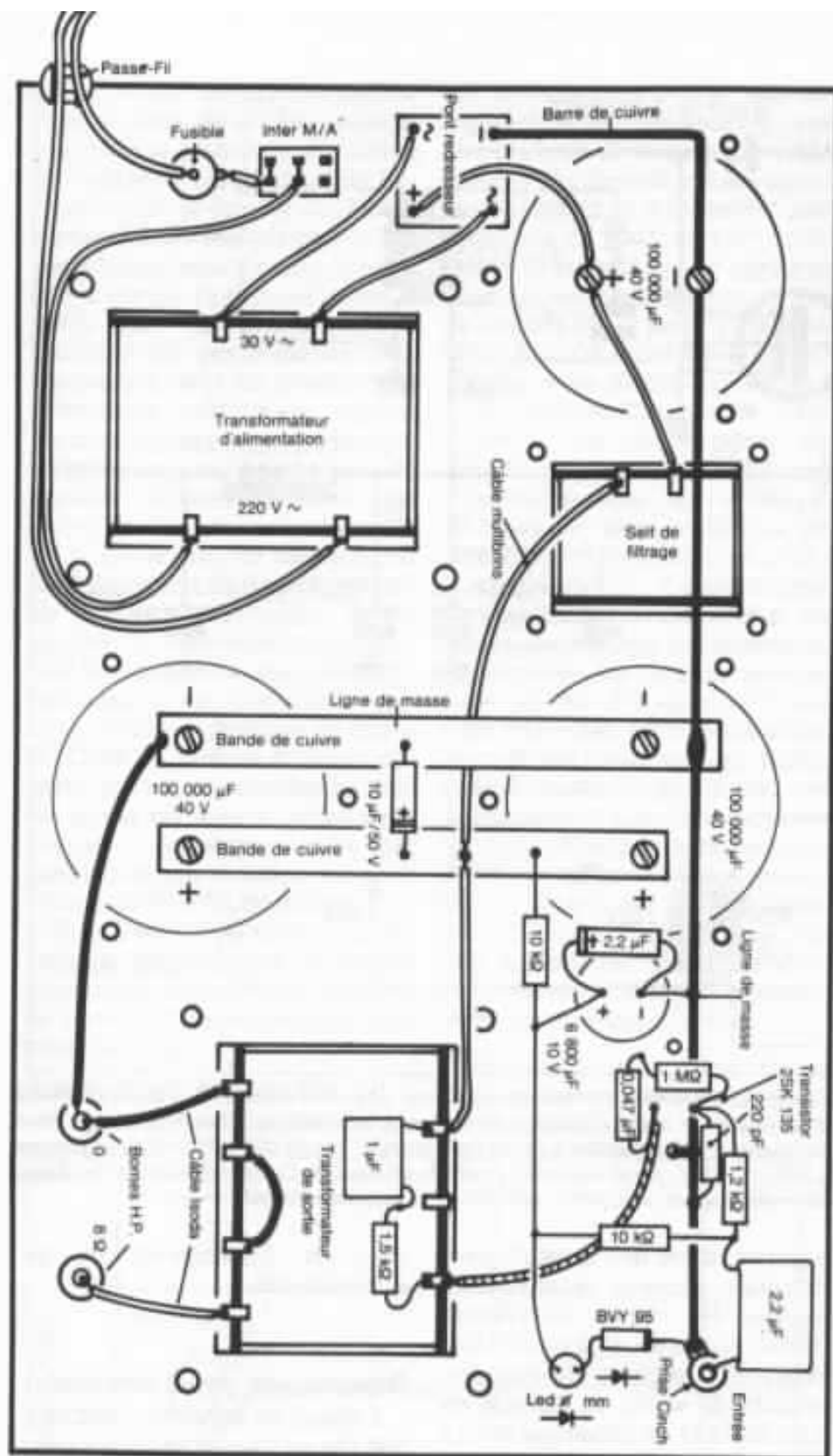
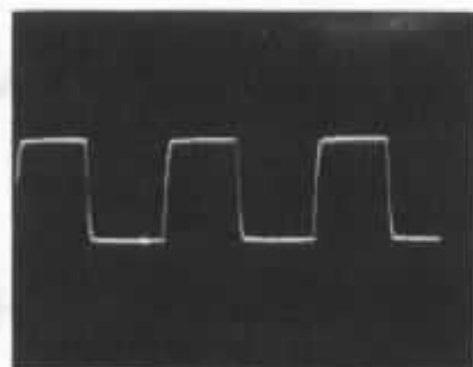


Fig. 7 : Implantation des composants et câblage de l'amplificateur Némésis.

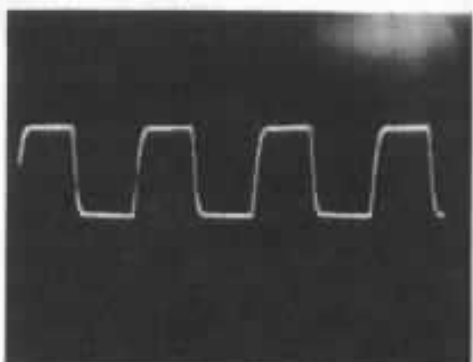
Conclusion

Si l'amplificateur Némésis est une réalisation unique sur le plan de la simplicité du montage, c'est aussi un appareil volumineux et très lourd par rapport à la puis-

sance de sortie disponible. Le taux de distorsion harmonique introduit est relativement élevé et le circuit présente une chute assez rapide de niveau au-dessous de 100 Hz. Ce sont des



Réponse à 10 kHz (après nouvelle compensation).

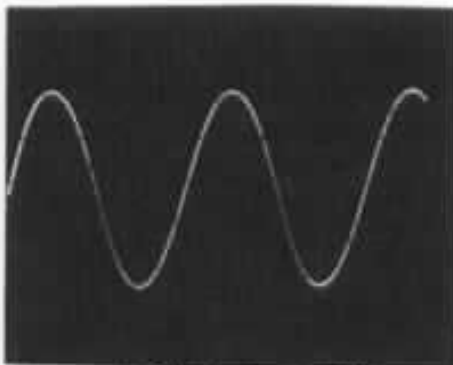


Réponse à 20 kHz (après nouvelle compensation).

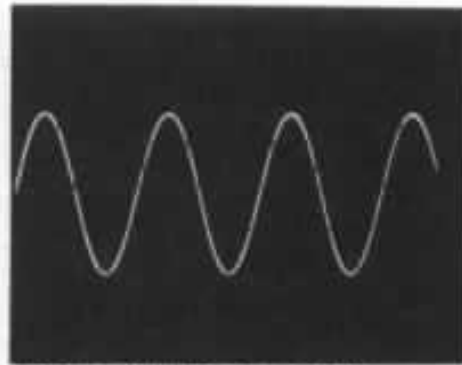
Fig. 8 : Réponse aux signaux carrés, à 10 et 20 kHz, après la nouvelle optimisation des réseaux de compensation.

points faibles du montage. A l'écoute, on ne ressent cependant ni sensation de manque de niveau grave ni impression de distorsion harmonique élevée. C'est justement le point fort du circuit Némésis qui surclasse largement la concurrence sur les critères de transparence sonore et d'absence de distorsion subjective. C'est pourquoi les essais sur un système tri-amplifié se sont révélés remarquablement bons, en s'en tenant toutefois à l'utilisation du Némésis dans le médium et l'aigu, les enceintes étant de type à haut rendement.

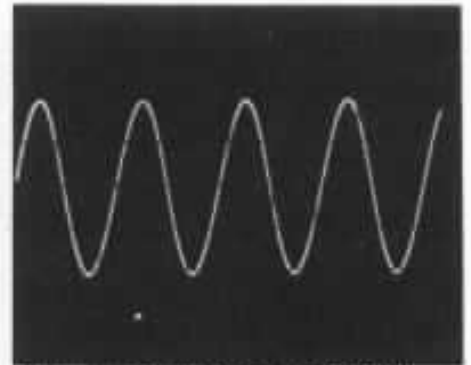
Le hasard et la chance ont rendu possible l'écoute de l'amplificateur WE 25B, décrit dans le n° 34 de L'Audiophile, qui faisait partie de la collection de Mr Verdier (que nos lecteurs connaissent par ses articles et surtout par la table de lecture de très haut de gamme de sa conception). Bien qu'il s'agisse d'un



Réponse à 200 Hz (sous 3 W).



Réponse à 1 kHz (sous 3 W).



Réponse à 40 kHz (sous 0,3 W).

Fig. 9 : Réponse sur signal sinusoïdal, entre 200 Hz et 40 kHz.
amplificateur conçu vers 1920, équipé de condensateurs de filtrage de seulement $2 \mu\text{F}$, les résultats d'écoute se sont révélés stupéfiants, compte tenu du fait qu'une très haute qualité de reproduction était obtenue sur une largeur de bande nettement plus étroite que celle que peut assurer le montage Némésis. Ce sont des expériences passionnantes qui feront d'ailleurs l'objet d'une démonstration publique le 8 juin 1985 à Paris.

Montage push-pull «Quadrige»

La version push-pull de l'amplificateur Némésis, baptisée «Quadrige» possède le gros avantage d'utiliser un étage de sortie push-pull. Ce qui, en classe A, élimine les phénomènes d'appels de courant transitoire sollicitant l'alimentation et son taux de régulation. D'autre part, on élimine du même coup le problème du passage du courant continu traversant le primaire, le

passage en sens contraire du courant continu dans les deux demi-primaires évitant les effets de magnétisation des tôles. Il est alors possible d'éliminer l'entrefer (dont la largeur est de 0,4 mm sur le transformateur du Némésis) et d'augmenter la valeur de la self primaire. Celle-ci, de 200 mH sur la version simple étage passe à plus de 2,5 H sur la version push-pull.

La version choisie parmi les trois solutions proposées sur la

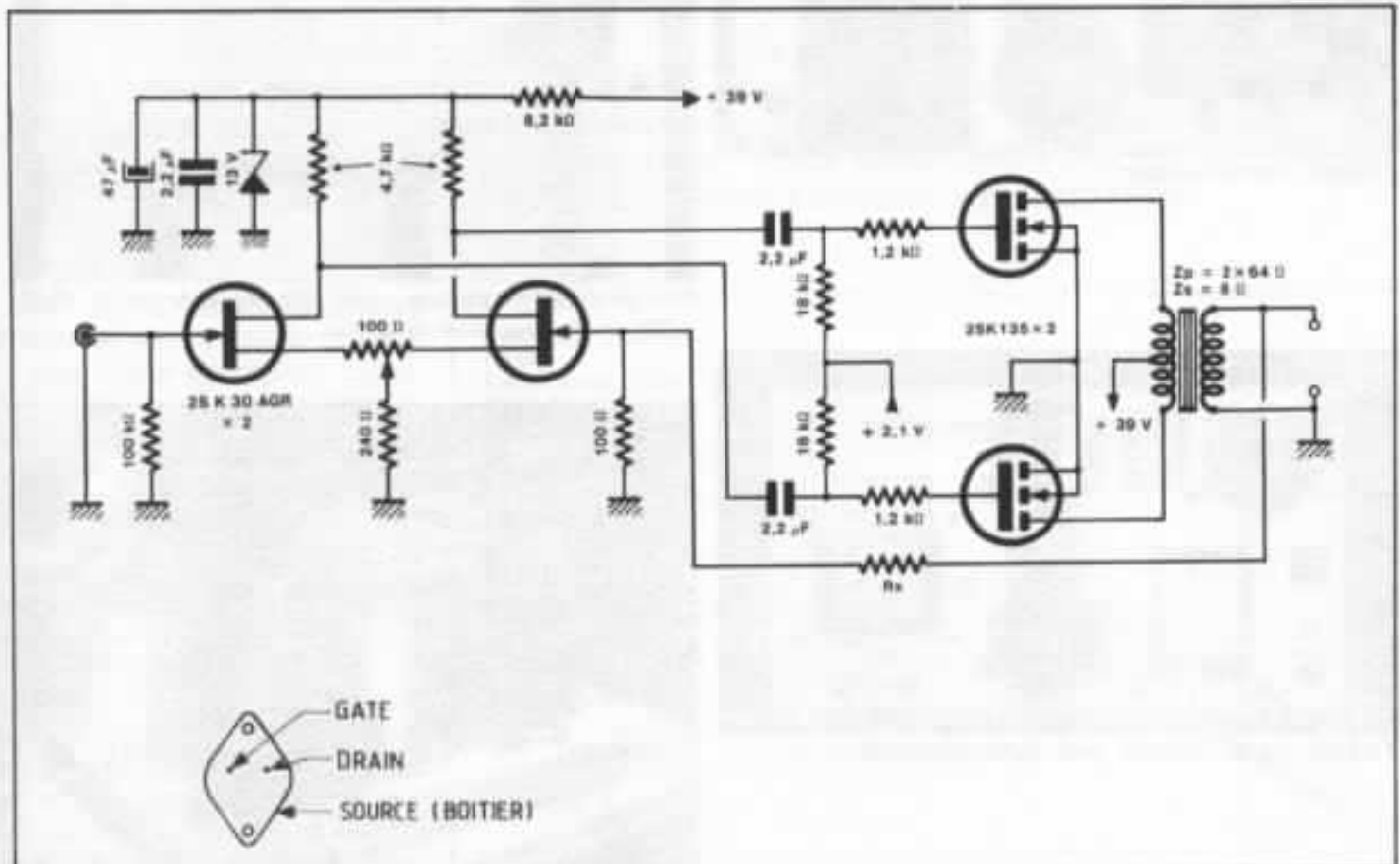
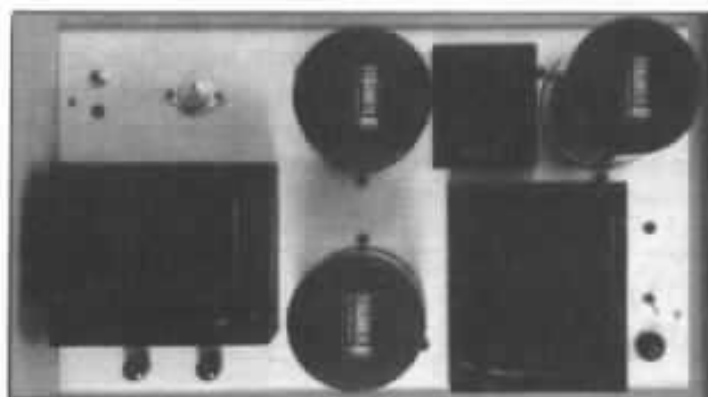


Fig. 10 : Schéma théorique de l'amplificateur à 4 transistors «Quadrige».

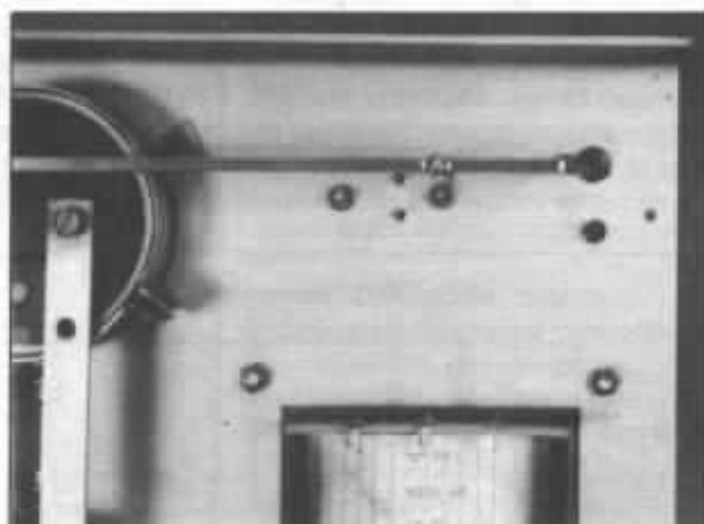
figure 17 (L'Audiophile n° 34, page 21) est le schéma C, qui utilise un étage d'entrée différentiel. Ce type d'étage combine les avantages d'une haute impédance d'entrée, de faible taux de distorsion et offre un taux de réjection en mode commun (CMRR) élevé. La sensibilité d'entrée moyenne de l'amplificateur devant se situer aux alentours de 0,7 V pour des raisons pratiques d'utilisation, le choix du transistor d'entrée s'est porté vers le 2SK 30 AGR, un transistor à effet de champ de qualité remarquable, mais n'existant malheureusement pas sous la forme d'un boîtier double à éléments appairés. Ce qui est le cas

du 2S 243-2 ou du 2SK 240 pour lesquels la valeur du G_m est cependant trop élevée. Les premiers essais vont se porter sur des valeurs de 4,7 k Ω pour les 2 résistances de charge de drain. La polarisation est fixée à - 0,6 V, correspondant à peu de choses près au point le plus favorable vis-à-vis des variations de température. Les transistors de sortie sont polarisés sous + 2,1 V, ce qui devrait permettre d'obtenir un travail en pure classe A et une puissance de sortie de l'ordre de 20 W. Une commutation en classe AB peut également s'envisager, le courant de repos passant alors à 67 mA (soit une polarisation de + 0,58 V).

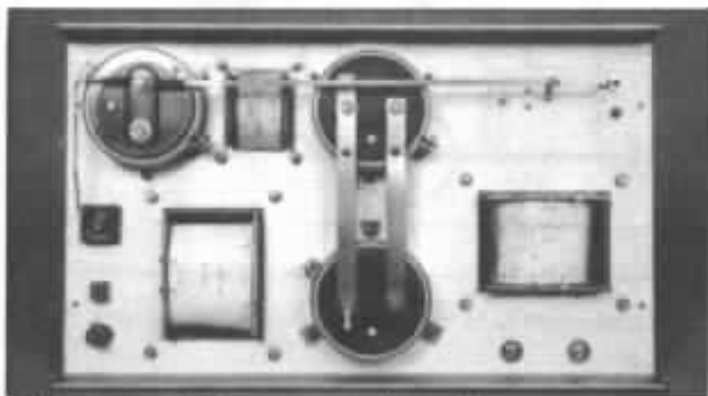
C'est le point qui correspond en effet à l'annulation totale du coefficient de température (pour des variations comprises entre 0°C et + 120°C). La figure 8 montre l'aspect du montage «Quadrige», du moins dans sa version théorique. Il est fort probable que les valeurs des composants se trouvent modifiées après la mise au point et que plusieurs circuits stabilisateurs soient introduits dans le circuit. D'autre part, l'étage d'entrée présentant un gain assez élevé, une protection devra être introduite afin d'éviter de porter les gates des 2SK 135 à des valeurs supérieures aux limites de sécurité de fonctionnement.



Châssis, vue de dessus.



Vue de détail du châssis : 2SK 135, ligne de masse, diode LED, transformateur de sortie.



Châssis, vu de dessous, avec lignes de masse.



Amplificateur Némésis au banc de mesure.

Les haut-parleurs et leur comportement dynamique

Charles-Henry Delaleu

Qui n'a jamais, lors d'une écoute d'un système électro-acoustique constaté une modification de l'équilibre tonal à différentes pressions acoustiques ? Les haut-parleurs ont-ils un comportement identique à différentes puissances ? Nous allons, afin d'éclaircir ce problème, nous livrer à une étude comparative de deux tweeters à dôme d'origine différente.

En effet, le transducteur d'aigu est sans doute le maillon le plus faible en régime transitoire dans une enceinte acoustique. Pour des raisons mécaniques, un haut-parleur d'aigu se doit d'être de taille réduite et l'équipage mobile doit posséder une masse mobile la plus réduite possible. Toute autre configuration entraîne automatiquement une chute notable dans le haut du spectre. Les caractéristiques techniques d'un haut-parleur sont extrêmement nombreuses et ne se limitent point à la fréquence de résonance, la courbe de réponse, et la courbe d'impédance. Bien d'autres variables ont une importance prépondé-

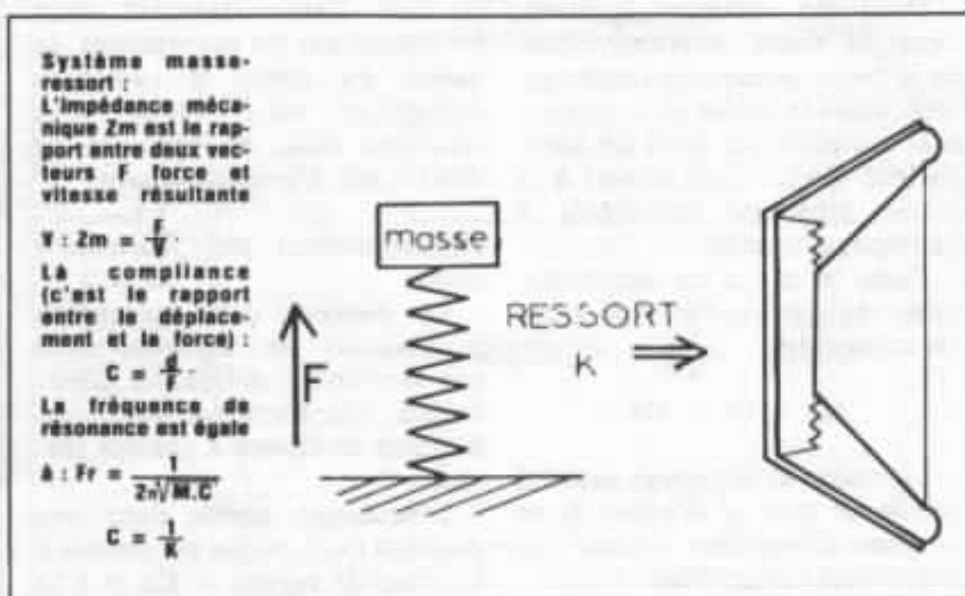


Fig. 1 : Le système masse ressort, principe de base du fonctionnement mécanique d'un haut-parleur.

rante. Que ce soit le comportement en régime transitoire, la réponse en phase ou la réponse en puissance, peu de constructeurs indiquent dans leur documentation de tels renseignements.

Rappel de mécanique

Soit une masse suspendue par l'intermédiaire d'un ressort, nous allons écarter cette masse de sa position d'équilibre.

La masse est ramenée par une force de rappel F

$$F = -Kx$$

F = Force

K = Raideur

x = Elongation

S'agissant d'un mouvement oscillatoire,

$$\omega = \frac{K}{m}$$

$$\text{Rappel } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

ω = pulsation

T = période

$$\text{d'ou } T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$$

Energie d'une masse en vibration :

Dans un système oscillant, l'énergie passe alternativement de la forme potentielle (emmagasinée dans le spider et la suspension périphérique dans un haut-parleur électro-dynamique) à la forme cinétique (appliquée à l'équipage mobile).

Dans le cas d'un amortissement négligeable, l'énergie totale est conservée.

$$E_p + E_c = \text{cte}$$

La masse m (équipage mobile) oscille de part et d'autre de sa position d'équilibre suivant un mouvement sinusoïdal :

$$x = a \sin \omega t$$

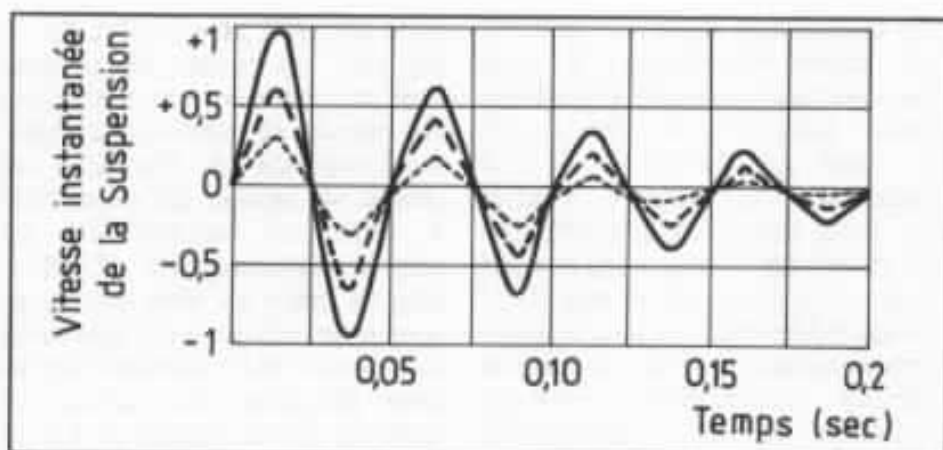


Fig. 2 : Influence de l'amortissement, caractéristiques de la résistance mécanique des éléments de la suspension. En trait plein nous avons un amortissement faible, c'est la plus grande amplitude. En gros pointillé un amortissement moyen et en petit pointillé un amortissement élevé, c'est la plus faible amplitude.

Amortissement :

Si le signal sonore provoque les oscillations de l'équipage mobile, l'arrêt de la source doit en principe entraîner sans délais de retour de l'équipage mobile en position d'équilibre.

Les mouvements du cône voient leurs amplitudes diminuer au cours du temps. L'énergie qui lui avait été communiquée se trouve entièrement dissipée sous forme de chaleur et de rayonnement acoustique. Il y a amortissement.

L'amortissement est dû à une force qui s'oppose au mouvement. Dans le cas d'un haut-parleur l'amortissement sera provoqué par les suspensions, la masse du cône, la radiation acoustique etc... Nous nous trouvons donc en présence de deux types d'amortissement.

Amortissement par frottement solide

Les éléments de la suspension provoquent un amortissement par frottement solide, ils déterminent une force constante qui diminue la vitesse à chaque instant.

L'équipage mobile dans une position quelconque est soumis à la force de rappel $-Cx$ et à la force de frottement $-f$, l'équation de son mouvement est :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + f + Cx = 0$$

Amortissement par frottement visqueux

C'est un amortissement proportionnel à la vitesse, la force à laquelle se trouve soumis l'équipage mobile a pour valeur

$$-Cx - f \frac{dx}{dt}$$

et l'équation du mouvement s'écrit :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + Cx = 0$$

Cas des grands amortissements

Un haut-parleur électro-dynamique possède une fréquence de résonance propre généralement très marquée (voir la courbe d'impédance d'un haut-parleur). Or, la réponse en fréquence demandée à un transducteur est très large. Son comportement dynamique devra être le moins possible perturbé par la résonance propre de l'équipage mobile.

Soit la figure 3, on observe la relation qui existe entre l'amplitude relative à la résonance et le rapport $\frac{\omega}{\omega_0}$

ω = pulsation à une fréquence déterminée
 ω_0 = pulsation à la fréquence de résonance.

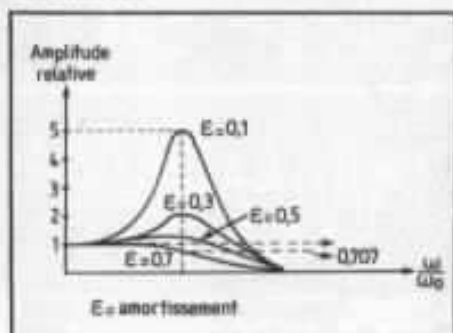


Fig. 3 : Elongation de l'équipage mobile, la fréquence de résonance en fonction du facteur d'amortissement ϵ .

Il est possible de comparer la figure 3 avec la figure 4 qui nous procure le résultat de l'amortissement de l'amplitude de l'équipage mobile à la fréquence de résonance avec le comportement

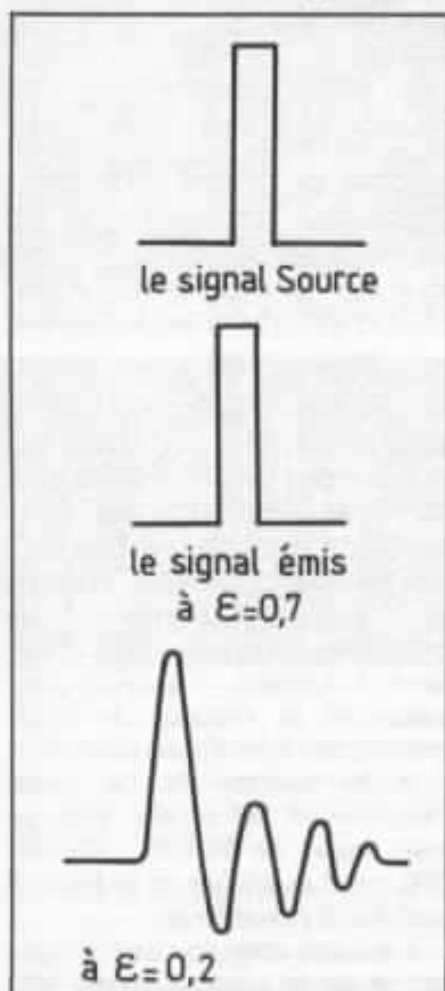


Fig. 4 : Amortissement d'un signal impulsif sur un haut-parleur.

de la pression acoustique à l'extinction d'un signal impulsif.

Analogie électrique et mécanique d'un haut-parleur

Dans le cas d'un haut-parleur électro-dynamique, nous aurons une analogie mécanique et électrique du système vibratoire.

Dans le circuit électrique nous aurons :

- e = tension aux bornes du générateur
- r_{eq} = résistance interne du générateur
- r_{ec} et L = résistance et inductance du haut-parleur
- Z_{em} = impédance motionnelle

Dans le circuit mécanique nous aurons :

- m = masse de l'équipage mobile
- C_m = compliance de la suspension
- r_m = résistance de la suspension, résistance de radiation acoustique
- f_m = force

Le cas d'un haut-parleur

Après ces rappels de base en mécanique, il est facile d'admettre que de ces seuls points de vue la réalisation d'un haut-parleur

n'est pas évidente. Il faut se rappeler que le spectre d'audition est très large. D'un côté, un haut-parleur de grave doit avoir un certain diamètre, une certaine masse mobile et une certaine elongation pour retransmettre les basses fréquences. Il y a donc ici un problème majeur d'amortissement. Dans le cas des tweeters, ce problème sera tout aussi important en regard des accélérations très importantes dues aux hautes fréquences. Dans tous les cas de figures, le front d'attaque d'une impulsion devra être le plus bref possible. De même, à l'extinction du dit signal, l'amortissement sera très critique et un

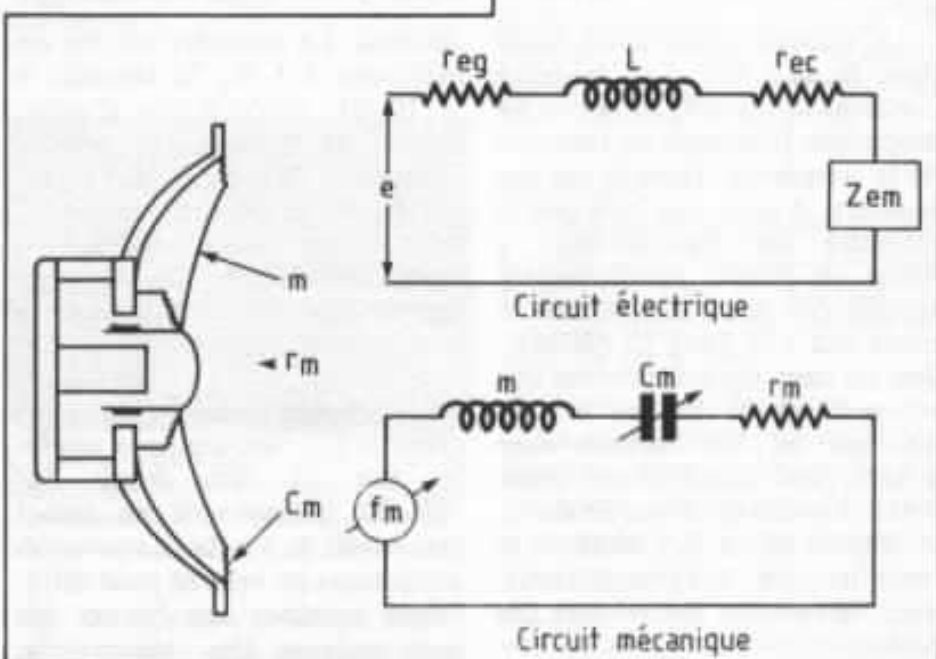
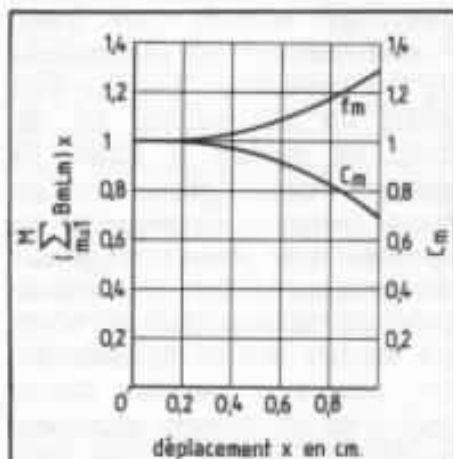


Fig. 5 : Analogie électrique et mécanique d'un haut-parleur électrodynamique.

transducteur parfait ne devrait être sujet à aucune oscillation parasite. Ces critères facilement décelables grâce à un générateur d'impulsion ou de *tone burst* seront observés sur un oscilloscope.

La tenue en puissance

Nous laisserons de côté la tenue en puissance du point de vue thermique qui, dans tous les cas, doit être maximale pour des raisons de fiabilité. Nous aborderons plutôt la partie mécanique qui a une incidence directe sur le comportement acoustique.

La première observation sera effectuée en direction de la symétrie du fonctionnement d'un équipage mobile (ici aussi l'amortissement est directement lié à ce problème). Lorsque l'on excite un haut-parleur sur un banc de mesure à l'aide de signaux carrés, l'observation du signal transmis en phase et en opposition de phase n'est jamais symétrique. En fait, très peu de produits commercialisés n'ont été étudiés sur ce phénomène. Or, cela peut paraître banal, mais il est absolument nécessaire qu'un haut-parleur à l'air libre ait un fonctionnement symétrique.

La seconde observation toute aussi facile à mettre en évidence concerne la linéarité de la courbe amplitude fréquence en fonction de la fréquence. Dans le cas des tweeters, il n'est pas rare que la majorité des haut-parleurs à dôme se trouve complètement saturée dès que l'on franchit la barre des 1 W plus 10 décibels. Soit un haut-parleur possède une efficacité de 92 décibels à 1 W, dès que les 102 décibels sont atteints, le transducteur compresse fortement. Passé ce stade, la courbe ne va pas tarder à se modifier. On imaginera facilement le résultat auditif lors des *fortes*.

La tenue en puissance électrique, thermique, le fonctionne-

ment symétrique de l'équipage mobile, le comportement à hautes pressions acoustiques sont des caractéristiques déterminantes sur le comportement dynamique d'un haut-parleur.

Cas pratique

Deux haut-parleurs à dôme spécialisés dans les hautes fréquences sont testés dans différentes configurations de mesure. Le haut-parleur A est un modèle de la marque Dynaudio portant la référence D28. Le second appelé ici B est réputé et utilisé sur de nombreux modèles d'enceintes à travers le monde.

La première expérience consiste à observer la forme de la courbe de réponse en fonction de la puissance électrique injectée aux bornes des transducteurs (fig. 6). L'échelle est ici de 50

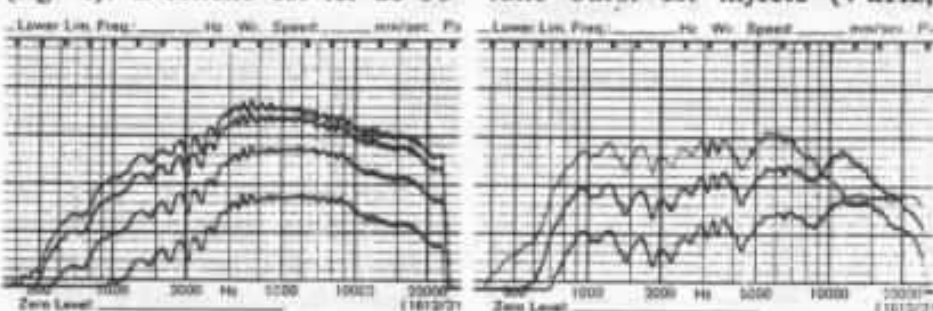


Fig. 6 : Courbe de réponse en fonction de la puissance injectée dans le haut-parleur (balayage sinusoidal 3 s). A gauche le modèle A à droite le modèle B.

décibels. La première courbe est effectuée à 1 W, la seconde à + 10 dB. Il n'y a rien d'anormal. Puis le niveau est encore augmenté de 10 dB. Le haut-parleur A garde son enveloppe, le B chute dangereusement en haut fréquence. Le A peut encore aller plus loin comme le prouve la 4^e courbe.

La seconde expérience (fig. 7) consiste à exciter ces deux modèles par un *tone burst* 10/160 Hz comportant un signal sinusoïdal de 5 kHz. La pression acoustique est relevée pour différentes tensions aux bornes des haut-parleurs. Dès 110 décibels, le tweeter B possède une réponse asymptotique. A 125 décibels,

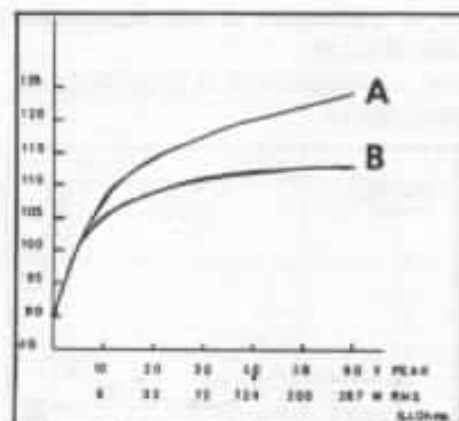


Fig. 7 : Réponse à une excitation en Tone Burst pour deux tweeters différents.

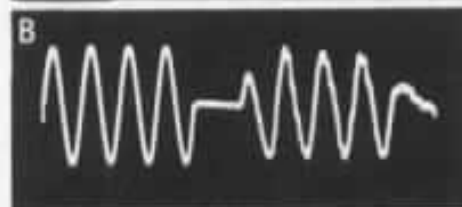
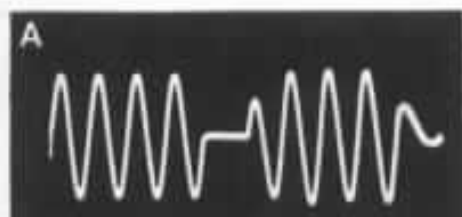
le tweeter A n'est pas encore saturé.

Sur la figure 8, on observe le résultat sur l'oscilloscope. Sur chaque cliché la partie gauche représente le signal d'excitation, la partie droite le signal émis. Un *tone burst* est injecté (4 kHz,

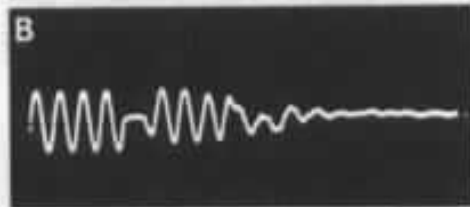
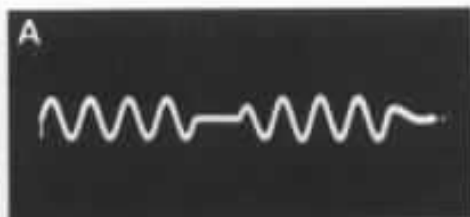
1 ms/500 ms) à 30 V, puis à 50 V crête. A 30 V, le modèle A reste homogène, le B commence à avoir de sérieux problèmes. A 50 W, le signal émis par A est identique à celui émis à 30 V. B lui, est devenu plus que critique. 70 V sont alors injectés au D 28. La puissance est alors de 390 W sous 6,4 ohms, l'amplificateur sature et la réponse du haut-parleur est loin d'être ridicule.

A la lumière de cet essai, l'expérience est refaite avec un *tone burst* de 10 kHz, 0,3 ms/500 ms. Les clichés de la figure 9 parlent d'eux mêmes.

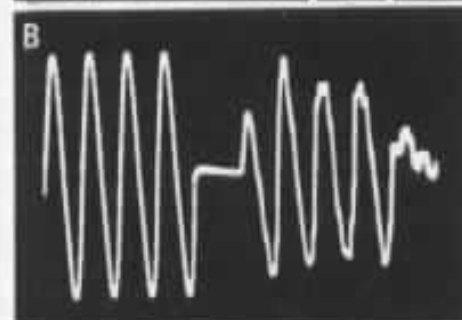
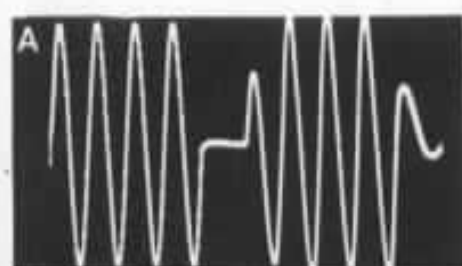
Un autre essai consiste à injecter un signal sinusoïdal de 5 kHz pendant 300 ms, toutes les 3 000 ms. Sous une tension de



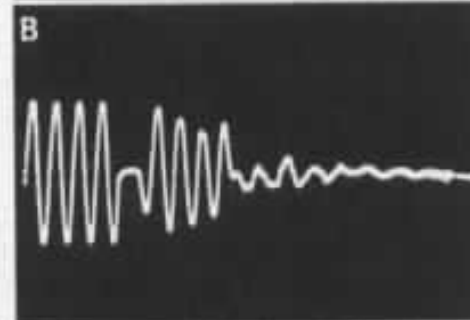
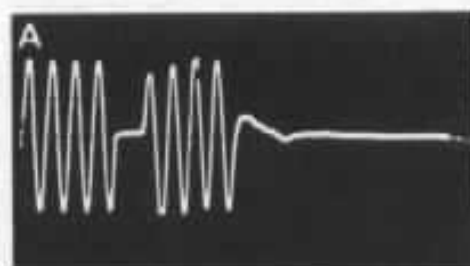
Signal d'entrée 30 V crête - 71 W RMS à 6,4 Ohms - 4 kHz 1 ms/500 ms



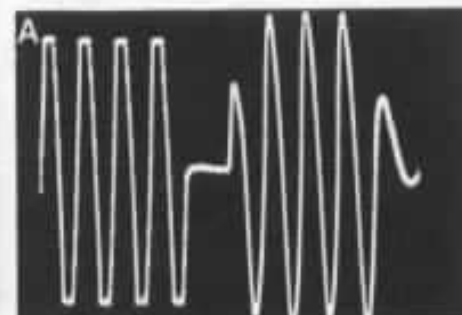
Signal d'entrée 10 V crête - 8 W RMS à 6,4 Ohms - 10 kHz 0,3 ms/500 ms



Signal d'entrée identique mais pour 50 V crête - 200 W RMS à 6,4 Ohms.

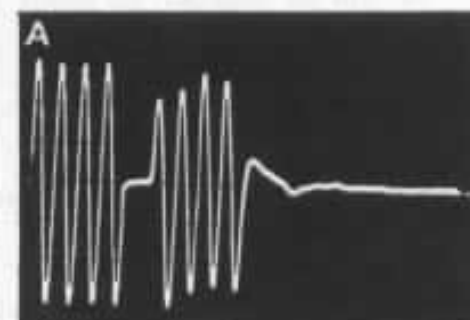


Signal d'entrée identique à ci-dessus mais pour 20 V crête - 31 W RMS à 6,4 Ohms



Signal d'entrée 70 V crête - 390 W RMS à 6,4 Ohms - la saturation observée sur le signal excitation correspond à l'écrêtage de l'amplificateur. Notez que l'émission acoustique reste homogène !

Fig. 8 : Visualisation de la réponse en Tone Burst des modèles A et B. Sur chacun des oscillogrammes la première partie du Tone Burst correspond au signal d'excitation, la seconde au transducteur testé.



Signal d'entrée 50 V crête - 200 W RMS à 6,4 Ohms. Le modèle B n'a pu être testé car il était détruit avant d'atteindre ce niveau.

Fig. 9 : Mêmes expériences que la figure 8 mais avec un signal Tone Burst de 10 kHz, avec les modèles A et B.

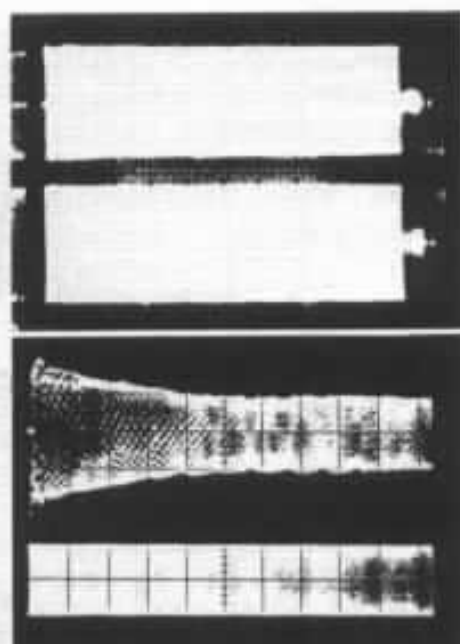


Fig. 10 : Essai des modèles A et B excités par un signal de 30 V crête - 57 W sur 8 Ohms - sinusoïdal de 5 kHz de durée 300 ms et cela à toutes les 3 000 ms. La trace supérieure correspond au signal acoustique, la trace inférieure au signal d'excitation. L'oscillogramme supérieur visualise la réponse du modèle B, l'oscillogramme inférieur celle du modèle A. On notera que ce dernier n'apporte aucune décompression à l'inverse du modèle B.

30 V, soit une puissance proche de 57 W sous 8 ohms, le tweeter B atténue fortement son émission acoustique au bout de 100 ms. Le modèle A n'a aucun problème sous une tension de 30 V, comme de 50 V (fig. 10).

Distorsion

Deux types de mesure de distorsion sont réalisés, dont une effectuée dans le Journal de l'Audio Engineering Society du mois de mars 1985.

Différence de fréquences

La première mesure consiste à injecter deux fréquences aux transducteurs qui sont deux prototypes de la marque Dynaudio, l'un est optimisé, l'autre point. Le premier est sujet à une forte distorsion d'harmoniques deux et trois. Le second possède un amortissement correctement réa-

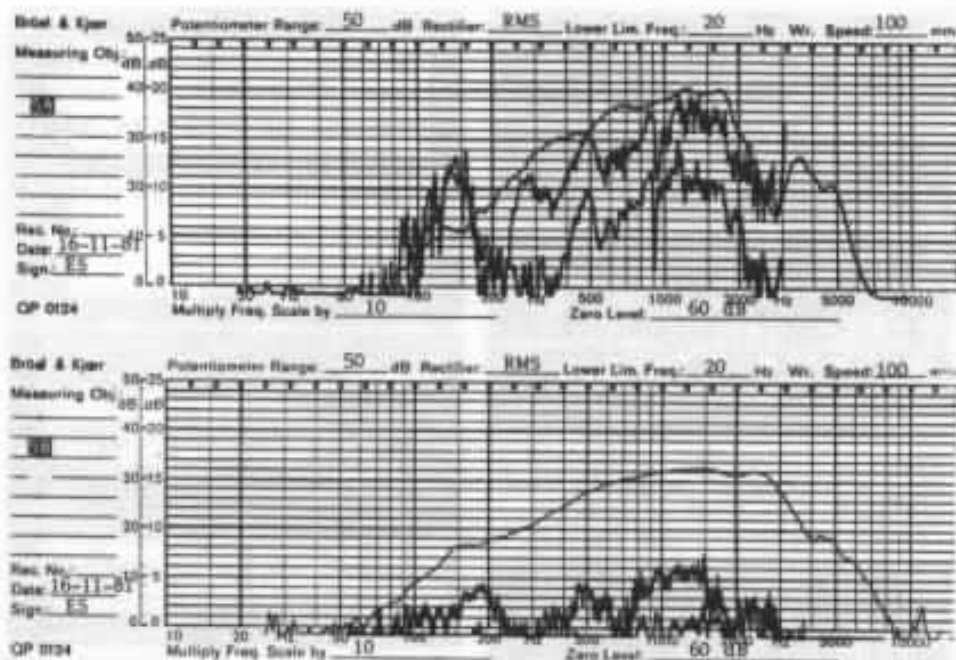


Fig. 11 : Courbe de distorsion mesurée par différence de fréquence pour deux haut-parleurs. Celui du dessus a un fonctionnement mécanique critique, le taux de distorsion est élevé (la courbe supérieure correspond au fondamentale, la courbe médiane à l'harmonique 3 et la courbe inférieure à l'harmonique 5). L'autre haut-parleur testé dont la réponse est visualisée en dessous a un fonctionnement mécanique optimisé.

lisé ainsi qu'un fonctionnement linéaire, voit son taux de distorsion fortement atténué (fig. 11).

Distorsion harmonique à haute puissance

Dans le volume 33 numéro 3 du JAES, M. Ding Yong-Sheng propose une méthode de mesure de taux de distorsion harmonique à haute puissance.

Cette méthode a l'avantage de pouvoir mesurer le taux de distorsion avec une très bonne fiabilité, quelle que soit la puissance injectée aux bornes du haut-parleur.

La distorsion harmonique d'après DYS est donc due en majeure partie à la non-linéarité du haut-parleur et se manifeste de manière plus précise à haute puissance. Il convient donc de réaliser des expériences à haute puissance afin de préciser les caractéristiques d'un transducteur. On observera la parfaite démarche de DYS.

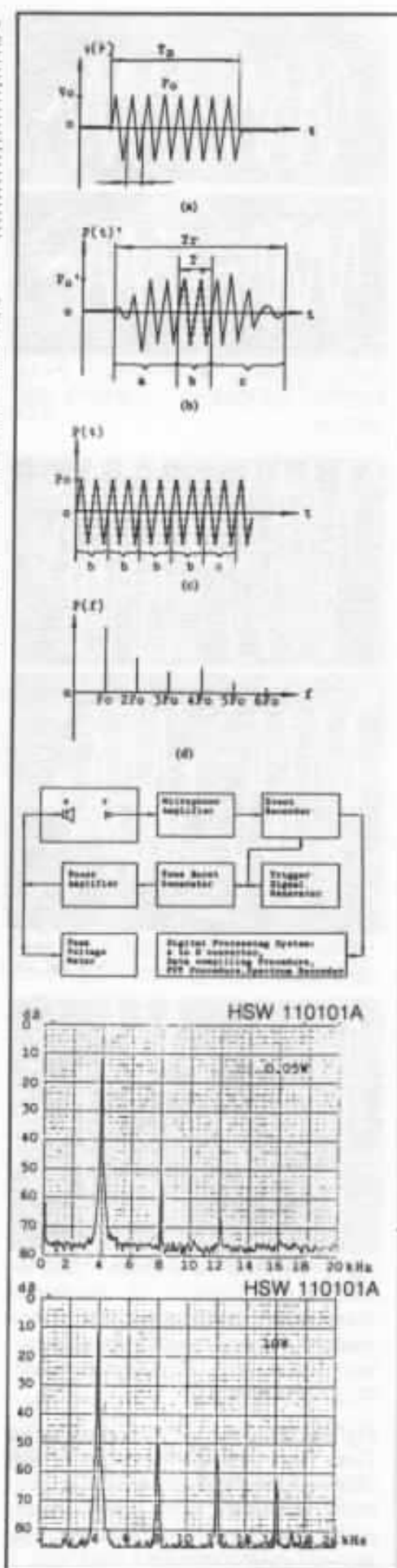
La procédure de mesure consiste à se servir d'un Tone Burst

dont on utilisera uniquement la partie centrale du signal. Cette information est traitée par un analyseur FFT 2033 de Brüel et Kjær. Trois haut-parleurs sont retenus pour cet essai :

- 1) Un tweeter à ruban HSW 110101A
- 2) Un tweeter à dôme BO 5 + 6
- 3) Un haut médium à dôme Dynaudio D52.

Suivant les modèles, les essais sont réalisés à différentes fréquences. Toutefois, les puissances restent identiques (0,05 W, 10 W et 50 W). On observera figure 12 le comportement critique du HSW 110101A. Le BO reste dans la bonne moyenne. Le D52 reste remarquable, même à 50 W.

Nota : Dans ce même numéro du JAES, un article fort intéressant de M. Fincham (KEF) décrit la méthode de mesure des haut-parleurs par réponse impulsionnelle pris par transformé de Fourier rapide. L'auteur met en garde les lecteurs sur la valeur de la tension injectée au tweeter lors



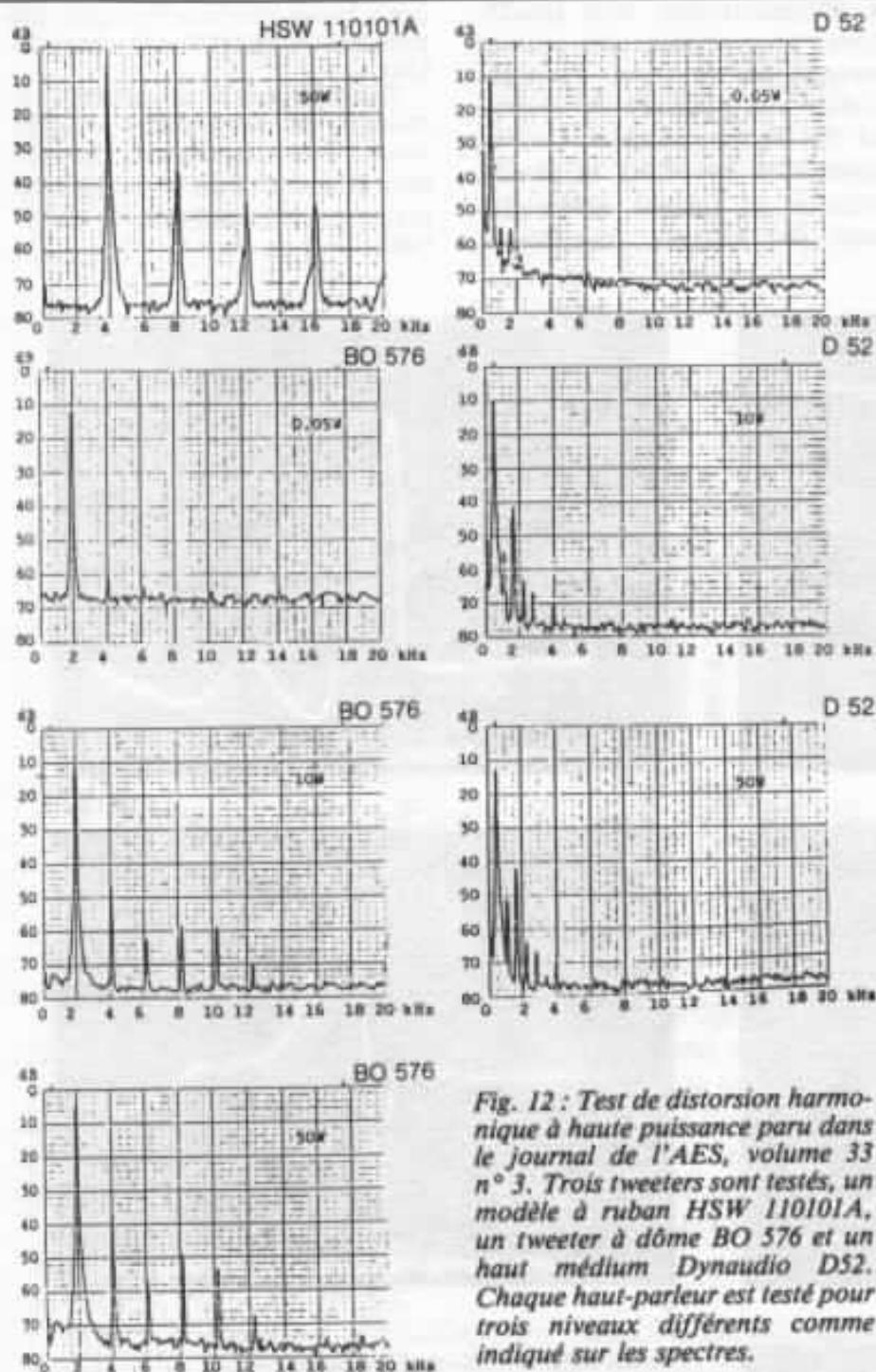


Fig. 12 : Test de distorsion harmonique à haute puissance paru dans le journal de l'AES, volume 33 n° 3. Trois tweeters sont testés, un modèle à ruban HSW 110101A, un tweeter à dôme BO 576 et un haut médium Dynaudio D52. Chaque haut-parleur est testé pour trois niveaux différents comme indiqué sur les spectres.

de telles mesures. En effet, entre 10 et 60 V la courbe de réponse du haut-parleur à dôme de 25 mm est complètement différente entre 1 et 5 kHz. Ceci démontre une fois de plus les problèmes de comportement en régime transitoire.

Filtrage

Un autre problème directement lié au comportement mécanique de l'équipage mobile, concerne le filtrage. Hormis les capacités thermiques de la bobine, il est connu que le filtrage à 6 dB/oct est sans aucun doute le meilleur choix. Malheureusement, pour des raisons de tenue en puissance et des raisons mécaniques, ce type de filtrage est rarement souhaitable. Sur la figure 13 deux haut-parleurs sont mesurés. Il s'agit d'observer le comportement de la courbe de réponse lors d'un filtrage à 6 dB/oct. Le modèle 2A possède une courbe d'impédance indiquant un amortissement limité. Il y a une remontée significative du niveau lorsque la valeur de la self est faible dans la zone de 100 Hz. Le modèle 2B correctement amorti ne pose pas ces inconvénients et peut donc sans crainte être filtré à 6 dB/oct.

Sur la figure 14 est représentée la réponse impulsionnelle du résultat d'un filtrage médium aigu à 6 et 12 dB/oct. On remarquera l'avantage certain du 6 dB/oct sur le 12 dB/oct.

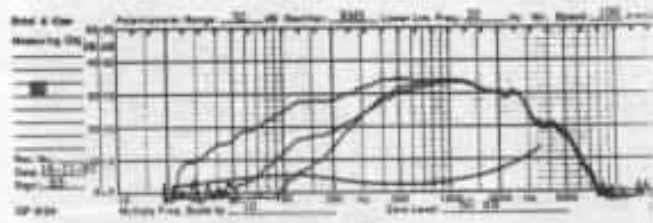
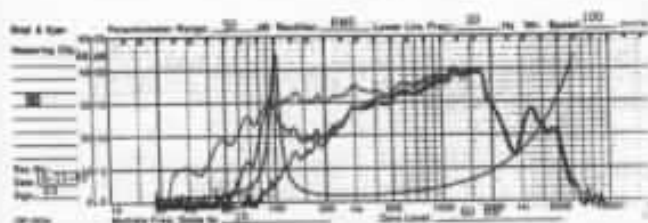


Fig. 13 : Comportement de la courbe de réponse lors d'un filtrage à 6 dB/oct. pour deux modèles de haut-parleurs : à gauche, le modèle 2A, filtrage critique (amortissement délicat) ; à droite, le modèle 2B pour lequel aucun problème n'est manifeste.

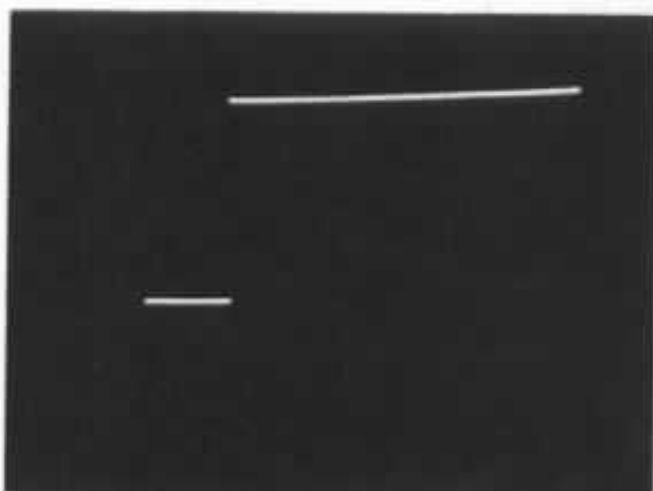
Enseignements :

L'ensemble de ces expériences prouve une fois de plus les différences très importantes qui existent entre les haut-parleurs disponibles sur le marché. Il est certain que les informations généralement restreintes fournies dans

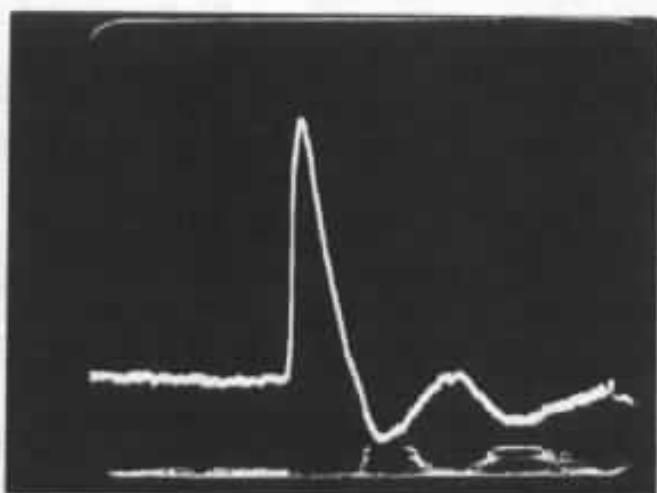
la documentation sont insuffisantes pour se faire une opinion correcte des produits. La quasi totalité des mesures est réalisée sur des signaux simples. Ceci est regrettable car dans la réalité, l'écoute se faisant essentiellement sur signaux transitoires,

nous avons une vue tronquée des possibilités de tel ou tel transducteur.

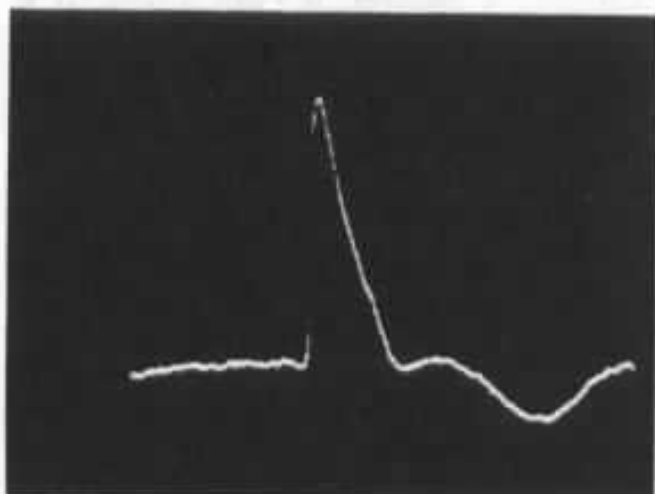
Seule la courbe amplitude fréquence est largement insuffisante. Une attention particulière doit être donnée aux comportements en puissance et en transitoire.



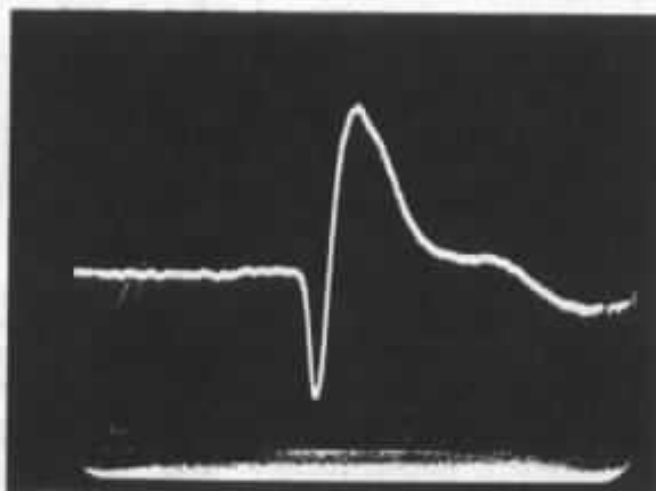
a



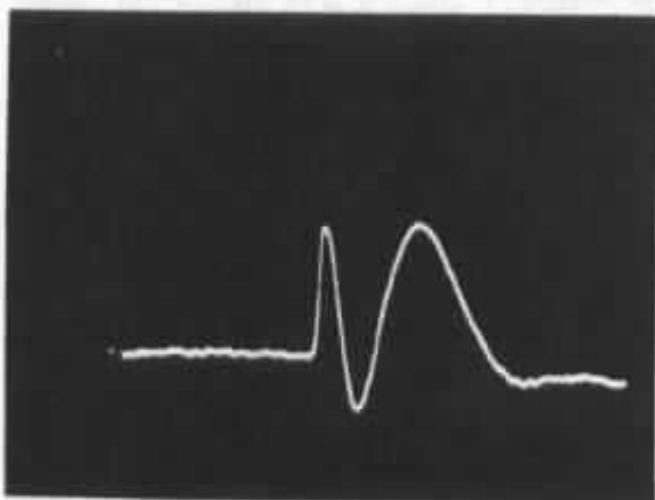
b



c



d



e

a) Signal d'excitation en escalier.

b) Réponse du D28

c) Réponse d'un filtrage à 6 dB/octave D28 + D54 en phase.

d) Réponse d'un filtrage à 6 dB/octave D28 + D54 en opposition de phase.

e) Réponse d'un filtrage à 12 dB/octave D28 + D54.

Fig. 14 : Réponse impulsionnelle d'un haut-parleur médium aigu filtré à 6 dB et à 12 dB. On notera l'avantage du 6 dB/octave.

L'Audiom 15

Description et caractéristiques

Jacques Mahul

Le caisson Audiom vient compléter la digne lignée des caissons de grave Onken, petite Onken et «mini-Onken» tout en amenant des solutions nouvelles et originales tant au niveau du haut-parleur qui l'équipe, le Focal Audiom 15, que de la construction du coffret. Toute l'étude, autant du haut-parleur que de sa charge, a été axée sur l'obtention des meilleures performances possibles dans un volume effectif interne d'au maximum 160 l. C'est une conjugaison de la petite Onken, pour le volume et de la vraie Onken pour le type de courbe de réponse. A cela s'ajoute un rendement, très élevé, de 99 dB dans la bande effective de fonctionnement 50-600 Hz. C'est 3 dB de plus que l'Onken avec la 416-8A et 4 dB de plus que la petite ou la mini-Onken équipées du 414-8B et du Focal 10C01.

D'une conception singulièrement massive et imposante, l'Audiom 15 a été traité pour transmettre les informations avec la plus grande accélération et avec l'amortissement le plus bref. Nous étudions l'Audiom 15 très en détail dans le présent article.

Le caisson Audiom, d'un volume extérieur légèrement supérieur à la petite Onken, équipé du 414-8B (284 l pour 249 l alors que l'Onken original fait 418 l) est muni de 12 événements latéraux également répartis sur tout le périmètre de la façade avant. C'est en cela qu'il diffère de tous les caissons d'origine

Onken ou assimilés et des caissons Jensen à l'origine de ce type de construction. Cette disposition des événements possède trois avantages sur celle que nous connaissons. Tout d'abord une rigidité maximale du coffret et pas seulement sur les côtés mais également sur le haut et le bas. Ensuite, une répartition homo-

gène du flux interne et donc de l'écoulement dans les événements latéraux. Enfin, un effet de filtrage mécanique du médium plus important du fait d'une épaisseur d'événement plus faible (35 mm pour 50 mm dans l'Onken). Nous analyserons le coffret et nous vous donnerons tous les éléments nécessaires à sa construction.



L'Audiom 15 Focal

Autant par la construction originale de son moteur que par son poids démesuré ou par sa finition remarquable, l'Audiom 15 se démarque de la production actuelle.

Un moteur original

L'imposant circuit magnétique de 235 mm de diamètre est constitué de 12 aimants de diamètre unitaire 72 mm également répartis sur le périmètre en deux rangées de 6. De la sorte, le circuit magnétique est ouvert et la bobine est en contact direct avec le milieu extérieur, donc elle est susceptible d'un meilleur refroidissement surtout dans les systèmes de charge ouverts où la circulation d'air est importante. Le poids total des 12 aimants est de

près de 3 kg, ce qui est très difficile à réaliser en une seule bague ferrite. Les plus grosses bagues, actuellement disponibles, font 220 mm. La bobine est protégée des poussières magnétiques par une grille cylindrique qui lui est concentrique et qui est inscrite à l'intérieur des aimants. Cette grille en métal inoxydable et donc amagnétique, est un tube maintenu haut et bas entre les deux plaques par deux rainures circulaires taillées dans ces mêmes plaques.

Enfin, les 12 aimants, le noyau et la grille de protection interne sont coiffés par deux énormes plaques de 235 mm et d'épaisseur 10 mm, chanfreinées sur leur diamètre extérieur et sur la moitié de leur épaisseur. Ces pla-

ques sont réalisées sur un tour, une par une, et non pas découpées ou embouties. Elles sont faites en un acier à très faible teneur en carbone et elles se présentent polies et chromées. Les aimants sont revêtus, quant à eux, d'une belle laque rouge. Chaque aimant étant une bague ferrite, possède un petit trou central qui autorise le passage d'une grande vis en laiton de diamètre 5 mm et qui traverse de part en part la plaque de fond pour se visser sur la plaque de champ. Le noyau est également vissé sur la plaque de fond. De la sorte, collé à l'araldite et vissé par 6 vis en laiton, le moteur est parfaitement rigide réduisant au maximum les entrefers parasites. Le circuit magnétique procure un flux dans l'entrefer de près de 300 000 maxwells et une densité de flux de 12 000 gauss sur une hauteur de 10 mm !

Un saladier massif

Le saladier réalisé en véritable aluminium est moulé à l'aide d'un moule en coquille de la plus haute précision. Les épaisseurs sont surdimensionnées et le saladier est repris un à un sur un tour pour rectification des faces avant et arrière qui nécessitent une parfaite planéité. Le saladier ne pèse pas moins de 1,700 kg. On n'a pas fait appel à du Zamac qui peut être parfaitement injecté, ce qui permet de réduire les coûts, mais qui est très résonnant et cassant. Le Zamac peut être très mince car il est fluide et facile à injecter. Toute la conception de la forme du saladier a été axée sur sa rigidité, pour supporter l'énorme circuit magnétique et son absence de résonance. Deux grosses bornes ont été prévues pour les connexions. Elles acceptent jusqu'à 15 A, ce qui est plus que nécessaire.

Le saladier est recouvert d'une peinture noire vermiculée cuite au four.

Un équipage mobile léger

Membrane, suspension, spi-



der, bobine ont été calculés pour que le total ne dépasse pas 65 g avec la masse d'air en mouvement.

La membrane en fibres de cellulose est très légère, très profonde donc très rigide. La suspension «petits plis» à trois corrugations est ultra-légère. Elle est en tissu, enduite d'une matière non collante. Sa compliance, volontairement pas trop élevée, a été calculée pour assurer le meilleur amortissement des transitoires.

Le cache-noyau est très largement évidé en son centre (trou de 50 mm) et est recouvert entièrement d'un tissu léger qui a pour effet, outre d'éviter le passage de tout élément nuisible dans le trou, d'éliminer tous les bruits parasites de surface ainsi que le «son» typique du cache-noyau papier très souvent perçu.

La bobine constitue la pièce la plus remarquable de l'Audiom 15 ainsi que l'élément qui va guider définitivement le haut-parleur vers les performances désirées. Son diamètre est de 75 mm et le support est en Kapton de 125 microns d'épaisseur. Ce composé synthétique qui se présente sous la forme d'un film chocolat clair translucide présente la particularité de supporter jusqu'à 400° C sans la moindre déformation. Il n'est employé que dans les systèmes à haute technologie par la NASA ou Airbus Industrie par exemple, dans les parties qui demandent une parfaite isolation thermique accompagnée d'une bonne rigidité. La contrepartie de ses qualités réside dans sa difficulté à se coller à un autre matériau, en l'occurrence le cuivre. Son emploi a nécessité le développement d'une nouvelle colle constituée d'une part de deux composants et d'autre part d'un vernis capable de soutenir les 400° C.

La bobine est constituée de fil plat bobiné sur chant, c'est-à-dire sur la partie la plus étroite

du ruban, en une seule couche. La hauteur de bobinage est de 14,8 mm, c'est-à-dire qu'elle est plus haute que l'entrefer, mais sans être vraiment longue pour conserver une grande légèreté. Le fil plat autorise un bien meilleur remplissage de l'entrefer du fait de l'empilage parfait des spires les unes sur les autres. Avec le fil rond, la perte est évaluée à environ 25 %. Le fil plat permet de considérer que la bobine est un seul et même bloc de cuivre.

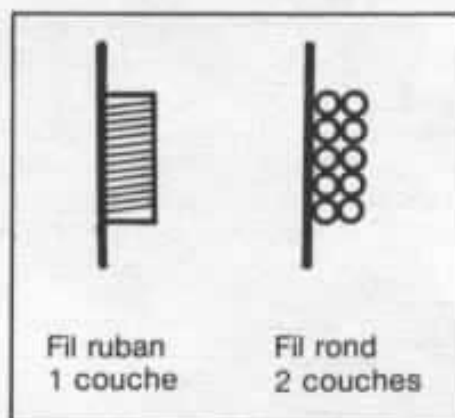


Fig. 1 : Technologies de bobinage.

Une technique très particulière a été mise au point chez Focal pour accroître encore cette performance : une fois le cuivre bobiné sur le barreau de la machine, ce dernier est comprimé à l'aide d'une presse de 10 tonnes qui resserre définitivement les spires entre elles. Le tube de cuivre est ensuite cuit au four pendant 2 heures à 150° C. Le fil ruban est dans ses dimensions dans un rapport de 1 à 5. C'est-à-dire que l'on bobine sur une toute petite largeur et que la machine doit être d'une grande précision. Le fil ruban de cuivre est laminé à partir de fil rond ou ovale alors que le fil ruban d'aluminium est généralement étiré, de par sa plus grande malléabilité. La deuxième méthode est de loin la plus précise.

Un gros travail a été également effectué au niveau de l'émail du fil pour tenir les températures voisines de 300 à 400° C en continu.

Pour détail, le poids du cône et de la totalité de la suspension périphérique n'est que de 32,5 g, celui de la bobine 14,4 g, du spider 3,1 g et du cache-noyau 2,4 g.

Les tresses de raccordement de la bobine aux bornes sont du Leonische de 0,5 mm² de section, mais doublées et torsadées pour accroître encore la capacité en courant.

Paramètres et performances

Impédance nominale
 $Z = 8$ ohms
 Impédance minimale
 $Z = 6,9$ ohms
 Résistance DC
 $R_{CC} = 6$ ohms
 Fréquence de résonance
 $F_S = 32,5$ Hz
 Coefficient de surtension total
 $Q_{TS} = 0,236$
 Coefficient de surtension mec.
 $Q_{MS} = 4,21$
 Coefficient de surtension élec.
 $Q_{ES} = 0,25$
 Masse mobile
 $M_{MD} = 64,6$ g
 Compliance
 $C_{MS} = 3,71 \cdot 10^{-4}$ m/N⁻¹
 Résistance mécanique
 $R_{MS} = 3,13$ kg/s⁻¹
 Surface émissive
 $S_D = 8,55 \cdot 10^{-2}$ m²
 Vol. équ. suspension
 $V_{AS} = 379,7$ l
 $V_{AS} Q^2_{TS} = 21,15$ l
 Flux total
 $\Phi = 291\ 000$ maxwells
 Densité de champ
 $B = 1,2$ T
 Force motrice $BL = 22,5$ NA⁻¹
 Hauteur d'entrefer = 10 mm
 Volume d'entrefer
 $= 35,13 \cdot 10^{-7}$ m³
 Energie magnétique = 2,01 W/s
 Hauteur bobinage = 14,8 mm
 Diamètre bobine = 77,8 mm
 Facteur d'accélération
 $\Gamma = 348,4$ ms⁻² A⁻¹
 Poids total d'aimant = 2,9 kg
 Diamètre du circuit magn. = 235 mm
 Poids total = 13 kg
 Rendement 1 W/1 m = 99 dB avec

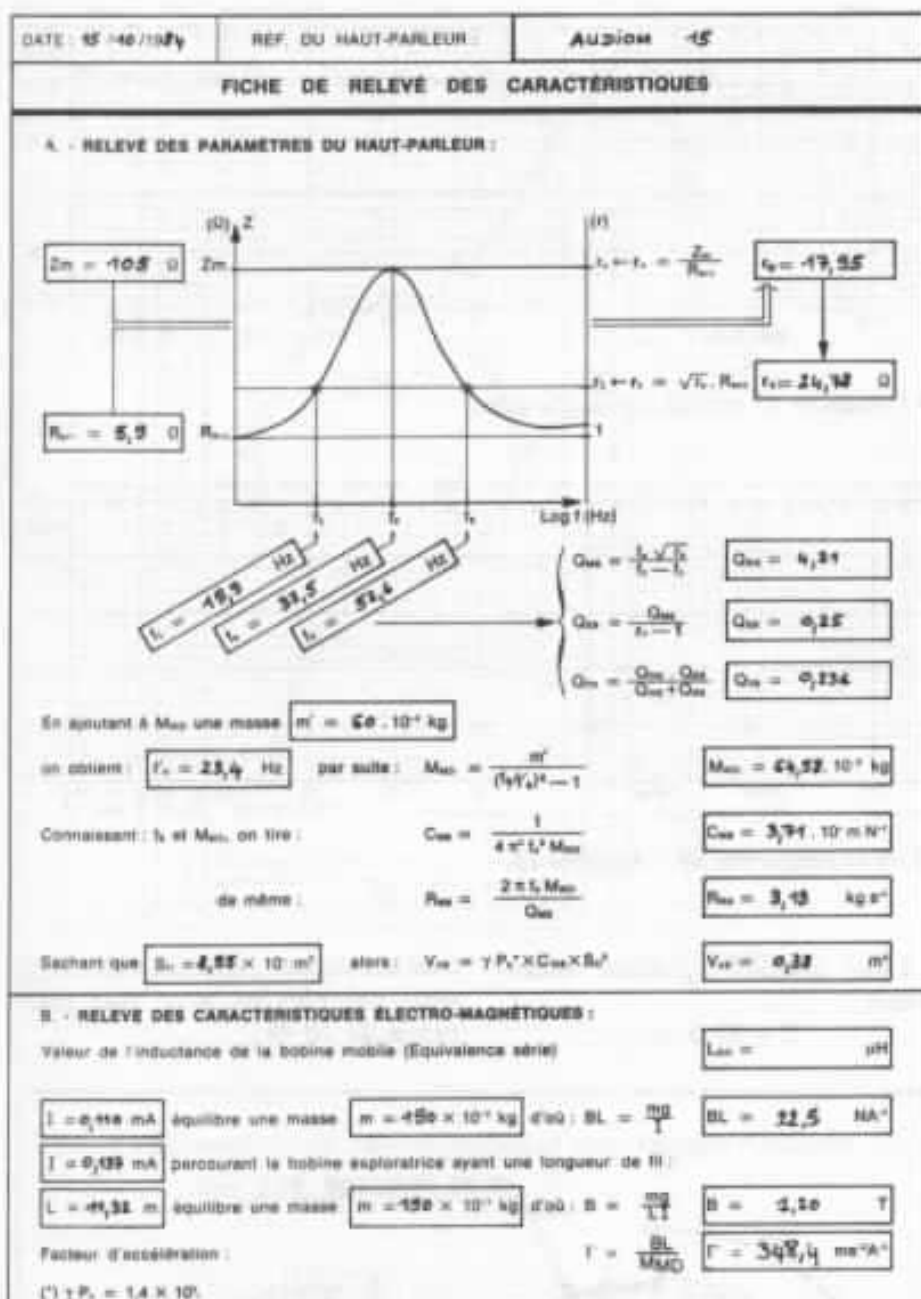


Fig. 2 : Relevé de caractéristiques de l'Audiom 15.

Bruit rose entre 125 Hz/1 kHz
Bruit rose large bande : 102 dB

L'Audiom 15 est livré individuellement dans une caisse en bois de 6 kg. La tenue en puissance est donnée pour 150 W en continu entre les fréquences de 125 Hz et 1 kHz.

Le coffret Audiom

Comme nous l'avons précisé en préambule, les paramètres de l'Audiom 15 ont été prédéterminés pour que la charge idéale soit d'un volume interne, hors événements, de 150 à 160 litres.

L'accord idéal a été défini comme celui du caisson Onken, c'est-à-dire avec un paramétrage n au sens des calculs de Thiele et de Small, de 7,35 à 7,40. En effet, le 416-8B avait, selon le tableau des caractéristiques données par Jean Hiraga dans l'article consacré à la petite Onken, les paramètres suivants :

$$f_s = 25 \text{ Hz},$$

$$Q_{TS} = 0,24,$$

$$V_{AS} = 658,5 \text{ l}.$$

Par ailleurs le volume interne, hors événement, de l'enceinte Onken est de 279 litres si on retire les

volumes des tasseaux et du haut-parleur lui-même. Cela donne un paramétrage

$$n = 7,35$$

Ce calcul ne tient pas compte du rôdage sérieux que subissent certains 416-8A, B ou C.

Nous rappellerons que le paramétrage de la petite Onken, de volume interne réel (tout déduit par ailleurs) 150 litres, est

$$n = 6,34$$

tout comme le caisson mini-Onken équipé du Focal 10C01.

Cela signifie que le caisson Onken original possède une courbe de réponse théorique légèrement moins amortie que celle de la petite Onken.

Volume et accord du caisson Audiom

L'Audiom 15 possède un $V_{AS} Q_{TS}^2$ de 21,15 l. Avec un paramétrage $n = 7,40$, on obtient un volume interne réel, déparasé de tout élément, de 156,5 l. C'est le volume que nous retiendrons.

A ce volume, il faut rajouter le volume du haut-parleur Audiom 15 évalué à 5,1 l et des tasseaux évalué à 1 litre. Soit un volume, hors événements, de 162,6 l. Ce volume doit inclure tous les volumes situés sur les côtés mais aussi dessus et dessous à l'embouchure des événements.

Le volume réel étant

$$V_B = 156,5 \text{ l},$$

le paramètre $n = 7,40$, on en déduit immédiatement la fréquence de coupure F_3 à -3 dB, soit :

$$F_3 = \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{F_s}{Q_{TS}} = 50,6 \text{ Hz}$$

et la fréquence d'accord du bass-reflex :

$$F_b = 0,39 \frac{F_s}{Q_{TS}} = 53,7 \text{ Hz}$$

Calcul de la longueur d'évent

Connaissant le volume de la boîte, on peut calculer la compliance acoustique de la boîte

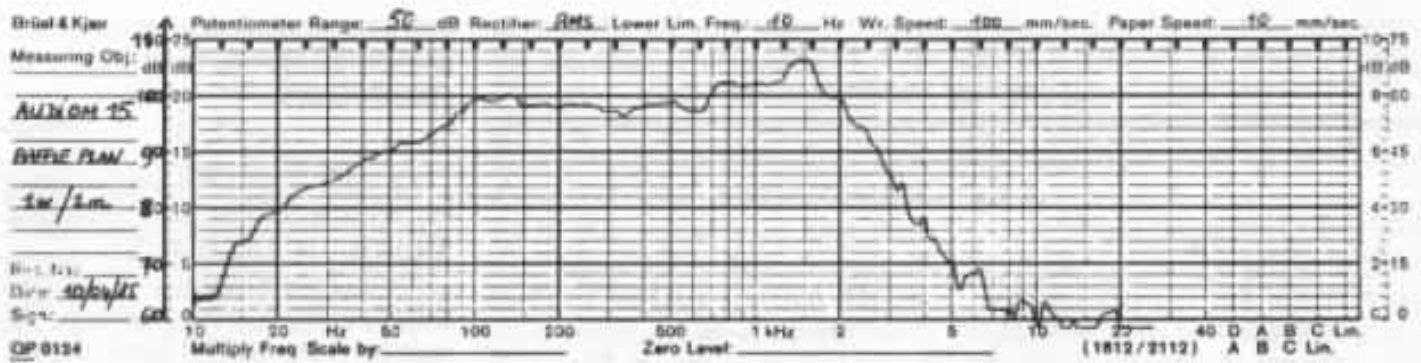


Fig. 3 : Réponse amplitude-fréquence de l'Audion 15 monté sur baffle-plan.

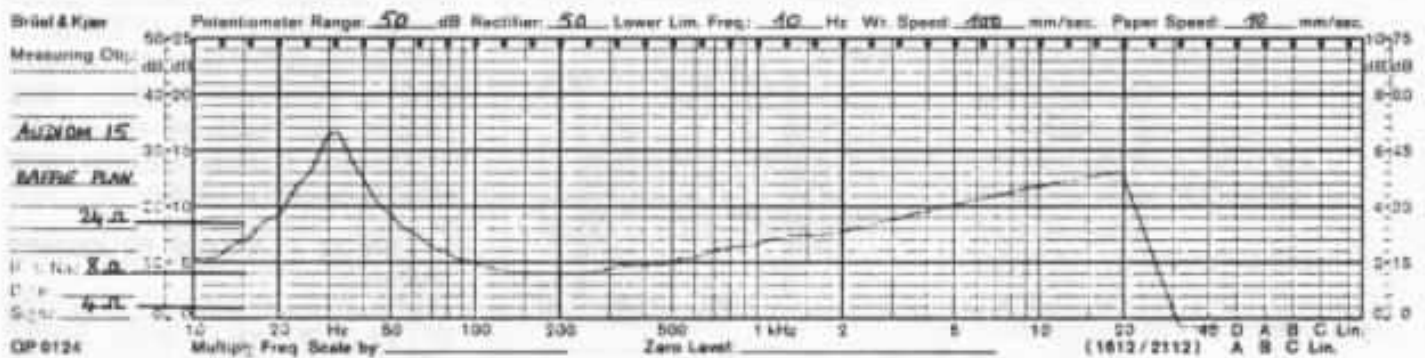


Fig. 4 : Courbe d'impédance en fonction de la fréquence de l'Audion 15.

$$C_{AB} = \frac{V_B}{1,4 \cdot 10^7} = 11,19 \cdot 10^{-7}$$

La masse acoustique des événements sera

$$M_{AP} = [(2\pi F_0)^2 C_{AB}]^{-1}$$

soit : $M_{AP} = 7,85$.

La surface émissive de l'Audion 15 ayant été estimée à 855 cm^2 , nous retiendrons exactement cette valeur pour la surface totale d'événements. Soit une longueur d'événement

$$l = \frac{M_{AP} \times S_e}{\varphi_0} = \frac{7,85 \times 855}{1,293}$$

$$= 51,9 \text{ cm}$$

une correction importante de perte d'écoulement ou de frottement évaluée à

$$1,4 \sqrt{\frac{S_e}{2\pi}}$$

doit être déduite de l .

$$\text{Soit } l' = l - 1,4 \sqrt{\frac{S_e}{2\pi}}$$

$$= 51,9 - 16,3 = 35,6 \text{ cm.}$$

Pour simplifier, nous retiendrons

$$l' = 35,5 \text{ cm}$$

tout en sachant que les calculs ne sont valables qu'avec une tolérance de 10 %.

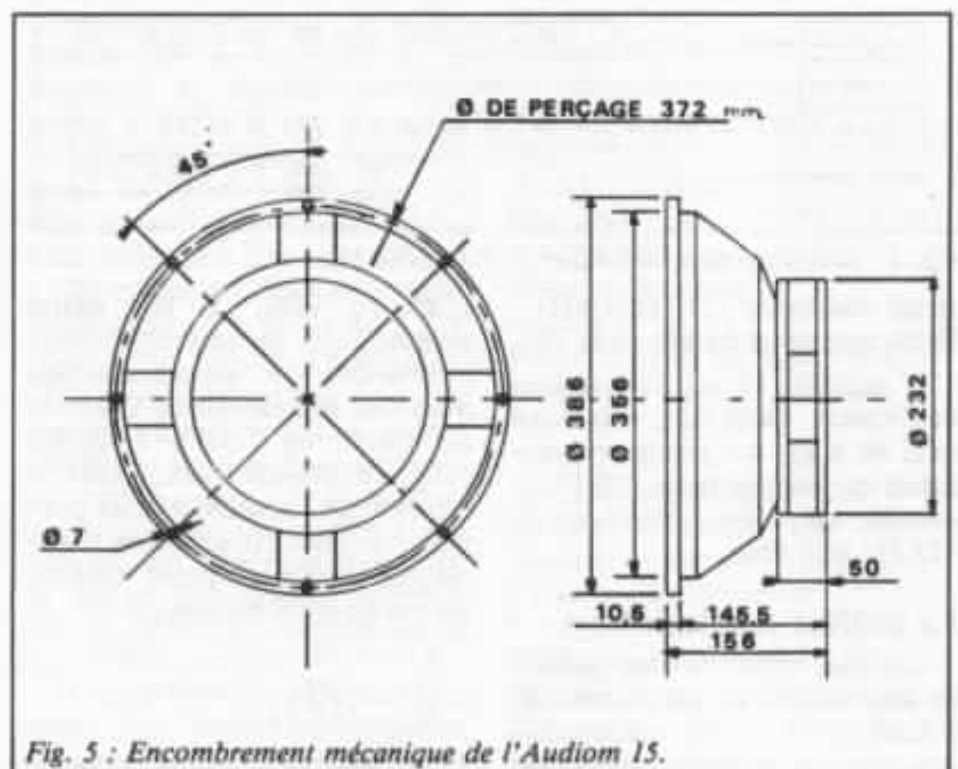


Fig. 5 : Encombrement mécanique de l'Audion 15.

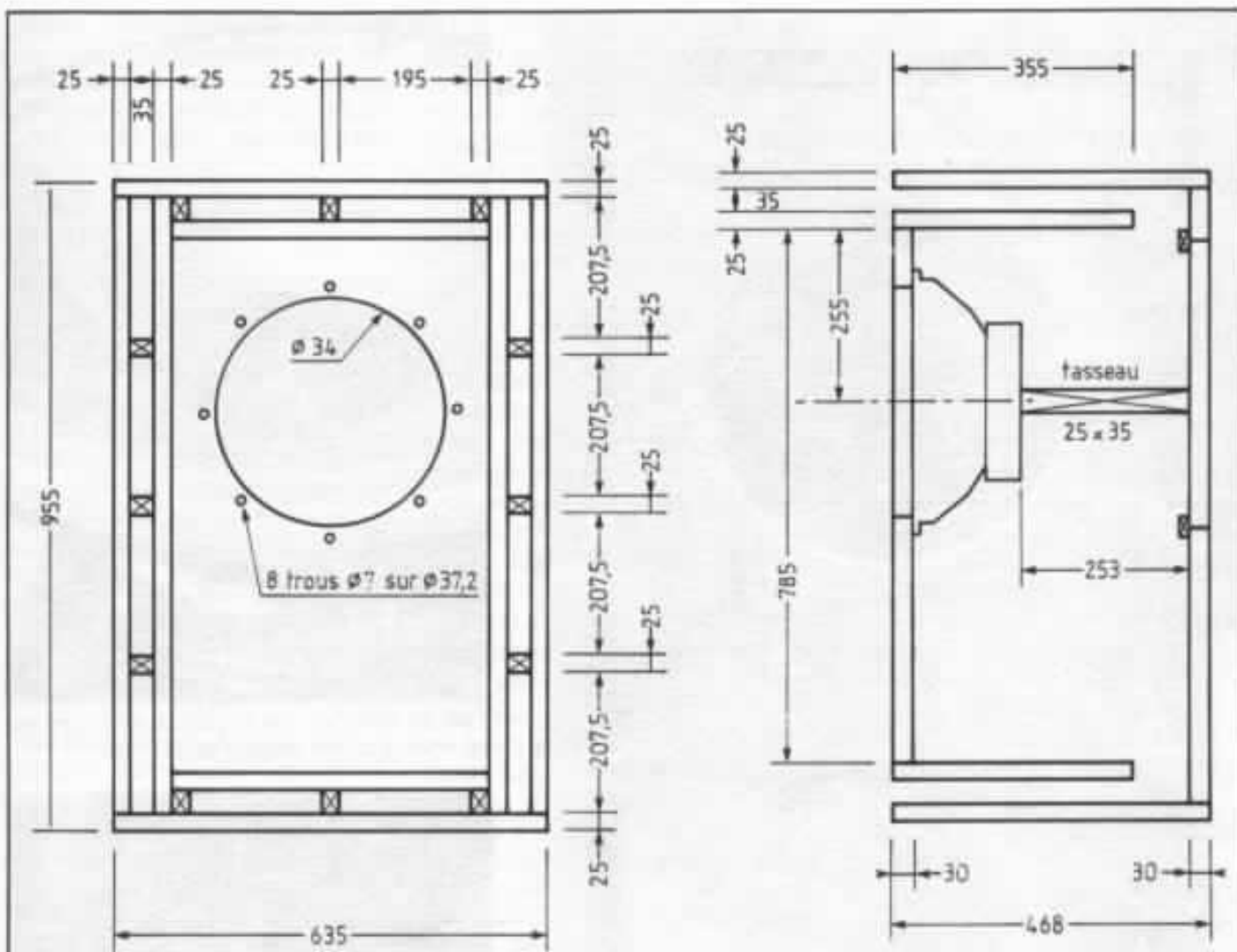
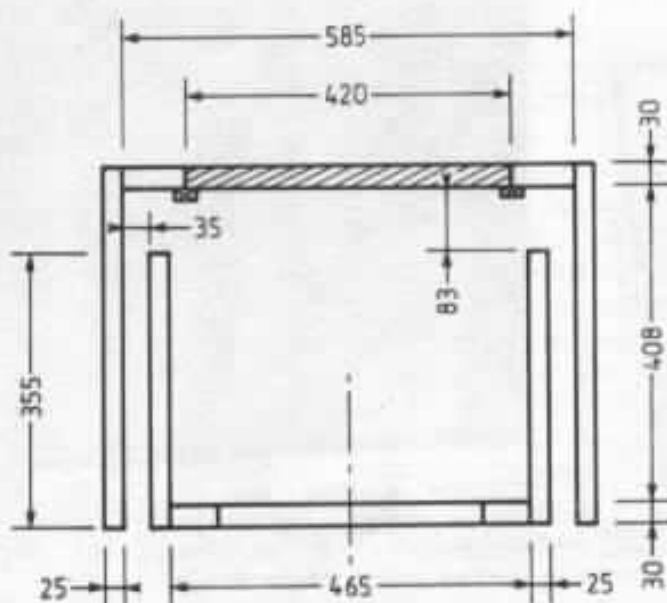


Fig. 6 : Dimensions du caisson préconisé pour charger l'Audiom 15.



Dimensions des panneaux à découper

Méla mine de 25 mm

Dessus : 635 x 468 mm

Dessous : 635 x 468 mm

Côté gauche : 905 x 468 mm

Côté droit : 905 x 468 mm

Event gauche : 905 x 355 mm

Event droit : 905 x 355 mm

Event haut : 465 x 355 mm

Event bas : 465 x 355 mm

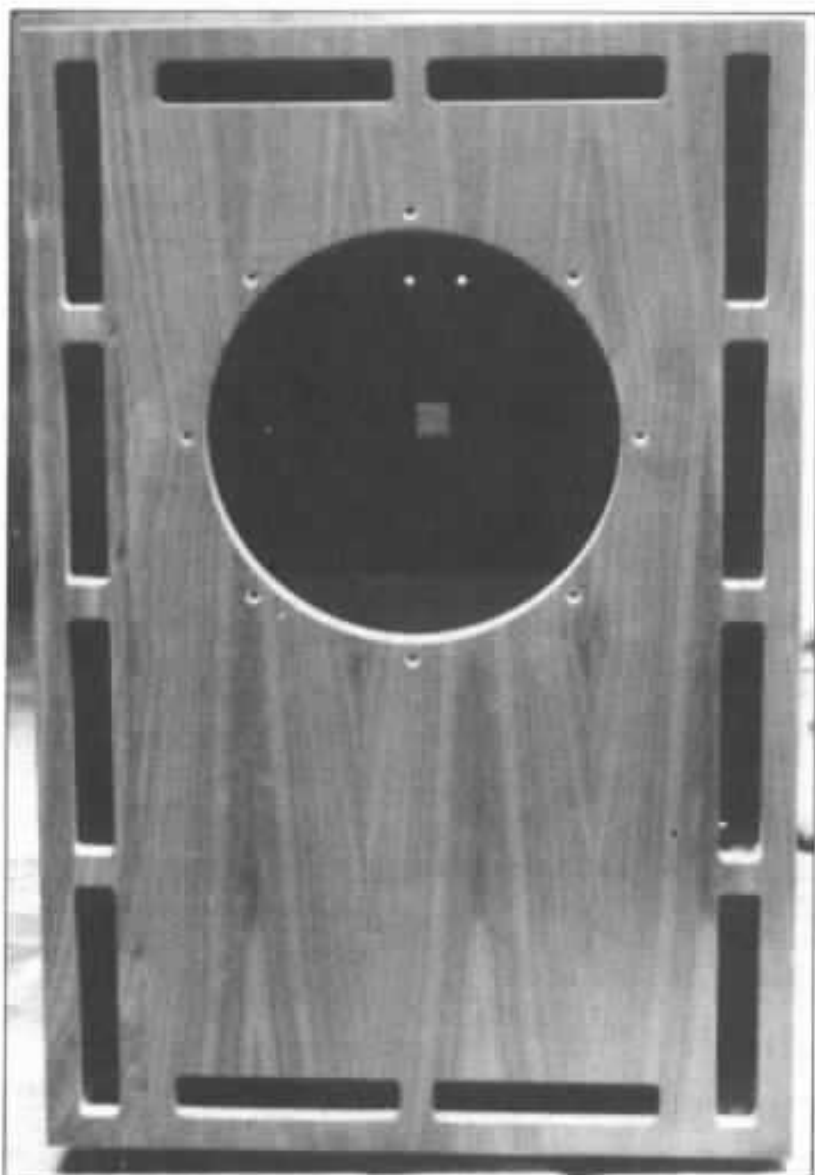
Multiplis bouleau de Finlande de 30 mm

Façade avant : 465 x 785 mm

Façade arrière : 585 x 905 mm

12 tasseaux 25 x 35 mm longueur 355 mm

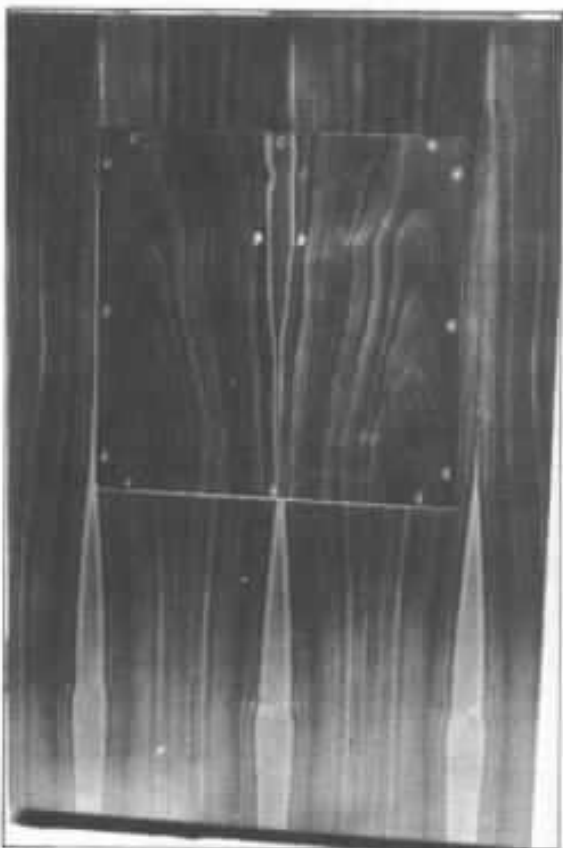
1 tasseau 25 x 35 mm longueur 253 mm.



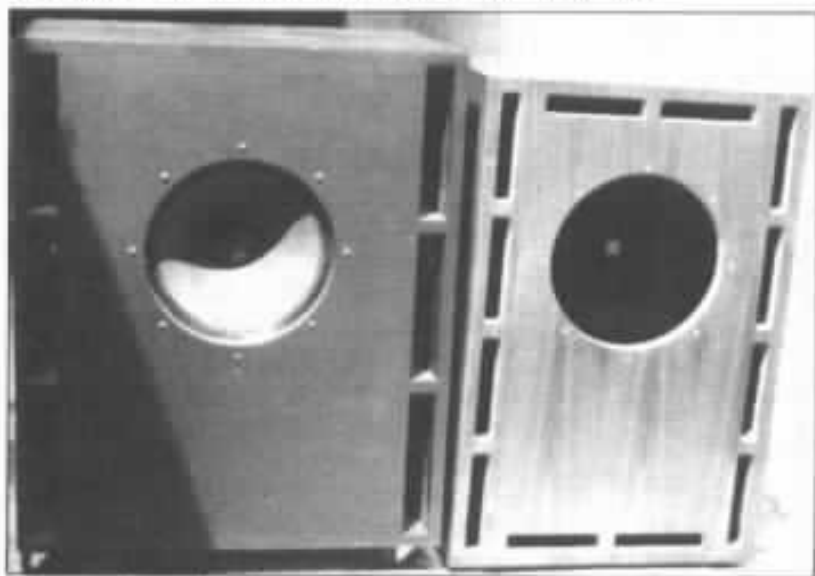
Le caisson Audiom retenu après les essais subjectifs.



Vue de détail du cache-noyau recouvert sur sa totalité d'une mousse acoustique.



Caisson Audiom, vue de l'arrière. Une trappe permet la fixation du haut-parleur par l'intérieur et le capitonnage des parois interne avec le feutre de laine.



Comparaison de volume du caisson Audiom par rapport au caisson Onken.

Nous possédons le volume interne incluant le volume du HP et les tasseaux, soit 162,6 l. Nous connaissons la surface des événements $S_e = 855 \text{ cm}^2$ ainsi que leur longueur 35,5 cm.

Nous pouvons ainsi construire notre coffret.

Rappelons toutefois pour ceux que l'expérience tenterait, que l'Altec 416-8 ne peut pas être chargé par 150 litres. Le calcul est très simple dans le même volume que celui décrit ici, soit 156,5 l, le paramétrage serait $n = 4,1$, la fréquence d'accord du bass-reflex serait 41 Hz mais la fréquence de coupure basse de 51,2 Hz à -3 dB. Pire encore avec une surface d'événement de 850 cm^2 qui est celle du caisson Onken, il faudrait une longueur d'événement de 74 cm !

En conclusion, dans ce volume compris entre 150 et 160 l, l'Altec 416-8 descendrait moins bas que l'Audiom 15 et surtout avec un niveau beaucoup plus faible car le paramètre $n = 4,1$ donne une courbe suramortie alors que l'Audiom 15 donnera une courbe sous-amortie comme celle du caisson Onken de 280 l interne. On conviendra donc que l'Altec 416-8 est fait pour fonctionner dans 280 l et l'Audiom 15 dans 150 l. Même remarque pour l'Audiom 15 qui ne peut être monté dans 280 l car alors le paramètre n serait de 13,2 soit une courbe de réponse avec une énorme surtension à 45 Hz même si la coupure théorique à -3 dB est de 38 Hz.

Le coffret

Nous connaissons maintenant le volume interne du caisson Audiom soit 156,5 l auquel il faut ajouter les volumes des tasseaux et de l'Audiom 15, nous connaissons également la surface d'événement 855 cm^2 et la longueur de ces événements : 35,5 cm. Nous pouvons procéder à la conception du coffret.

La conception des caissons Onken est directement issue de celle des caissons Jensen avec les événements laminaires latéraux qui augmentent la surface possible d'événement et qui renforcent la rigidité du caisson.

Dans le caisson Audiom, nous avons voulu pousser ce concept encore plus loin et c'est en cela qu'il se distingue des caissons précédents. En effet, les événements laminaires sont également répartis sur le périmètre de la façade avant. Nous avons déjà énoncé les avantages d'une telle disposition en préface. Le nombre des événements est porté à 12 avec des événements légèrement plus petits en haut et en bas que sur les côtés. Le total de la surface d'événement est exactement 855 cm^2 et on pourra remarquer la présence de quatre tasseaux $25 \times 35 \text{ mm}$ en haut et en bas aux coins des événements latéraux. Leur présence est là pour limiter la surface d'événement à la valeur ci-dessus tout en participant à la rigidité maximale.

Les façades avant et arrière sont en multiplis de bouleau de Finlande de 30 mm. Le reste des panneaux est prévu en melamine de 25 mm. La melamine est un aggloméré extrêmement dense car réalisé avec des poussières de bois et non pas avec des copeaux. Sa densité est supérieure à la moyenne des agglomérés. Nous vous communiquons les dimensions de tous les panneaux ainsi que des différents tasseaux. On remarque que les deux façades en multiplis sont inscrites entre les panneaux de melamine car il est plus facile de percer de part en part le panneau de melamine et de visser dans la tranche des panneaux multiplis que l'inverse.

Donc coller et visser tous les panneaux de melamine qui entourent les façades avant et arrière en multiplis. Pour les raccords melamine + melamine, il est possible de faire appel à la technique de collage Bostik-Pad.

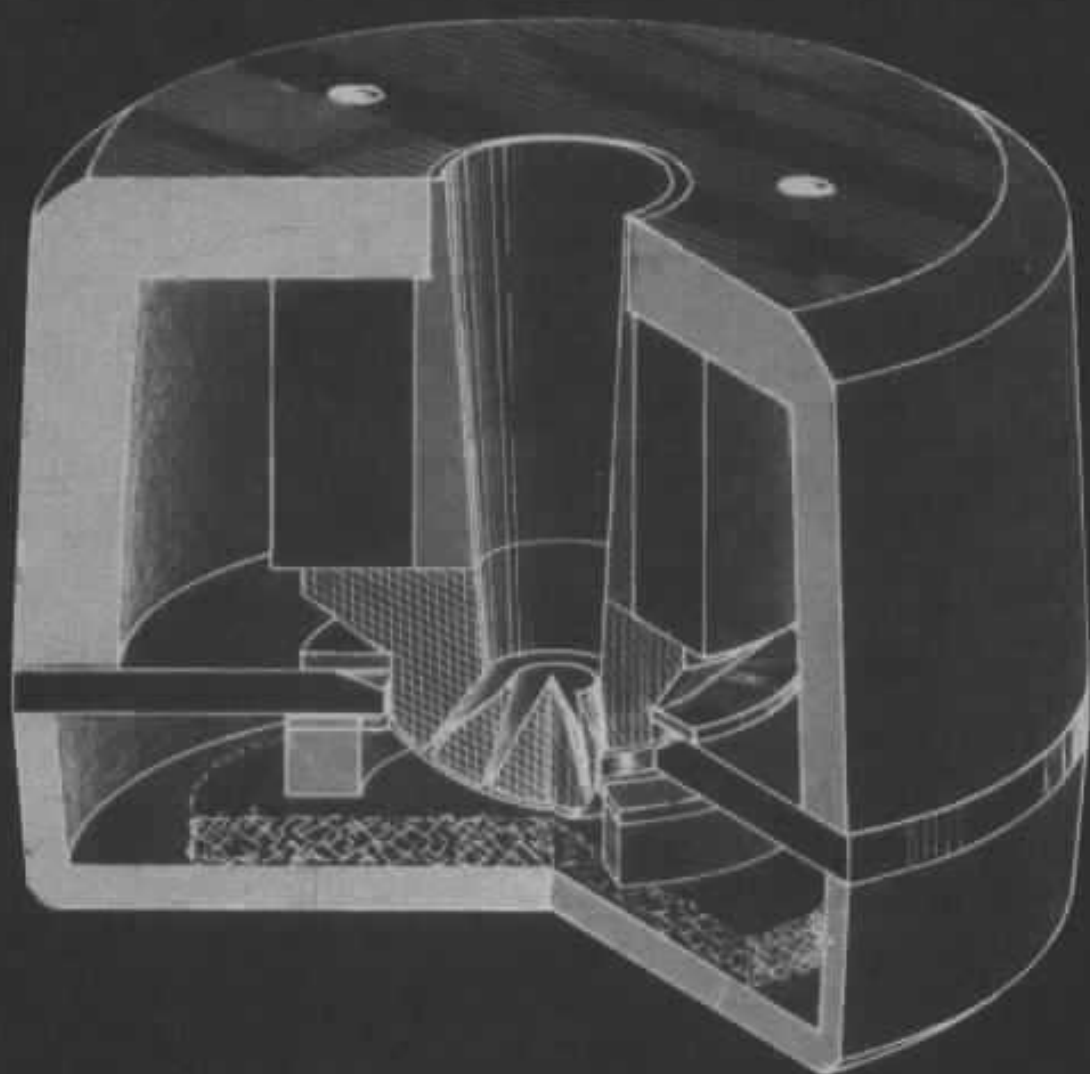
Celle-ci consiste à utiliser un ruban de mousse de 2 à 3 mm conjointement à une colle Bostik (voir bulletin Focal n° 1). Dans ce cas, prévoir une réduction des dimensions des panneaux en conséquence. Prévoir également d'enduire avec de la colle diluée les tranches d'aggloméré qui sont poreuses.

L'Audiom 15 est fixé par l'arrière sur la façade avant. Prévoir de percer celle-ci de part en part pour loger 8 longues tiges filetées pour une fixation avec boulons. Plutôt que de prévoir les façades avant et arrière démontables, ce qui entraîne la présence obligatoire de tasseaux, une fenêtre est réalisée à l'arrière. Cette fenêtre, dont les dimensions sont prévues pour le passage de l'Audiom 15 de 386 mm de diamètre extérieur, sera réalisée également en multiplis bouleau de Finlande. Là, il faut prévoir 4 tasseaux d'une largeur de 30 mm en bois plein pour fixer la trappe. Ce système de fenêtre procurera le maximum de rigidité à l'ensemble.

Une paroi entière démontable entraîne toujours des problèmes de vibrations et de résonances parasites. Sur la paroi interne de la trappe sera fixé un tasseau de $25 \times 35 \text{ mm}$ en bois plein qui devra être en appui sur l'arrière de l'Audiom 15. Il soutient le haut-parleur tout en assurant un maximum de rigidité entre l'avant et l'arrière. Ce tasseau devra être vissé sur la trappe.

Les bornes de connexions seront également fixées sur la trappe. Les parois internes du caisson seront recouvertes de feutre de laine de 10 mm d'épaisseur. Ne rien mettre à l'intérieur des événements.

Le caisson Audiom devra être fixé sur 4 roulettes ou sur des pieds triangulaires pour l'isoler du sol. Aucun socle n'est prévu pour mieux décoller le caisson du sol.



Réflexions sur les chambres de compression autour du TAD 2001

Philippe Viboud - Pierre Gauthier

Dès sa création, l'Audiophile s'est orienté vers les transducteurs à haut rendement. Cet intérêt est étayé par de nombreux exemples de systèmes japonais qui, par les résultats exceptionnels obtenus, nous poussent à persévérer dans ce sens. En 1981, nous avons proposé une voie médium composée d'un pavillon de type Iwata et du moteur JBL 2441. Hélas, l'arrêt du 2441 et les problèmes de fabrication du pavillon, nous ont contraint à abandonner cette solution pour revenir à des haut-parleurs traditionnels, donnant par ailleurs de très bons résultats au vu des moyens mis en œuvre. Cependant, nous avons toujours dans l'idée de revenir dès que possible à nos premières amours ! Avec l'apparition sur le marché d'un moteur très performant et la mise au point d'un pavillon sectoriel en bois sablé de même technologie que le Onken, nous sommes de nouveau en mesure de proposer aux nombreux amateurs impatientes de nous voir retrouver cette voie, une solution de ce type pour la transduction du médium.

La chambre de compression

Il nous paraît intéressant de revenir brièvement sur la technologie et les particularités de ce type de haut-parleurs appliqué à la Hifi, afin de mieux cerner les qualités subjectives et les nombreux avantages qu'ils offrent par rapport aux transducteurs de type Rice Kellogg.

Regardons la coupe du moteur dessinée sur la page de garde. La

«chambre» est l'espace entre le diaphragme (ou membrane) et la pièce de phase placée devant. Celle-ci est l'intermédiaire entre cette membrane et la gorge du moteur. Le rapport entre la grande surface du diaphragme d'une part et la petite surface des fentes de la pièce de phase d'autre part crée le phénomène de «compression», en augmentant la charge acoustique à ce

niveau. On est donc en présence d'une source sonore à haute impédance. L'air ambiant de notre salle d'écoute, de par sa masse spécifique, a une impédance très basse ; le couplage direct des deux est donc impossible ! Il faudra placer en intermédiaire un adaptateur d'impédance, permettant un couplage progressif : c'est le rôle du «pavillon». Sa section croît pro-

gressivement de la gorge du moteur jusqu'à son embouchure en augmentant ainsi le rendement de l'ensemble.

La chambre de compression est sûrement le haut-parleur demandant le plus de précision et de finition au niveau de tous ses éléments constitutifs.

Les défauts constatés sur les moteurs courants destinés à la sonorisation résultent en partie d'usinages imparfaits de la membrane, de la pièce de phase ou de l'emploi de matériaux non inertes et pas assez denses.

Les aimants

Pièce maîtresse de tout haut-parleur, elle l'est à fortiori sur les compressions où l'on recherche un flux très puissant dans l'entrefer. Les premiers moteurs utilisaient une bobine d'excitation à laquelle on appliquait une dizaine de volts sous 1 à 1,5 A permettant une aimantation de forte densité. Les aimants permanents ont fait des progrès considérables. Depuis les ferrites (mélange d'oxyde de fer et de baryum ou strontium) qui permettent d'obtenir une densité volumique d'énergie de 30 kJ/m³ jusqu'aux fameux Alnico dont les plus performants vont jusqu'à 240 kJ/m³. Le tableau ci-dessous donne la composition et les performances en intensité et champs coercitifs de deux types d'Alnico par rapport à l'acier trempé.

Le prix du cobalt ne cessant d'augmenter, ces aimants se font hélas de plus en plus rares sur les moteurs. Ils sont cependant conservés sur les réalisations de haut niveau telles le TAD 2001 utilisant un Alnico de 1 kg procurant un flux de 1,8 T dans l'entrefer. En dehors de son produit d'énergie, l'efficacité d'un aimant, dépend aussi des éléments le constituant. Il intervient à ce niveau, la structure cristalline permettant de conférer à l'ensemble une anisotropie. Celle-ci est obtenue par l'adjonction de terres rares (samarium). On peut aussi orienter la structure d'où concentration du flux dans une direction privilégiée. Des superaimants sont ainsi obtenus par amalgame de grains orientés ne dépassant pas le centième de micron chacun. Les différences subjectives très nettes ressenties sur les haut-parleurs utilisant l'Alnico seraient donc aussi dues à cette homogénéité du champ dans l'entrefer. De plus, les Alnico grâce à l'adjonction de Cobalt ont un point de Curie très élevé ($\approx 700^{\circ}\text{C}$) par rapport à tous les autres aimants. Rappelons que le point de Curie est la température à laquelle un aimant perd ses propriétés magnétiques.

En dehors de sa structure, l'emplacement et la forme de l'aimant interviennent dans la qualité du moteur. Sur les compressions, à cause de difficultés d'usinage, il est très rare d'avoir

un aimant central permettant pourtant d'obtenir un minimum de pertes. Ils sont souvent placés à l'extérieur et là aussi en facteur de pertes, les Alnico font la différence.

Tous ces facteurs jouent de façon significative sur la réponse transitoire et l'amortissement du haut-parleur.

Bobine et diaphragme

Formant l'équipage mobile du moteur, son rôle fondamental est fonction de deux critères souvent contradictoires : la légèreté et la rigidité. La membrane d'une compression est le plus souvent en forme de dôme dont la concavité est orientée vers la gorge. Son diamètre peut aller jusqu'à 14 cm sur certains moteurs bas-médium. Dans ce cas, le circuit magnétique doit être énorme ! La masse conditionne la réponse aux fréquences élevées. Elle est comprise entre 0,5 et 1,5 g (1,13 g sur le TAD 2001). La masse est surtout due à la bobine ; le diaphragme en lui-même étant très léger. Rappelons que quand la masse mobile s'élève, l'amortissement diminue rendant l'adaptation au pavillon plus difficile. Ceci pénalise les moteurs de sonorisation où la tenue en puissance mécanique et électrique limite la légèreté de l'équipage mobile.

Certains modèles utilisent une membrane non sphérique, jouant donc sur l'épaisseur de la chambre de compression qui peut être moins épaisse au centre que sur les bords (Western).

Ce détail a une importance pour la réponse en fréquence (cf. Audiophile n°26), le taux de distorsion et rend l'équipage mobile moins sensible à des phénomènes de voilage. L'épaisseur de la chambre conditionne aussi la limite du moteur dans les fréquences élevées (f_{ch}). Cette coupure est inversement proportionnelle à l'épaisseur, en pondérant cette remarque du fait des phé-

	Ir (USI)	B _{ac} (T)	Composition
Acier trempé	$6,4 \times 10^5$	5×10^{-3}	Fe : 99 % - C : 1 %
Alnico IIA	$9,6 \times 10^5$	$9,9 \times 10^{-3}$	Fe : 54 % - Al : 10 % - Ni : 18 % Co : 12 % - Cu : 6 %
Ticonal	10×10^5	10×10^{-3}	Fe : 51 % - Al : 8 % - Ni : 14 % Co : 24 % - Cu : 3 %

nomènes de variations de gradient de pression et de viscosité.

La conséquence sera une modulation de f_{ch} lors de la reproduction de fréquences basses à forte amplitude. Pour un moteur de 1 pouce, la membrane (épaisseur : 0,5 mm) aura une amplitude de 0,2 mm en reproduisant du 400 Hz à 1 w acoustique. Ceci entraîne une variation de $\pm 12,5\%$ de f_{ch} (soit ± 1 dB pour une pente de 6 dB/Oct.) Une pente plus forte entraînant une variation plus importante.

La rigidité est fonction du matériau employé pour la membrane. Ceux-ci sont très divers, allant des matériaux synthétiques aux divers métaux légers (Alu - Dural - Titane...). Les principales difficultés étant dues au pressage et au polissage. Un des matériaux les plus intéressants semble être le Beryllium utilisé sur le TAD 2001. En effet, ce matériau d'une densité de 1,8 à 1,83 (contre 2,7 pour l'Alu et 4,4 pour le Titane) allie aussi un coefficient de Young de $22,5 \times 10^{10}$ N/m² (contre 7 pour l'Alu et 11,9 pour le Titane). Un seul inconvénient : son prix équivalent à celui de l'or !

La bobine en Alu ou en Cu est souvent bobinée à plat sur du papier imprégné. Là aussi, tout le savoir-faire réside dans la précision du collage, le choix des dimensions (hauteur) et des matériaux (tenue dans le temps).



Photo 3 : Détails de la bobine du TAD 2001 : la finition est irréprochable.

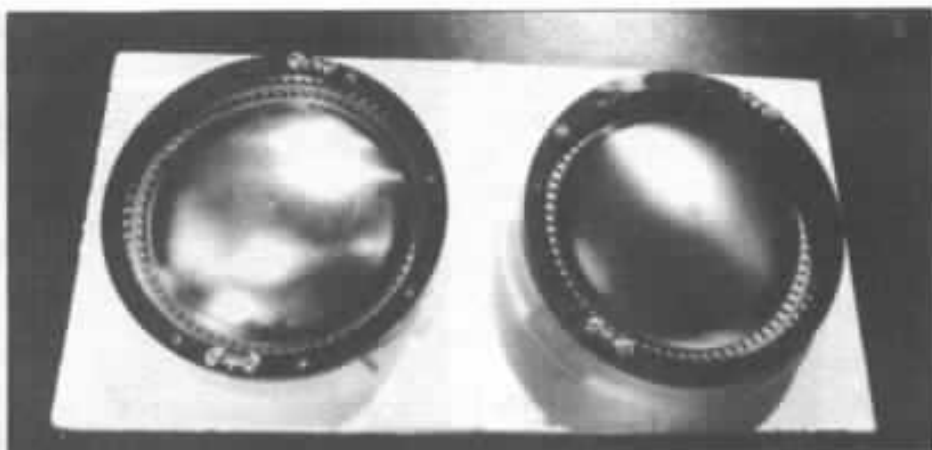


Photo 1 : Deux matériaux pour un même diaphragme. De G à D : Alu-Titane. Remarquer la différence de grains ainsi que la suspension diamant.



Photo 2 : Équipage mobile du TAD 2001 : remarquer la finesse du grain de la membrane en Beryllium, ainsi que la suspension rapportée en mylar.

La suspension

Autre élément fondamental, celle-ci, pour des facilités de fabrication, est souvent moulée en même temps que le diaphragme, donc dans le même matériau. Elle fait appel à diverses formes (cf. photos) : tangentielle, diamant, gaufrée...

Seuls des modèles haut de gamme utilisent des membranes rapportées en tissus ou mylar (Onken 5000 et 255 -TAD 2001 et 4001). La suspension intervient non seulement pour l'amortissement vers la coupure basse de l'ensemble moteur-pavillon, mais aussi à l'autre extrémité du spectre de par ses résonances propres, que certains utilisent pour augmenter l'éten-

due en hautes fréquences de leurs moteurs !...

Une suspension raide sera un gage de tenue en puissance, ce qui ne signifie hélas pas de qualité ! Les matériaux métalliques (# membranes) ont un amortissement faible. Le Dural, par exemple, métal à forte surtension, donnera un son dur que l'on reproche si souvent aux compressions. Le Titane, dont l'amortissement est supérieur donnera un son plus doux.

L'utilisation de matériaux synthétiques permet un amortissement élevé et un bon contrôle dans le bas.

La forme interviendra sur le guidage dans l'entrefer et la souplesse de l'ensemble, donc sur les

perturbations dans le haut du spectre.

A noter l'utilisation sur le TAD 2001 d'une suspension rapportée mylar en forme de V à concavité antérieure garantissant une excellente linéarité en fréquence (cf. photos 2 et 3).

La pièce de phase

Pièce dont l'usinage et la technologie sont primordiaux pour le résultat final. C'est en effet à ce niveau que se produisent les plus fortes variations de pression. Sur les photos, on peut voir différentes technologies jouant sur l'étendue du spectre, l'efficacité ainsi que les distorsions.

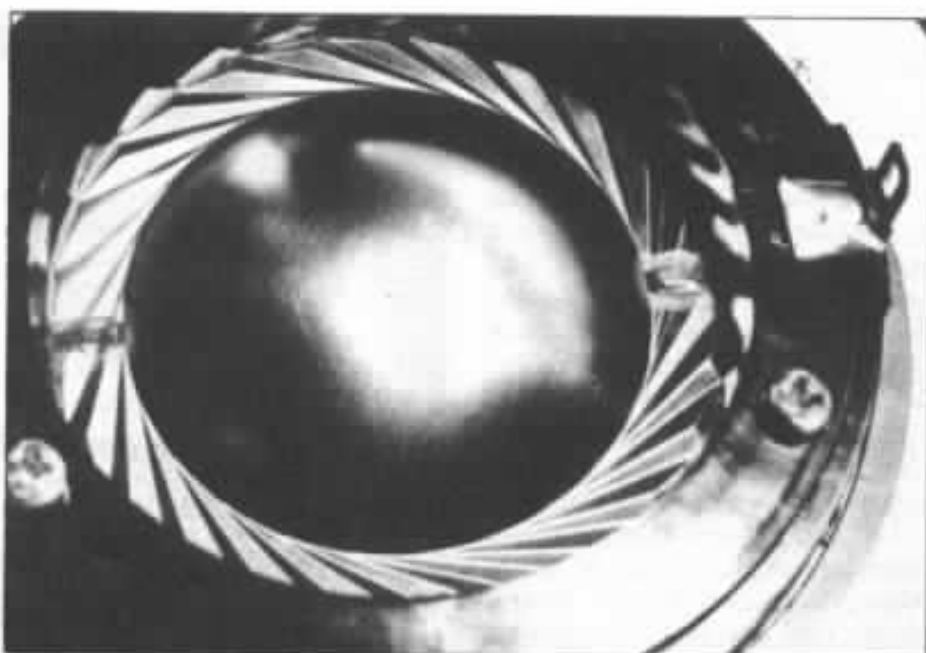


Photo 4 : Exemple d'une suspension tangentielle chez Altec.

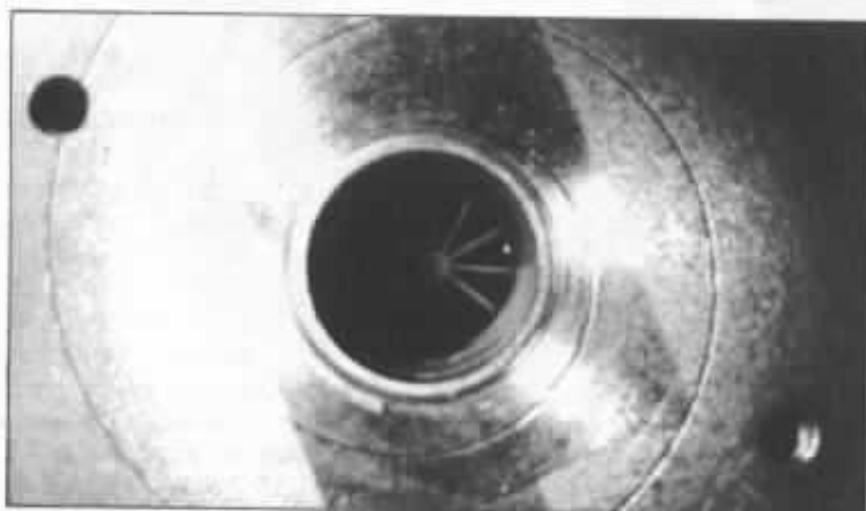


Photo 5 : Pièce de phase à fentes radiales «Tangerines» (Altec) utilisée aussi chez JBL série 275.



Photo 6 : Pièce de phase en «pomme d'arrosoir» (Fostex - Tannoy). On peut jouer sur la répartition et le diamètre des trous.



Photo 7 : Pièce de phase à fentes concentriques (JBL). Cas le plus fréquent.

Les matériaux utilisés doivent être très denses et l'utilisation de matières synthétiques peut nuire à la neutralité. La finition au niveau des fentes (bavures) doit être hors pair afin de minimiser tout épiphénomène à cet endroit crucial. Sur certains moteurs japonais, chaque membrane est adaptée unitairement à la pièce de phase.

TAD utilise entre l'entrefer et la troisième fente (cf. photo 8) un anneau en cuivre désoxygéné qui par ses qualités de conductance, permet de réduire les pertes magnétiques et d'adoucir la reproduction dans le haut du spectre.



Photo 8 : Pièce de phase concentrique du TAD 2001. Remarquer la présence d'un troisième fente toute proche de l'entrefer. Le matériau est un alliage à haute densité.

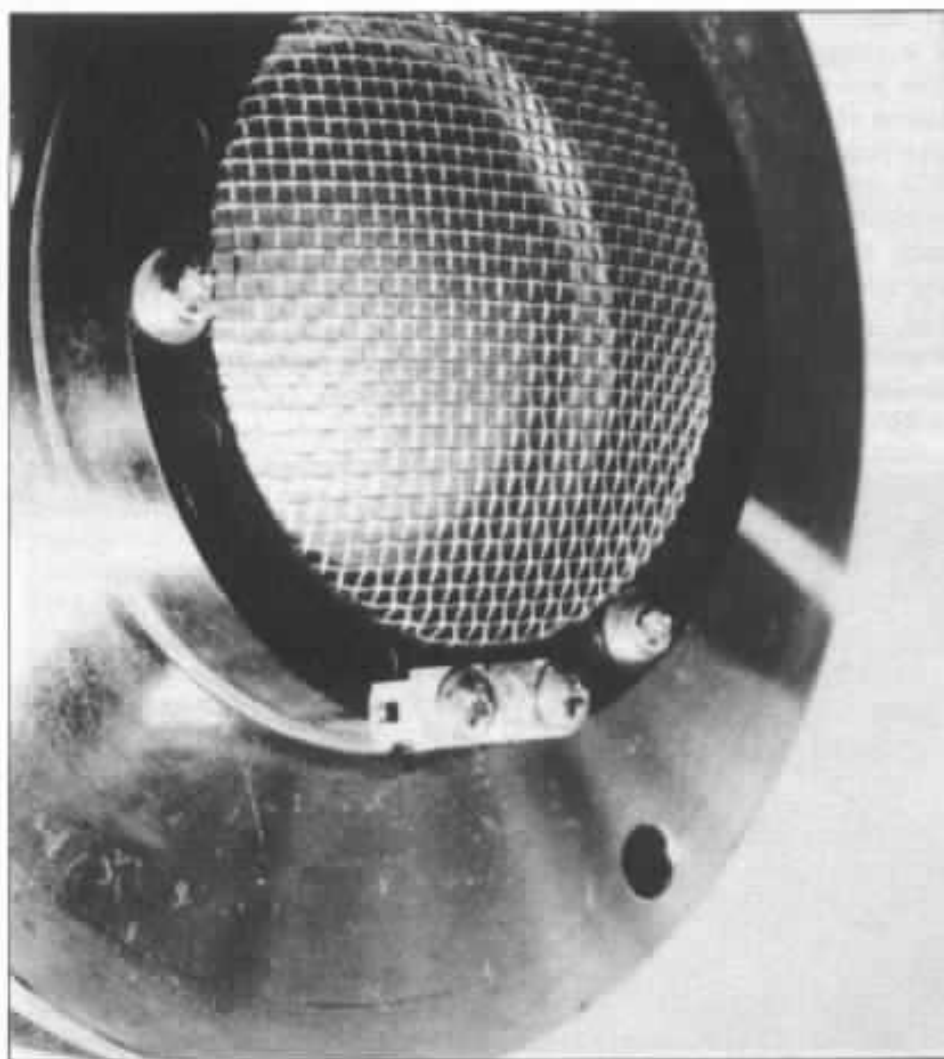


Photo 9 : Partie postérieure du TAD 2001 : le diaphragme est protégé par une grille.

Points de détails

Le diaphragme d'une chambre de compression rayonne évidemment sur l'arrière. Sauf exception, cette partie est close et souvent amortie par une plaque de mousse dont l'efficacité n'est pas toujours probante. Il vaut mieux la remplacer par une découpe de feutre. Il en est de même des fils reliant le bornier arrière aux coses de la bobine mobile. Leur remplacement par un fil de câblage de qualité (l'Isoda pour câblage interne est disponible !) est un apport très net dans le haut du spectre, sur du violon ou des applaudissements...

Sur la photo 9, on voit très bien l'assemblage du diaphragme sur un TAD 2001. Les fils peuvent être soudés directement sur les deux coses. Le support du diaphragme est encastré sur toute sa circonférence pour permettre un centrage précis de la bobine. Sur certaines compression, il se fait par l'intermédiaire de picots. Le serrage de l'ensemble doit être observé avec l'aide d'un générateur BF pour en assurer une parfaite répartition

(rappelons la très faible distance séparant la membrane de la pièce de phase !). A noter, qu'il est déconseillé d'appliquer un fort signal à un moteur lorsque celui-ci n'est pas relié au pavillon. Dans ce cas, le diaphragme n'est pas chargé acoustiquement, ce qui augmente les risques de rupture en cas de fortes amplitudes (ne pas dépasser 0,1 W (0,9 V) à 100 Hz).

Toujours sur la photo 9, apparaît une grille protégeant la membrane des chocs mécaniques : à ce niveau, l'aimant très puissant peut attirer violemment un objet (tourne-vis ou vis) contre le diaphragme...

La partie antérieure, reliée au pavillon, comporte la buse de sortie débouchant sur la gorge (cf. photo 10). Celle-ci a un diamètre courant de 1 ou 2 pouces (certains moteurs ont des \odot intermédiaires ou pouvant monter à 2,4 pouces pour ceux de bas-médium). La fixation sur le pavillon se fait par vissage comme détaillé sur la figure 2. Il est offert deux possibilités sur le TAD : en deux ou trois points. En tout état de cause, le serrage doit être rigoureux pour éviter toute fuite acoustique à ce niveau.

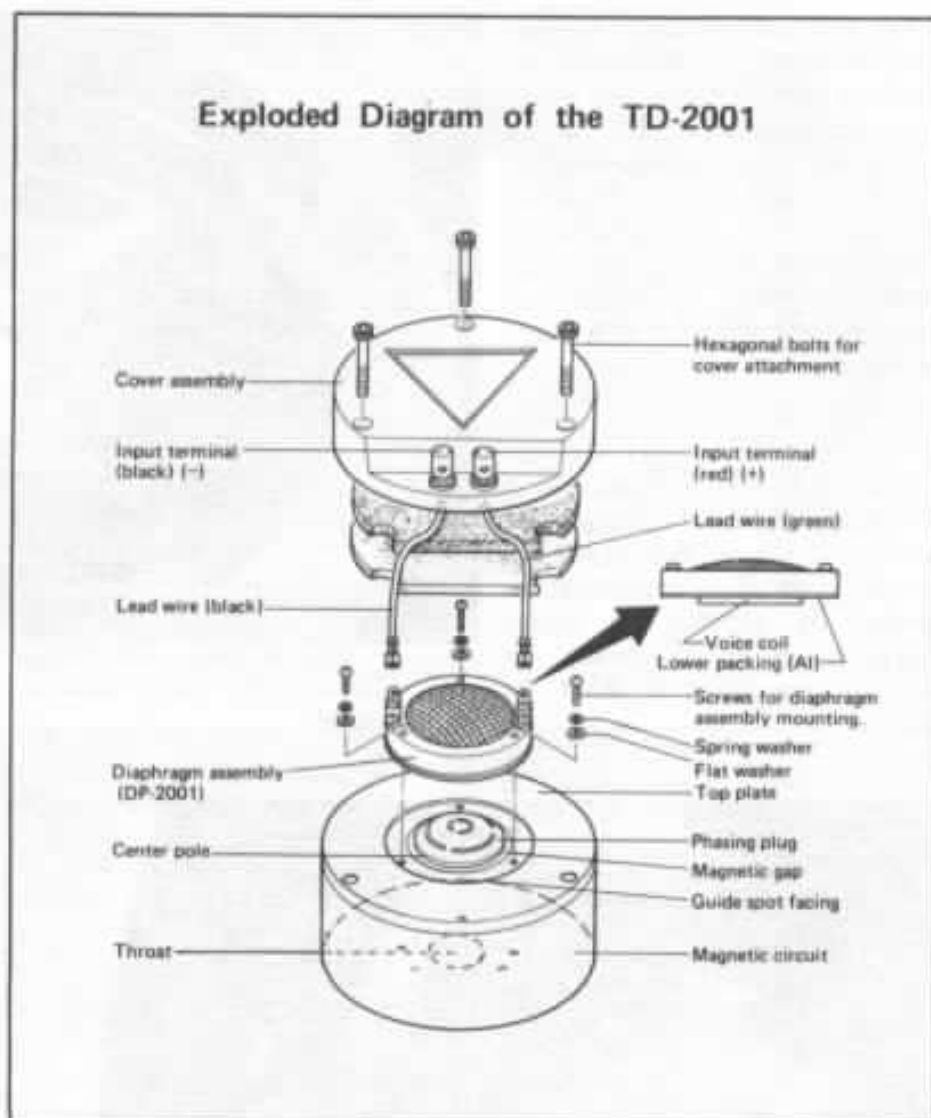


Fig. 1 : Vue éclatée du TAD 2001 permettant de mieux comprendre le positionnement des diverses pièces mobiles du moteur.

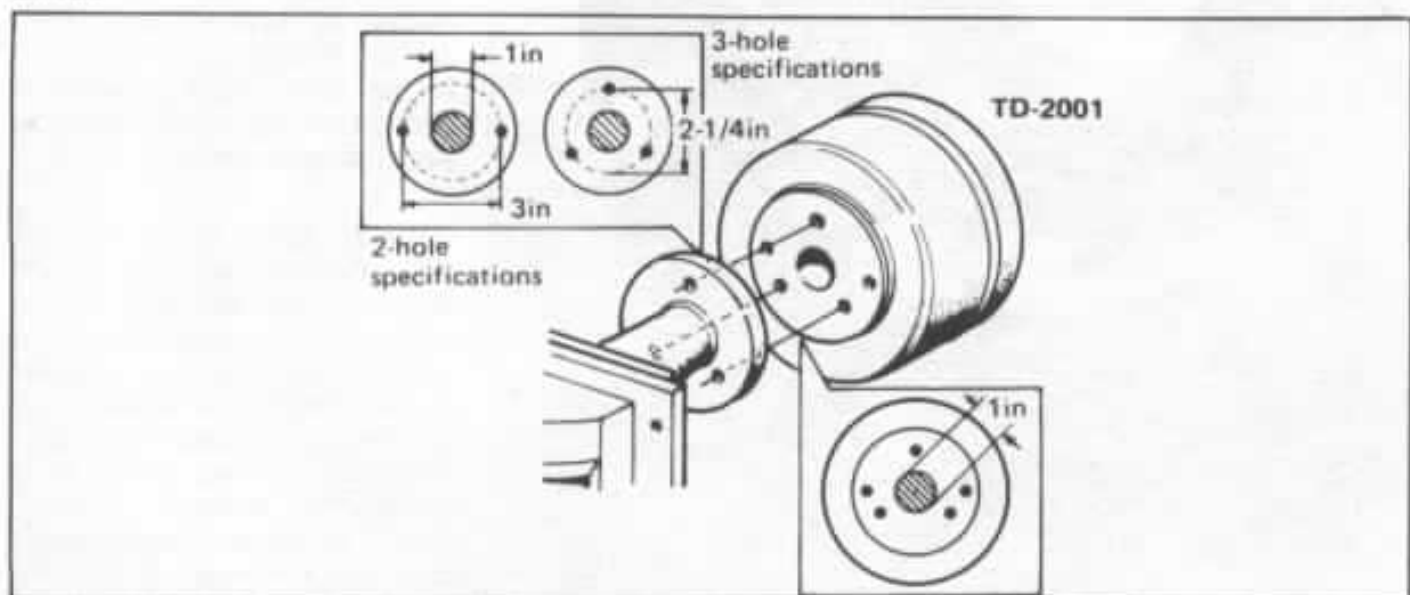


Fig. 2 : Possibilités de montage du moteur TAD sur le raccordement du pavillon (1 inch = 25,4 mm, 2 1/4 inch = 57,2 mm, 3 inches = 76,2 mm).

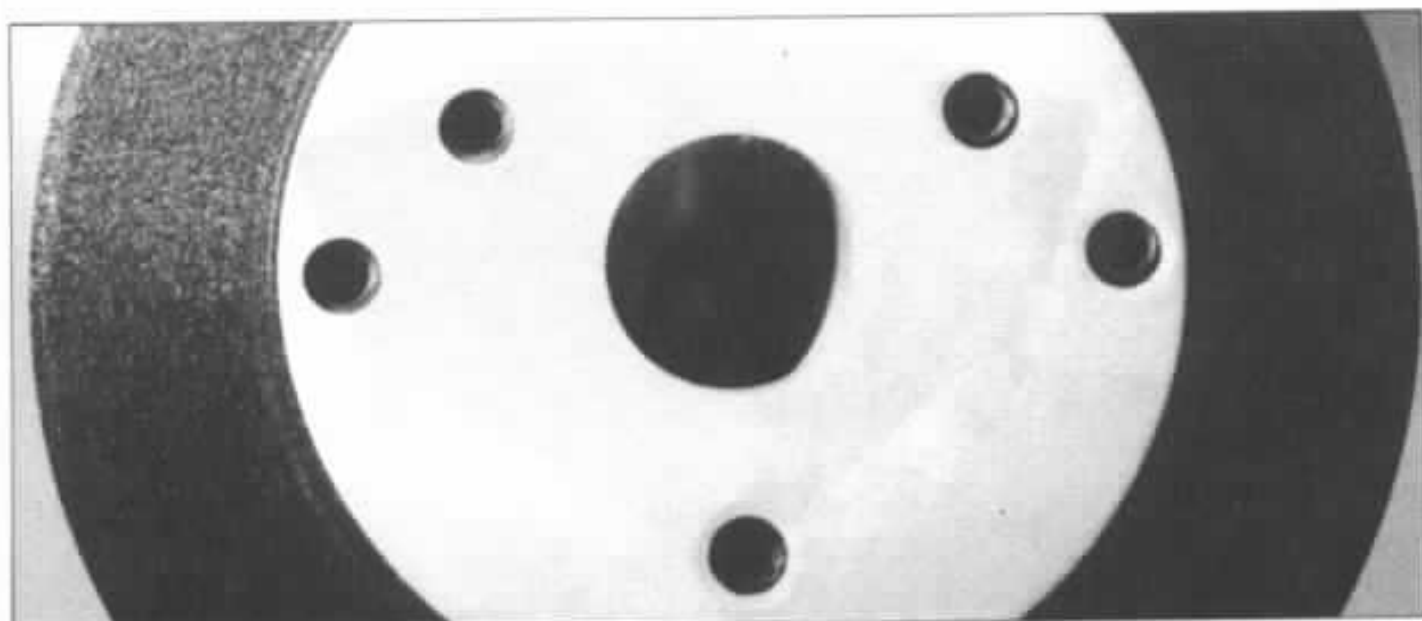


Photo 10 : Buse de sortie du TAD 2001 : le matériau utilisé est important pour la neutralité du moteur. On aperçoit au fond une fine grille protégeant la partie mobile de la poussière.

Performances des moteurs à compression

Le premier point positif des haut-parleurs à pavillon vient des possibilités quasi-illimitées de modeler la répartition spatiale. Les haut-parleurs traditionnels ont pour gros défaut un facteur de directivité proportionnel à la fréquence. Ceci est loin d'être intéressant dans la mesure où la salle d'écoute est un local semi-réverbérant dans lequel l'équilibre du message dépend beaucoup plus de l'émission en puissance totale des haut-parleurs que de leur réponse en pression mesurée en un point d'une chambre anechoïde. Le local renvoie à l'auditeur une forte proportion de ce rayonnement total. Celle-ci, ainsi que la réponse en fréquence, le temps de réverbération, etc... ne sont pas constants. En fonction de ces critères propres au local, il faudrait modeler la diffusion spatiale dans le sens d'une meilleure stabilité de l'image. Avec les haut-parleurs à rayonnement direct, on est en présence d'une grande disparité de diffusion spatiale. Or, la distance critique

est, entre autres, directement proportionnelle au facteur de directivité et par la même à la fréquence (nous en avons déjà parlé lors des traitements acoustiques). La distance critique augmentera avec cette dernière, d'où une perte de présence en position d'écoute (souvent dès la zone médium). Ceci se traduit par une fatigue auditive d'autant plus que l'on essaie inconsciemment de compenser ce manque par un accroissement du niveau général.

Les pavillons (dont nous reparlerons prochainement) permettent de se rapprocher plus précisément de l'égalisation de la distance critique en fonction de la fréquence (du moins jusqu'au bas-médium : dans le grave, le problème est différent).

Deuxième point positif des chambres de compression : leur rendement. Il est évident que les enceintes à bas rendement se voient dans l'impossibilité manifeste de reproduire la dynamique



Photo 11 : Moteur TAD 2001 : exemple d'une compression conçue dans un esprit «Audiophile»...



Photo 12 et 13 : Association TAD 2001 + pavillon en bous sablé : un couple inséparable !

dans son intégralité. Les alimenter avec des amplis très puissants (ce qui n'est pas souvent synonyme de qualité) n'est qu'un leurre du fait de saturation acoustique se manifestant d'autant plus rapidement que la musique est avant tout constituée de transitoires. Sans compter les problèmes de pertes en ligne, de tenue des composants, d'échauffement des bobines... Pour obtenir du rendement, il faut alléger l'équipage mobile et augmenter la puissance magnétique. En ce qui concerne la masse de l'équipage mobile, les haut-parleurs à rayonnement direct, quels qu'ils soient, ne peuvent pas rivaliser face à la légèreté du diaphragme des moteurs !

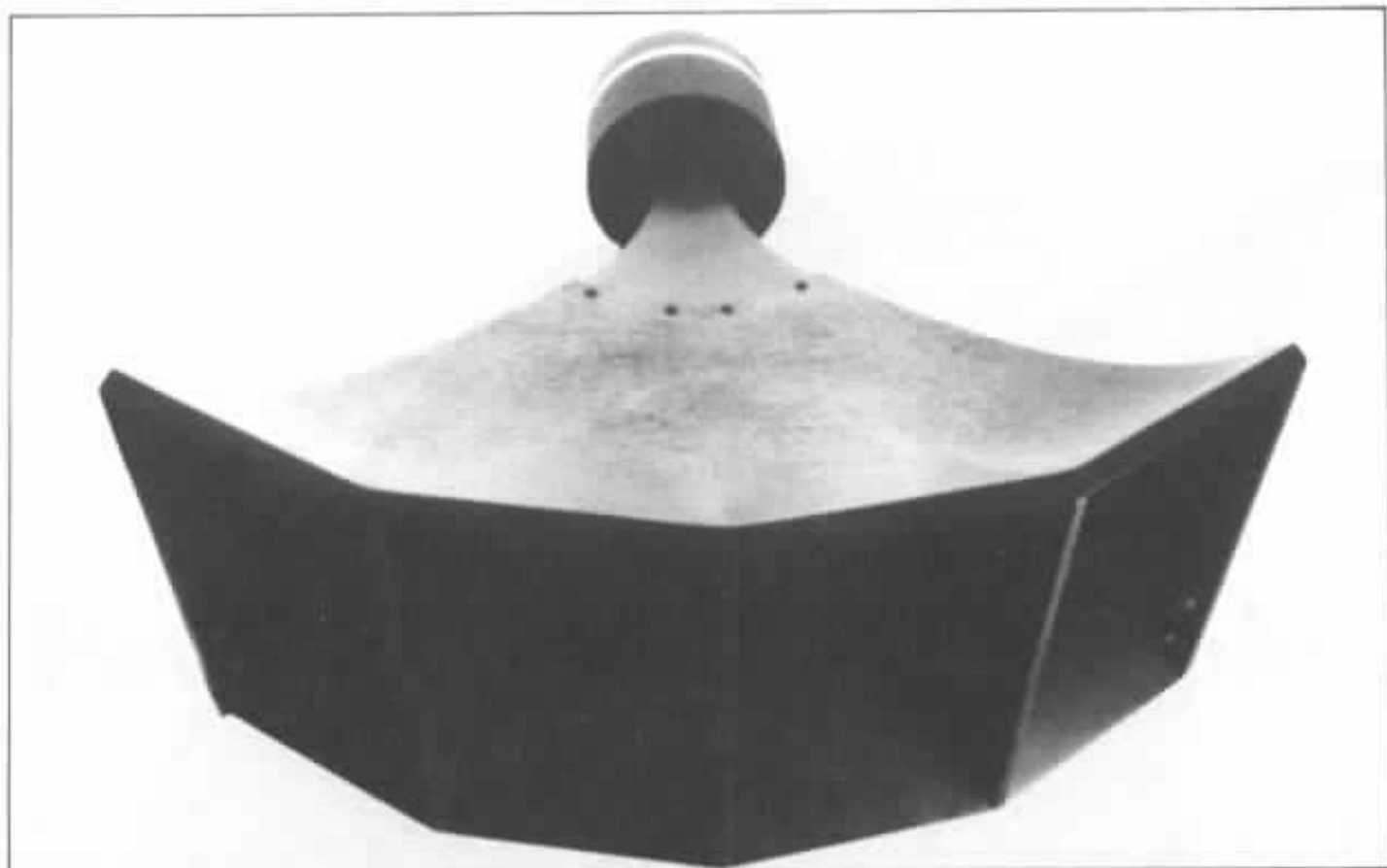
Il existe cependant des haut-parleurs traditionnels dont le rendement est important, mais les résultats ne sont pas du tout comparables à ceux obtenus avec les compressions. Ceci, du fait

que leur rendement ne leur donne pas pour autant la possibilité mécanique de rayonner plus d'énergie. N'oublions pas que pour une puissance acoustique donnée, l'élongation d'un haut-parleur Rice Kellogg est proportionnelle à l'inverse du carré de la fréquence $1/f^2$, du moins pour les fréquences dont les longueurs d'onde sont en rapport avec le diamètre de la membrane. Pour les petites longueurs d'ondes, celle-ci ne fonctionne de toute façon plus en piston ! En ce qui concerne les haut-parleurs à pavillon, l'élongation est seulement proportionnelle à $1/f$ (ceci étant dû à l'adaptation correcte avec l'air ambiant). Un exemple en donnera une idée précise.

A 200 Hz, pour un 1 watt acoustique (ce qui est important, mais réaliste) le diaphragme d'un moteur 2 pouces se déplace de 0,2 mm. Dans les mêmes condi-

tions, un haut-parleur de 17 cm aura une élongation de 4 mm et celle d'un 12 cm atteindra 8 mm ! Un système électroacoustique marche d'autant mieux que l'élongation est faible. Quand celle-ci augmente, le BL s'écroule, la surtension augmente avec toutes les conséquences que cela peut avoir sur la réponse transitoire, le rendement... Les mesures faites sur un 17 cm montre que le BL perd 10 % pour 4 mm d'élongation et 40 % pour 8 mm. La « puissance » du moteur étant proportionnelle au carré du BL, comment ne pas sourire quand on voit des enceintes utilisant des petits haut-parleurs pour reproduire le grave !...

De plus, ce qui intéresse l'Audiophile, ce sont les régimes transitoires et impulsions qui lui font souvent dire qu'un haut-parleur n'est jamais assez rapide ! L'énergie nécessaire



pour faire vibrer une membrane est proportionnelle à sa masse mobile et au carré de sa vitesse. Cette dernière est donc prépondérante. On comprend mieux au vu de ce que nous venons de voir que les haut-parleurs traditionnels verront leur vitesse de réponse chuter dans les basses fréquences. Lors d'un transitoire à spectre riche, il s'ensuit que tous les composants de ce transitoire n'auront pas «droit» à la même vitesse de réponse, d'où altération des timbres par non respect des niveaux relatifs. Ceci d'autant plus que le maximum d'énergie se concentre vers la fréquence fondamentale.

Les moteurs à compression et leurs pavillons ne sont pratiquement pas sujets à ce défaut, d'autant plus que leurs faibles elongations s'appliquent à des équipages mobiles extrêmement légers.

Autre avantage des moteurs à compression : l'absence de son

de membrane, ce qui est loin d'être le cas des haut-parleurs traditionnels. Ceci vient du fait que l'ensemble moteur-pavillon n'opère la transformation quasi-directe de l'énergie électrique en énergie acoustique que si la membrane fonctionne en piston. Cette transformation est la génératrice de leur rendement : jusqu'à 50 % en théorie, contre 5 % pour les meilleures Rice Kellogg.

En ce qui concerne les mesures de distorsions, nous reportons le lecteur à celle effectuées dans le n°21 sur l'ensemble JBL 2441 + pavillon Iwata : soit 2 % entre 500.5000 Hz pour 114 dB et à peine 0,1 % pour 94 dB ! Ceci se passe de commentaire...

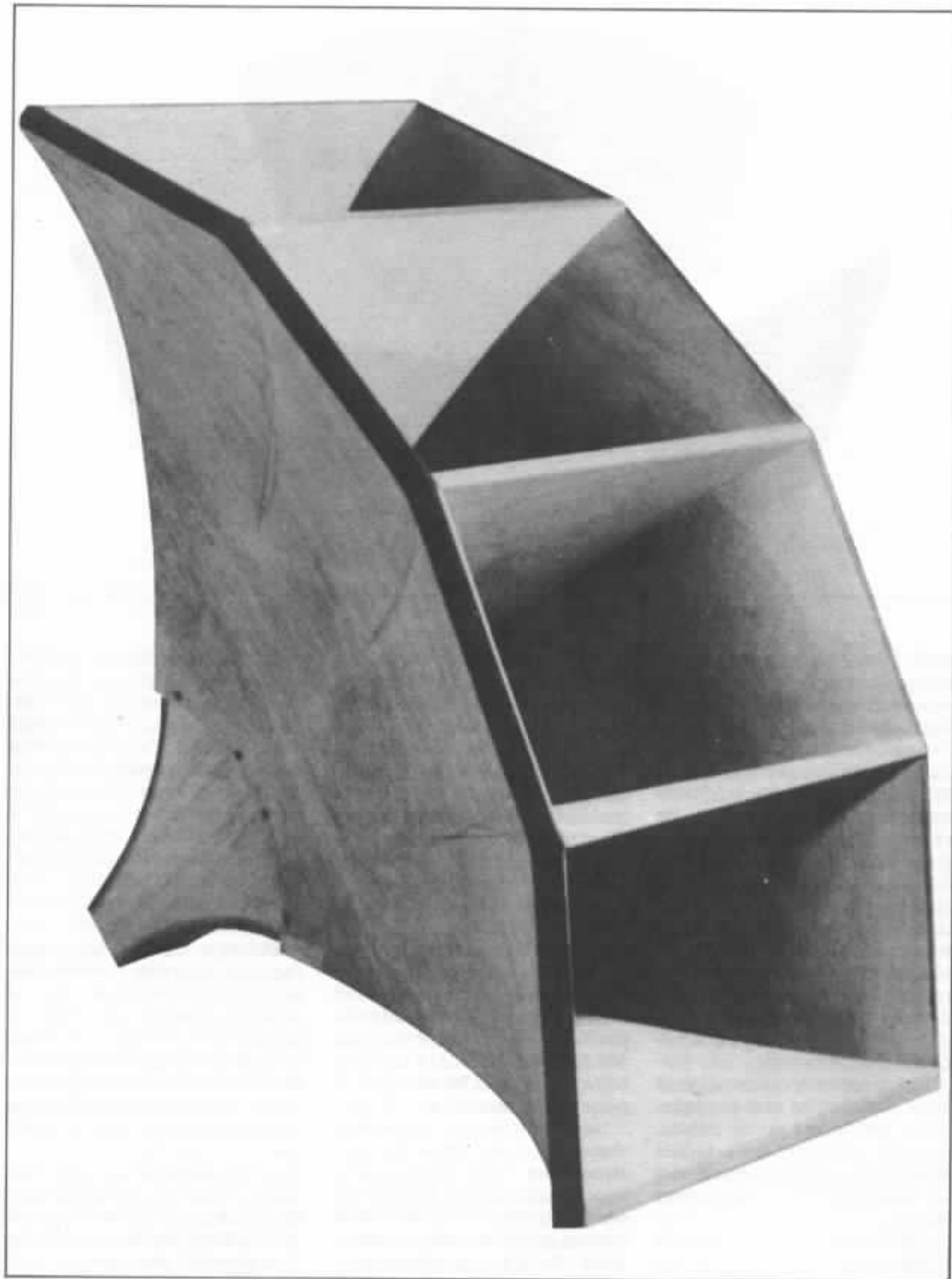
Nous terminerons ce premier chapitre par une remarque concernant les taux de distorsion dont certains parlent au sujet des compressions. Les mesures sont souvent effectuées avec une puissance électrique constante quel

que soit le type de haut-parleur, ce qui est aberrant ! Ce qui compte, c'est le niveau de sortie. Le rendement étant très différent d'un type à l'autre, si l'on mesure un haut-parleur à pavillon avec 10 W en entrée, pour être objectif c'est avec 200 W qu'il faudrait mesurer la plupart des haut-parleurs conventionnels... Combien le font ?

Conclusion

Bien que succinct, nous espérons que cet article répondra aux nombreuses questions que se posent nos lecteurs sur ce type de transducteurs encore bien méconnus malgré leur âge ! Nous reviendrons dans un prochain article sur ces éléments indissociables que sont les pavillons...

Tout Audiophile sait que leurs fabrications est un facteur prépondérant pour les résultats subjectifs. L'article qui suit en donnera une idée assez précise...



Pavillon 1" en bois sablé... ou quand le mythe devient réalité !

Jacques Le Dauphin

Le nombre d'audiophiles qui, en France, sont maintenant convaincus qu'en dehors des systèmes à pavillon et à chambre de compression il n'y a pas de salut, ne cesse d'augmenter.

Le travail que Jean Hiraga accomplit dans ce sens depuis une dizaine d'années n'y est certes pas étranger. Je me souviens à quel point un de ses articles, paru dans l'ancienne Revue du Son (n° 275 de mars 1976), sur les haut-parleurs Onken, m'avais surpris et fait rêver...

L'introduction du pavillon Iwata pour moteur 2 pouces a constitué, je pense, une étape décisive et a permis de nombreux travaux et expériences.

Les conclusions que, pour ma part, j'ai tiré de ces expériences sont les suivantes :

- a) Le profil Iwata est extraordinairement performant.
- b) Le comportement vibratoire des parois d'un pavillon est plus important que son profil ! (Sous réserve, évidemment, que ce profil ne soit pas n'importe quoi !)

c) Le moteur est plus important que le profil du pavillon.

d) On a tendance à utiliser la configuration Iwata + moteur 2 pouces sur une trop large plage de fréquences (souvent 400 Hz à 6 ou 7 kHz).

S'il est intéressant de pouvoir couper bas un moteur 2 pouces, comme les JBL 2440 ou 2441 à 400 Hz, et d'avoir ainsi profité de la coupure très basse du pavillon lui-même, les grandes dimensions de sa surface d'embou-

chure impliquent une profondeur également importante et donc préjudiciable aux résultats dans le haut du spectre.

Cette situation est aggravée par les moteurs eux-mêmes, loin d'être subjectivement aussi satisfaisants dans ce secteur que ce que prétendent les constructeurs et les utilisateurs professionnels qui n'ont pas du tout les mêmes exigences que les Audiophiles.

La difficulté qu'il y a à trouver des tweeters de haut-rendement

et de bonnes performances subjectives, oblige à choisir la fréquence de coupure haute, la plus élevée possible.

On est ainsi coincé entre deux exigences contradictoires - phénomène fréquent dans le domaine qui nous intéresse, et qui aboutit aux éternels «bons compromis» -.

Cette analyse peut amener l'Audiophile, avec son désir légitime de toujours vouloir progresser, à :

a) passer en 4 voies.

Non pas en réalisant une voie bas-médium (nous n'avons pas, hélas, le moteur nécessaire !) mais une voie haut-médium à partir d'un moteur 1 pouce performant dans le haut du spectre. Cette solution aboutit à une complication certaine du système, surtout en multi-amplification.

b) Admettre pour le moment notre impuissance à faire mieux que ce que fait le caisson Onken +416.8 dans la zone 400 -

600 Hz et à chercher par contre à progresser dans la zone des 500 - 600 Hz à 6 K - 8 kHz.

C'est finalement, et pourquoi le cacher, le concept Onken en 3 voies :

La coupure basse envisagée permet d'aboutir à un pavillon de surface d'embouchure nettement plus réduite que celle de l'Iwata 2 pouces (environ 13 dm² au lieu de 29 dm²) et donc que profondeur réduite (environ 47 cm au lieu de 57 cm), devant ainsi permettre de profiter pleinement des qualités d'un bon moteur 1 pouce.

La prise de conscience mentionnée plus haut, de l'importance considérable du comportement vibratoire du pavillon m'avait amené, en automne 1984, à réaliser un prototype de pavillon sectoriel en bois sablé, pour moteur 2 pouces.

J'avais fait part des excellents résultats obtenus à l'équipe de l'Audiophile, qui de son côté, m'informait des excellents résultats obtenus avec le moteur TAD

2001 associé à un pavillon ALTEC 511 B.

De là à décider de développer en commun un pavillon en bois sablé pour moteur 1 pouce, il n'y avait qu'un pas... !

Définition du projet

— Plage de fréquences d'utilisation envisagée : 600 Hz - 8 kHz (f_c du pavillon \approx 270 Hz)

— Angle de directivité horizontale : 90°

— Angle de directivité verticale : 40°

— Mode d'accroissement des sections : exponentiel

— Type de construction : bois sablé. Donc pavillon sectoriel pour une question de rigidité et de tenue mécanique.

Le pavillon calculé et dessiné suivant ces données allait inévitablement ressembler au Onken SC 500 Wood ou l'Altec 511 B (toujours cette vieille longueur d'onde qui s'obstine, pour une fréquence donnée à vouloir rester la même... !)

Voir figure 1 les cotes du pavillon.

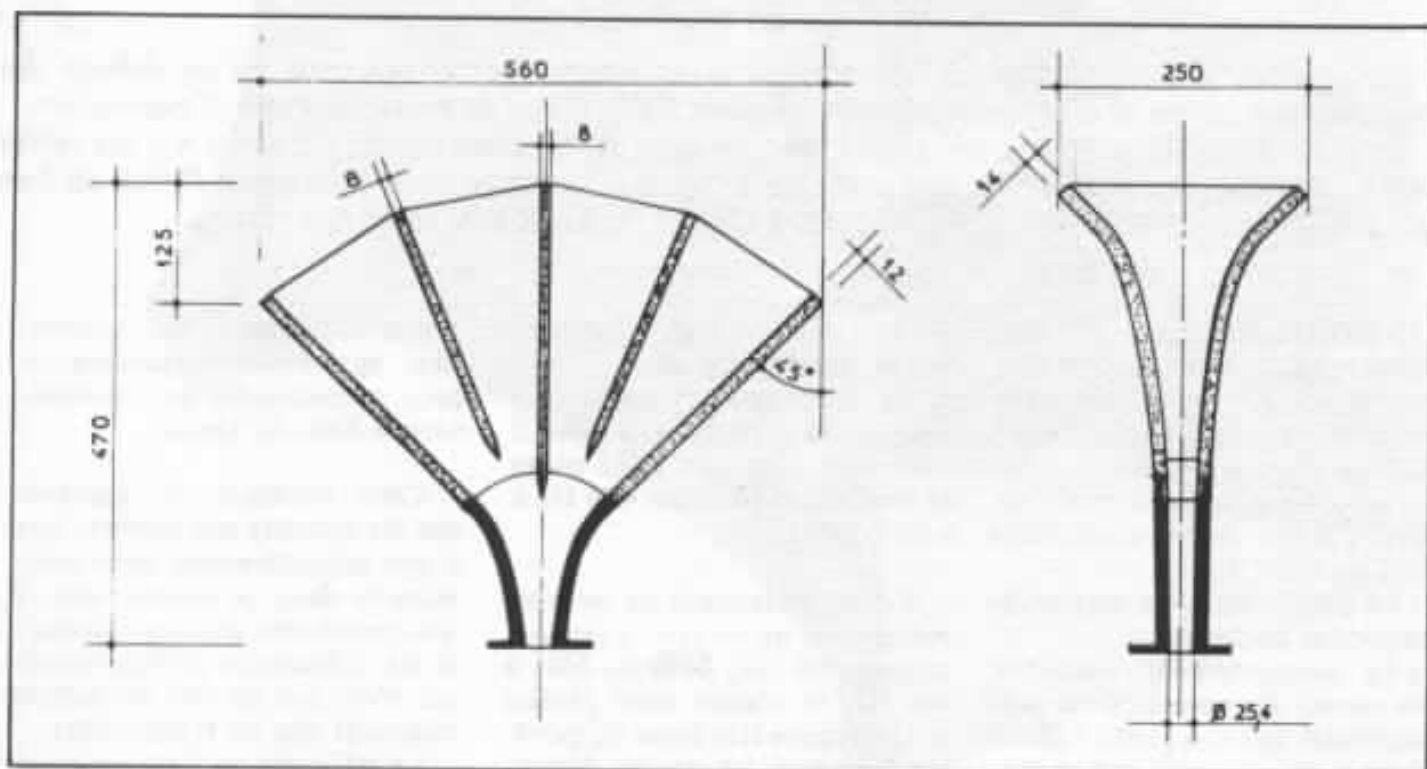


Fig. 1 : Cotes d'encombrement du pavillon.

La réalisation du projet

Si la définition du projet est aisée et accessible à tous à partir de quelques formules mathématiques, la réalisation de pavillons en bois sablé est beaucoup plus épineuse. Ce genre de construction est non seulement très long et très laborieux (ce qui ne change guère des pavillons Iwata) mais en plus très acrobatique. Si la réalisation de pavillons en bois plein, comme décrite dans l'Audiophile n°25 représente pour l'amateur un investissement en heures de travail et en matériaux, l'aboutissement à un bon résultat est quasiment assuré. Il en va tout autrement pour la réalisation que nous allons décrire, et qui correspond à celle des pavillons prototypes qui étaient en démonstration lors des Journées de la Haute Fidélité au Sofitel en mars 85.

Précisons que les pavillons issus de ces prototypes sont construits suivant une méthode légèrement différente, plus fiable et plus productive mais nécessitant la fabrication de divers outillages (moules, gabarits...) dont la mise au point ne se justifie que pour une fabrication en petite série, comme celle développée actuellement en commun avec les Réalisations de l'Audiophile.

Choix des bois, sablage

Les surfaces libres maximales des parois sont d'environ 2 dm². L'expérience des pavillons Onken conduit à envisager comme bonne épaisseur pour ces parois environ 1,5 mm à 2 mm, et comme épaisseur de sable, 4 à 5 fois plus, soit de 8 mm à 10 mm. Le bois utilisé doit assurer de hautes performances au niveau de la rigidité, comme il a été démontré avec les caissons de grave Onken, mais en plus au niveau des états de surfaces, et des possibilités de cintrage. Les contreplaqués habituellement

disponibles sont d'une qualité très nettement insuffisante et de surcroît non disponibles sous de telles épaisseurs.

Après avoir envisagé d'utiliser des contreplaqués de bouleau - que l'on peut trouver dans les magasins d'aéromodélisme - et qui sont assez satisfaisants, je me suis finalement orienté vers des contreplaqués dits «CTP Okoume Aviation» (utilisés pour la construction des avions légers). Ces bois subissent de nombreux contrôles en fabrication (chaque feuille de placage est «mirée» pour détecter tout défaut d'homogénéité) et sont réceptionnés en sortie par le bureau Véritas et bénéficient de certificats de conformité aux normes aviation. L'aspect, la qualité des placages utilisés, le collage par des colles Résorcine, résistantes à l'humidité, la résistance mécanique et l'aptitude à la mise en forme de ces contreplaqués font qu'ils correspondent parfaitement à nos besoins, malgré leur prix élevé (plus de 160 F/m² pour du 20/10 !)

Le sablage mérite lui-aussi quelques soins. Sur le plan des résultats subjectifs la granulométrie des sables utilisés est beaucoup moins importante qu'un très bon remplissage. Celui-ci est plus facile à obtenir avec du sable très fin. Le sable doit évidemment être parfaitement sec et il convient de l'étuver à four chaud, étalé en faible épaisseur pendant environ 1/4 heure (ne pas arroser en fin de cuisson ! Servir froid mais non glacé.) Le remplissage nécessite une bonne vibration, et, à défaut de pouvoir utiliser une table vibrante, il faut «tapotter» les parois avec un petit marteau en interposant un «martyr» (chute du contreplaqué).

Il faut se montrer très patient, car après plusieurs opérations remplissage-vibration il continue de rentrer du sable !

Film de la construction

La construction se fait à partir des cloisons verticales (en position d'écoute). Une âme centrale (en contreplaqué de 5 mm pour les cloisons intérieures et de 8 mm pour les extérieures), correspondant au profil extérieur du pavillon, est prise en sandwich entre deux épaisseurs de 2 mm correspondant au profil intérieur. On réalise ainsi une feuillure qui permet le collage des secteurs horizontaux (toujours en position d'écoute) et une nervure qui donne l'épaisseur du sablage du dessus et du dessous.

Voir figure 2.

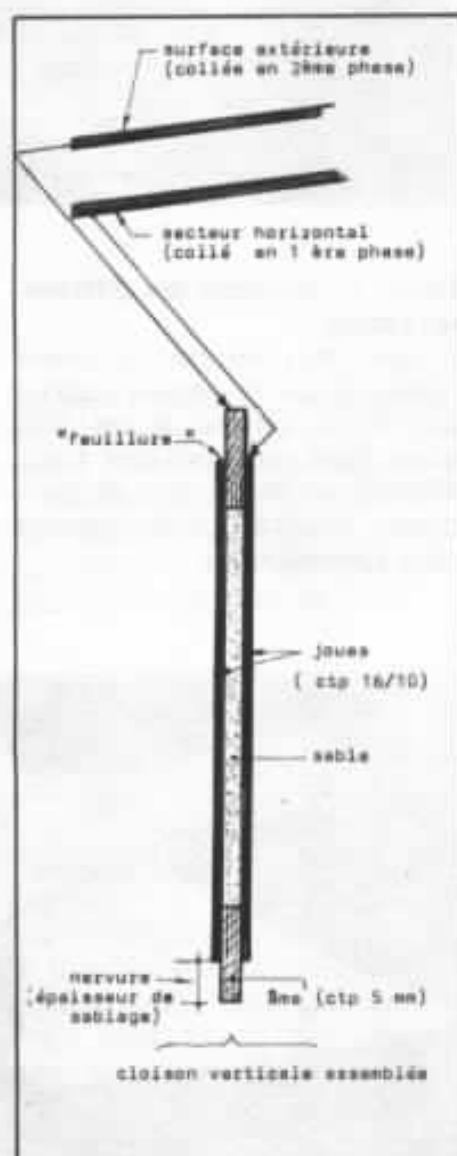


Fig. 2 : Principe de fabrication.



Photo 1 : Gabarits de découpage
 Les gabarits à droite et à gauche de la photo sont réalisés en tôle et permettent le découpage direct, à l'aide d'un cutter, du contreplaqué de 20/10.

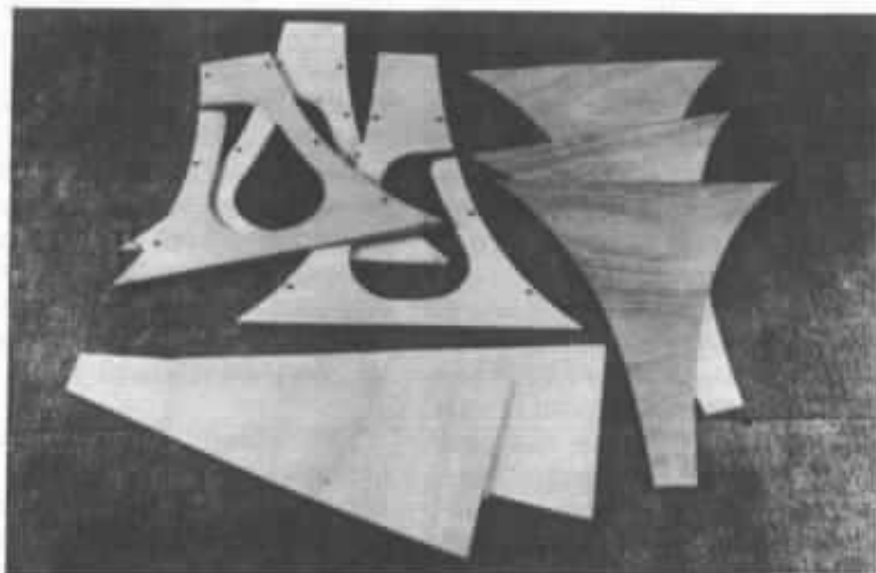


Photo 2 : Découpe des différentes parties

L'âme des cloisons verticales comporte un évidement central destiné au sablage de ces cloisons, ainsi que quelques trous disposés sur les nervures périphériques (utilisés ultérieurement pour l'assemblage).

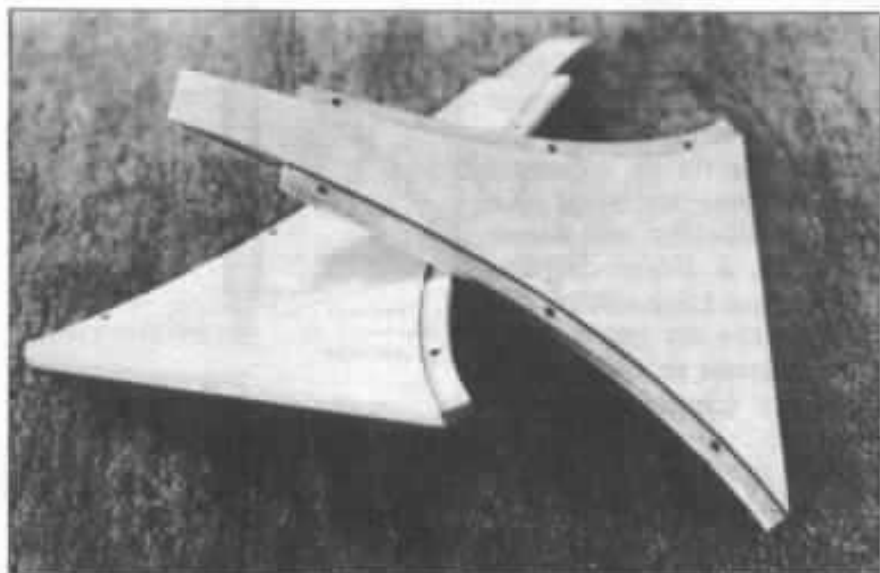


Photo 3 : Préparation des cloisons verticales

Collage du «sandwich» - Préparation des «queues» amincies - Sablage et bouchage - Ponçage.

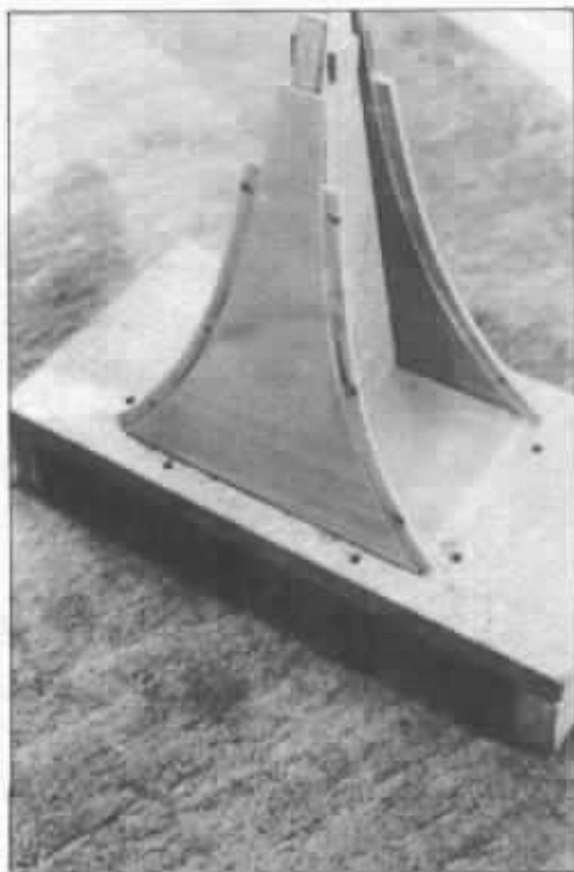
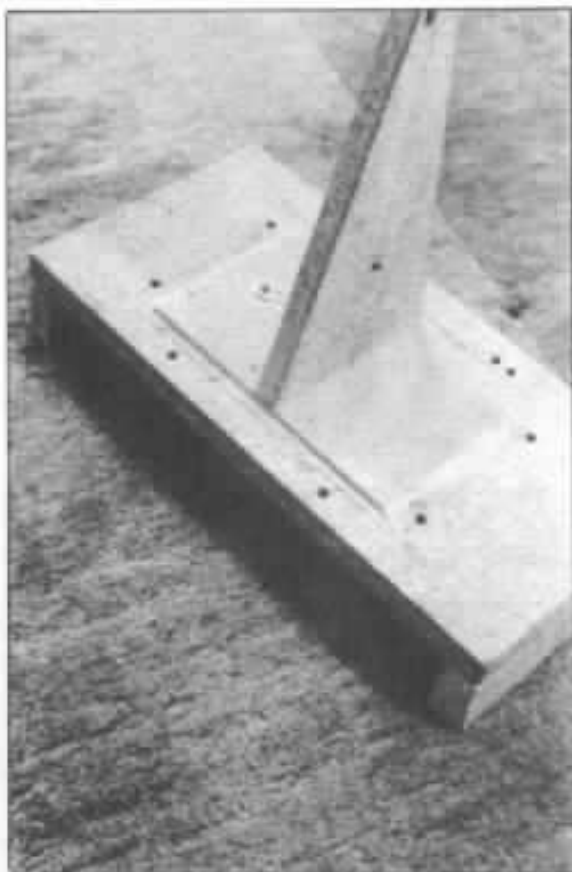


Photo 4 : Montage d'assemblage
 Sur le socle est disposée une première forme (qui correspond à l'embouchure d'un secteur pavillon) puis est fixé le guide central qui donne l'angle entre les cloisons verticales (soit $22,5^\circ$).

Photo 5 : Présentation des cloisons verticales

Photo 6 : Assemblage de la 1^{ère} cellule

Un système de serrage maintient en position les deux cloisons verticales. Après encollage, les secteurs horizontaux sont glissés dans leur feuillure. Des petites tiges métalliques sont glissées dans les trous mentionnés plus haut et permettent en interposant de petites cales de bois le maintient pendant le séchage.

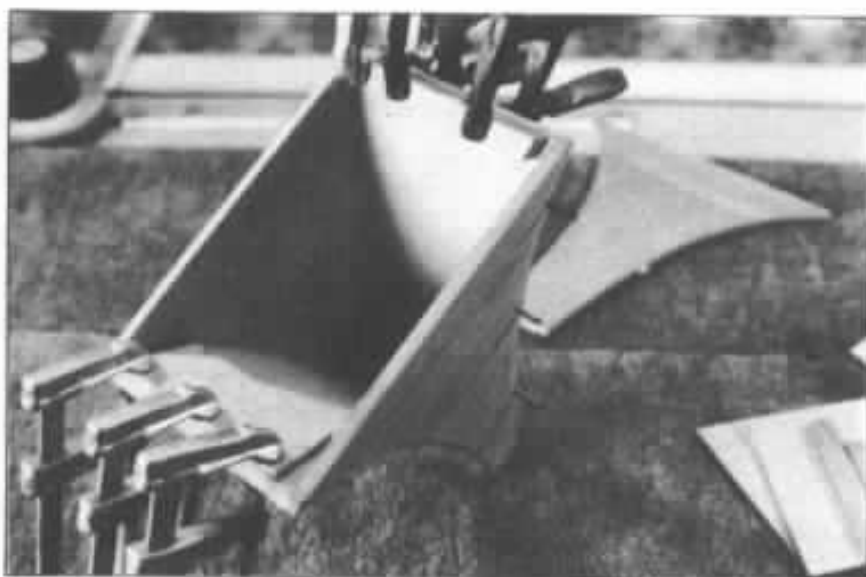


Photo 7 : Démoulage de la 1^{ère} cellule

Photo 8 : Assemblage de la 2^e cellule

On représente sur le moule la 1^{ère} cellule en la décalant d'un secteur, pour bâtir de la même façon la cellule suivante. Le pavillon va ainsi se développer à partir de la 1^{ère} cellule.

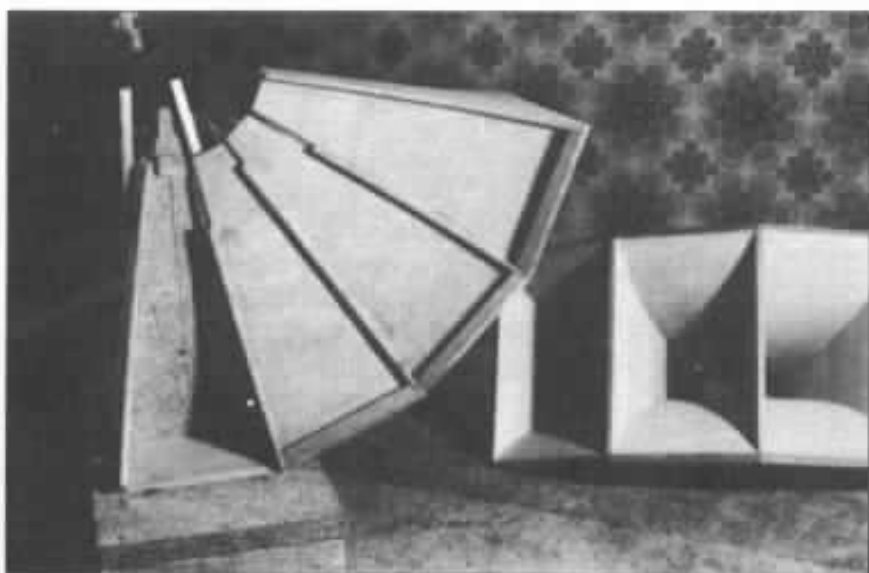
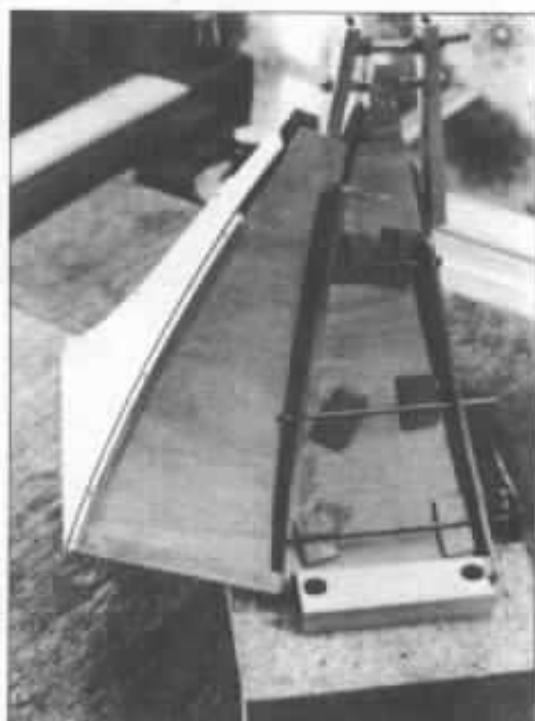


Photo 9 : Assemblage de la 4^e cellule

On comprend la précision nécessaire dans le travail de découpage et d'assemblage car les erreurs éventuelles avec ce type de montage sont amplifiées à chaque étape de la construction.



Photo 10 :

Collage de petites languettes au droit des « queues ». Préparation du raccordement à la pièce de raccordement moteur-pavillon.

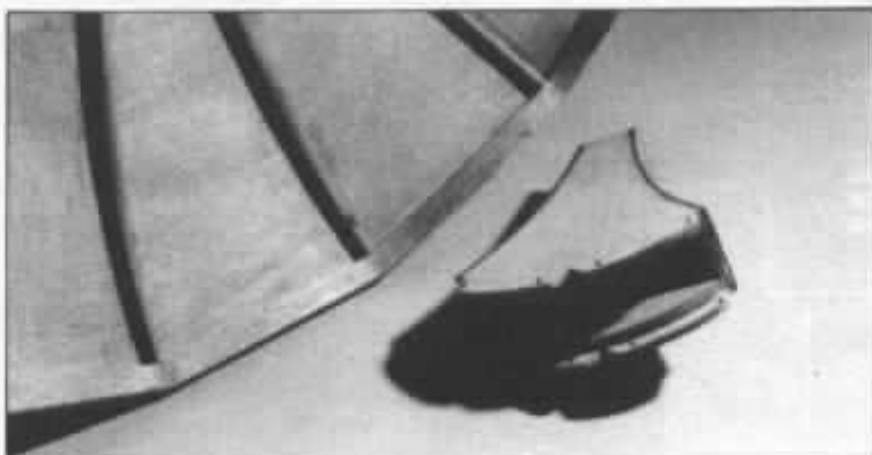
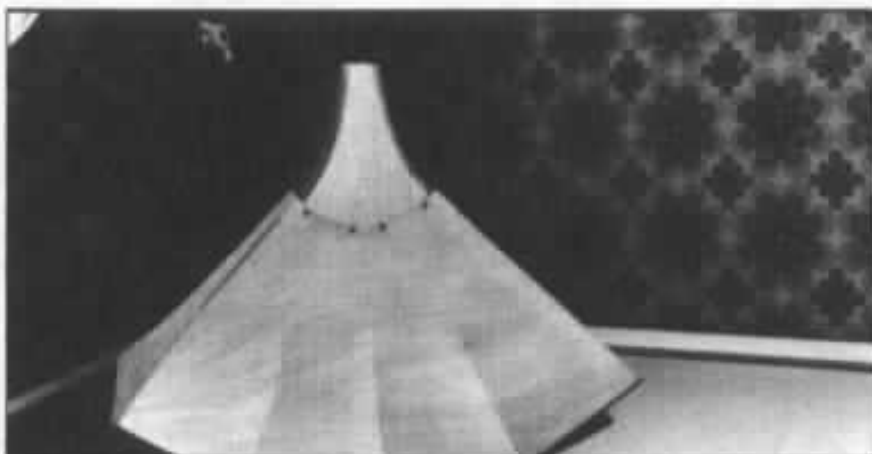


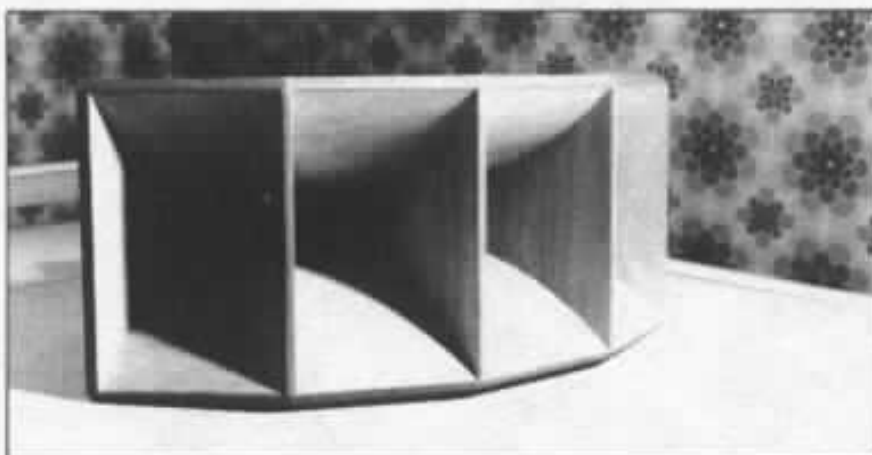
Photo 11 :

En premier plan la **pièce de raccordement** réalisée par sandwichs contreplaqué-feuilles de plomb collées à l'araldite.



Photos 12, 13, :

Collage des surfaces horizontales extérieures après mise au point de la forme de découpe. Sablage. Collage à l'araldite et vissage de la pièce d'adaptation. (L'étanchéité doit être parfaite).



Conclusion

Le processus paraît donc relativement simple. Ne vous y fiez pas trop... ! Il n'est pas possible dans le cadre d'un tel article, de développer toutes les difficultés qui se présentent, nécessitant maintes réflexions et maintes astuces. Une telle réalisation est en fait très délicate à mener à bien : pas de rafistolages ni de masticages cachant la misère. Il faut des découpes parfaites, pour que tout tombe à sa place, et aucun des collages n'est facile :

Photo 1 : Le « sandwich » doit être parfaitement symétrique, sinon il y aura décalage entre les cellules.

Photo 3 : Là aussi, moins facile qu'il n'y paraît : le collage doit être sûr, mais sans bavures à l'intérieure de la cellule.

Photo 12 : Mise au point du gabarit et collage des surfaces extérieures : dur ! dur !

Par contre les résultats sont là, et les visiteurs du Sofitel ont pu se rendre compte des qualités de ce pavillon associé au moteur TAD 2001 : J'vous raconte pas... !

**Page non
disponible**

Mesures et démesure

Héphaïstos

On voit de plus en plus souvent, en électroacoustique, des avis qui opposent bilans de mesures données par les appareils et résultats de comparaisons faites à l'oreille. Cette divergence niée par certains, professée par d'autres, est gênante et quand le directeur d'une firme japonaise spécialisée dans le haut de gamme déclare : «Tous les audiophiles ayant un peu d'expérience savent parfaitement qu'il existe un grand nombre d'appareils qui possèdent exactement les mêmes caractéristiques électriques, mais ne produisent pas le même son», on peut être légitimement inquiet sur l'avenir de la haute fidélité.

Cet article essaie de faire le point sur le problème des mesures pour la partie électronique, à la lumière des connaissances actuelles de la physiologie de la perception afin de proposer une approche métrologique plus satisfaisante que les méthodes actuellement utilisées et si fortement contestées.

Quand nous avons entrepris notre étude d'un amplificateur de puissance au dessus de tout reproche, nous avons exprimé et expliqué toutes nos réserves à l'égard des mesures traditionnelles (voir «La distorsion dans l'amplificateur de puissance», L'Audiophile n° 28) et indiqué notre refus que cette étude soit régentée par des méthodes de mesures dont nous connaissions trop les limites. Il fallait rechercher la linéarité dans tous les domaines sans se fier aveuglé-

ment à l'analyse restreinte d'un appareil de mesure limité, quelque soit sa précision et sa finesse de mesure dans son champ d'application.

Pour l'étage de sortie, le problème de linéarité se posait de façon tellement simple, que la mesure à faire s'imposait naturellement (voir les n° 29, 31 et 34 de L'Audiophile). Cette partie de notre étude est sur le point d'aboutir (ce sera le sujet d'un prochain article) et doit déboucher sur un nombre limité de

solutions auxquelles il est raisonnable de faire passer des tests de comparaisons subjectives.

Parallèlement à la fin de l'étude de l'étage de sortie, l'étude de l'étage d'entrée et des étages intermédiaires a débuté ; malheureusement, nos bonnes intentions se sont heurtées cette fois à l'extrême diversité des façons d'aborder le problème, et des solutions. Une approche «à l'oreille» pour trancher entre les différentes possibilités serait si longue et si difficile à mettre en

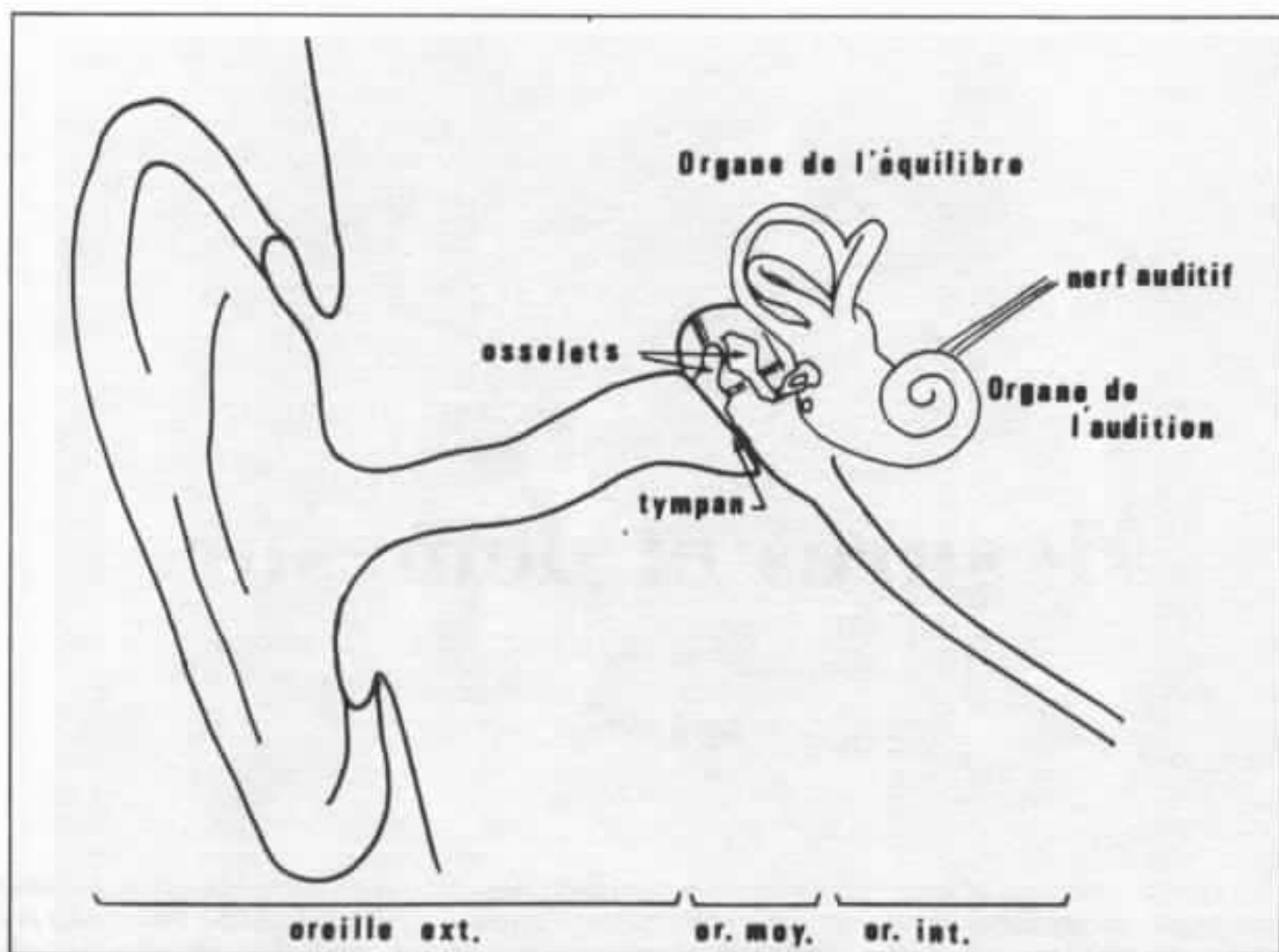


Fig. 1 : L'oreille humaine.

œuvre que je la considère comme quasiment impossible. Contraint donc à faire appel à la mesure, j'ai voulu réanalyser de façon rigoureuse les problèmes que celle-ci pose ; c'est un domaine effroyablement vaste, aussi cette réflexion a été limitée au domaine très restreint qui nous intéresse ici : l'amplification linéaire, même si certaines des idées exprimées ici peuvent trouver des applications dans un autre domaine.

Nous réexaminerons brièvement les bases traditionnelles de la physiologie de l'audition et nous verrons comment elles conduisent aux mesures classiques en audio. Puis nous verrons quelques limites, tant sur le plan physiologique que sur le plan électronique, des mesures classiques. Enfin, en analysant le pro-

blème qui nous préoccupe ici (l'amplification linéaire), nous essaierons de définir les mesures qui seront utilisées dans notre étude des premiers étages de notre amplificateur.

Bases classiques de la physiologie de l'audition

Comme ces bases sont bien connues de la plupart des audiophiles, nous n'entrerons pas dans les détails mais nous dégagerons les points qui sont à l'origine de notre problème. Ceux qui souhaiteraient approfondir le sujet, peuvent se reporter à la bibliographie qui est donnée à la fin de l'article.

L'oreille

L'oreille est habituellement décomposée en oreille externe,

oreille moyenne et oreille interne (voir la figure n° 1). L'oreille externe comprend le pavillon (excroissance cartilagineuse de forme complexe) et le conduit auditif. Le rôle de l'oreille externe est de capter les sons, elle protège l'oreille du vent et intervient dans la localisation de la direction d'arrivée des sons (il suffit de déformer fortement ses pavillons ou de couvrir ses oreilles avec ses mains pour être plongé dans un univers sonore nouveau où cette localisation n'est plus la même).

L'oreille moyenne est séparée de l'oreille externe par le tympan ; elle comprend essentiellement les osselets. Le rôle des osselets est d'adapter l'impédance acoustique de l'oreille interne (celle d'un liquide) à celle de l'air ; pour cela ils fonction-

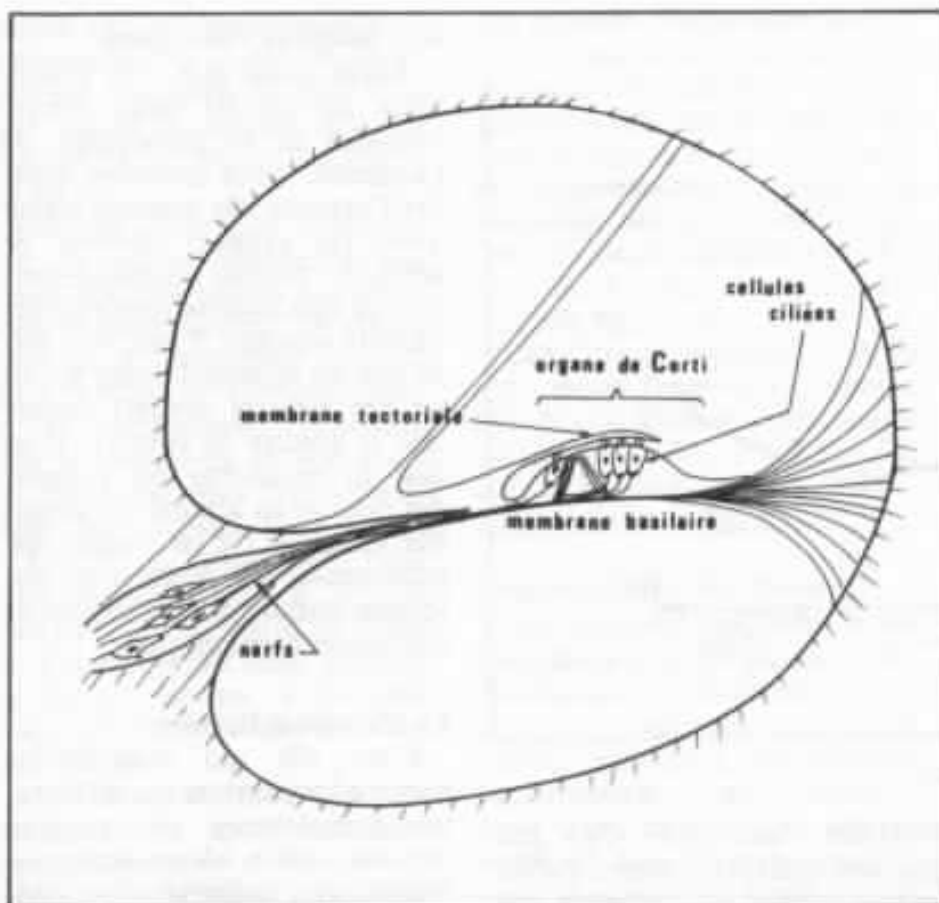


Fig. 2 : Coupe de la cochlée.

ment comme un levier qui réduit par un facteur d'environ 20 les vibrations du tympan. Grâce aux petits muscles qui relient les osselets à la cavité de l'oreille et qui peuvent être inconsciemment tendus, l'oreille moyenne peut aussi jouer le rôle d'un atténuateur variable.

L'oreille interne comprend les organes de l'équilibre et de l'audition : l'organe de l'audition est la cochlée, elle transforme les vibrations acoustiques transmises par la chaîne des osselets en signaux nerveux dans le nerf auditif. Elle se présente sous la forme d'un tube enroulé sur lui-même en forme de coquille d'escargot et séparé par plusieurs membranes dans le sens de la longueur (une coupe en est représentée sur la figure n° 2).

La plus importante de ces membranes est la membrane basilaire ; en effet celle-ci est capable au moyen de l'organe de Corti, d'être sensible à ses pro-

pres déformations. Ces déformations provoquent grâce à la membrane tectoriale des tensions sur les cils des cellules ciliées. Les cellules ciliées sont les premières cellules nerveuses de la chaîne auditive. Les signaux qui parcourent les fibres du nerf auditif sont des dépolarisations électriques de durée environ égale à 0,5 ms et de période comprise entre 1 et 20 ms.

Fonctionnement de l'oreille

La compréhension des phénomènes auditifs doit beaucoup aux travaux du mathématicien Fourier : celui-ci a en effet montré que tout signal périodique (de période P) peut se décomposer de façon unique en la somme de fonctions sinusoïdales de fréquence $\frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \frac{3}{P}, \frac{4}{P}, \frac{5}{P}, \dots$ etc.

Tout signal sonore périodique peut donc être décomposé en signal fondamental (la sinusoïde

de fréquence $\frac{1}{P}$) et signaux harmoniques.

La première contribution importante à la connaissance des phénomènes auditifs fut la loi d'Ohm (pas celle dont les électroniciens ont l'habitude) qui dit que l'oreille est seulement sensible au niveau des différents composants du son et qu'elle est insensible aux phases relatives des différents harmoniques. L'oreille ne fait qu'une analyse spectrale des signaux sonores.

Helmholtz qui avait inventé les résonateurs qui portent aujourd'hui son nom, pensa au siècle dernier que l'analyse harmonique des différents composants du son se faisait dans la cochlée au moyen de résonateurs accordés sur toutes les fréquences audibles, répartis le long de la membrane basilaire.

Il revient à von Békésy le mérite d'avoir montré expérimentalement que Helmholtz avait partiellement raison et partiellement tort. Il reçut d'ailleurs le prix Nobel pour ces travaux. Il observa au moyen d'un microscope les mouvements de la membrane basilaire à différentes fréquences et découvrit que celle-ci avait le fonctionnement d'une ligne de transmission dispersive accordée : les signaux sinusoïdaux ont une amplitude variable en fonction de la distance ; ils croissent jusqu'à un maximum puis décroissent. Le maximum est fonction de la fréquence, pour les fréquences aiguës il est près du début de la ligne, pour les fréquences graves il est situé au bout de la ligne. On a donc pu localiser tout au long de la cochlée les maximums d'amplitude correspondant aux différentes fréquences ; ceux-ci sont répartis de façon quasi-logarithmique.

Comme l'avait bien senti Helmholtz, la membrane est donc le siège d'une analyse spectrale des signaux acoustiques. Les 24 000 cellules ciliées corres-

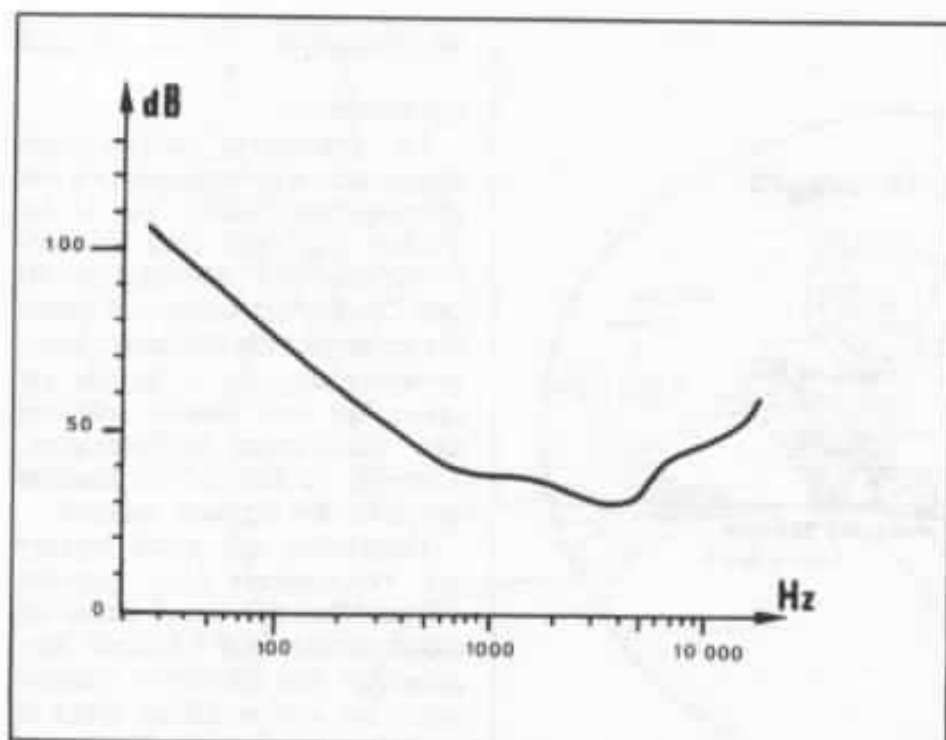


Fig. 3 : Courbe de sensibilité de l'oreille.

pondent à des fréquences différentes. Leur densité n'est pas uniforme, c'est ainsi qu'on explique la différence de sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence (voir la figure n° 3). On retrouve cette inégalité des fréquences pour l'oreille au niveau de la finesse d'analyse : si on recherche la sensibilité de l'oreille à une variation de la fréquence on trouve une sensibilité meilleure que 0,4 % entre 400 Hz et 4 000 Hz et qui décroît jusqu'au % pour les extrémités de la bande audio. La similitude avec la courbe de la figure n° 3 est remarquable.

Un son étant caractérisé par sa hauteur, son niveau et son timbre, sa hauteur est définie par la fréquence du fondamental et son niveau par l'amplitude des signaux. Ces deux notions suivent la loi de Weber-Fechner, c'est-à-dire que ces deux grandeurs sont perçues de façon logarithmique. Des sons dont les rapports des fréquences sont à une valeur donnée donnent l'impression d'être à une «distance en fréquence» fixe. De même, si on

multiplie l'amplitude d'un son par une quantité donnée, l'effet subjectif de la variation de niveau est indépendant du niveau initial.

Quant au timbre, on s'est rendu compte qu'en faisant varier le niveau des différents harmoniques on faisait évoluer le timbre du son obtenu ; on en déduit donc que le timbre était fonction du contenu harmonique des signaux audio.

Un dernier mot sur la localisation spatiale des sources sonores ; celle-ci semble due à deux phénomènes mis en évidence en contrôlant indépendamment les signaux reçus par chaque oreille : en faisant varier le niveau relatif des signaux envoyés aux deux oreilles, on fait évoluer la direction apparente d'origine des signaux. Si on envoie aux deux oreilles des impulsions non-simultanées, on perçoit deux signaux distincts quand ils sont temporellement très décalés ; puis un événement unique de direction variable quand le retard décroît puis en dessous de 0,05 ms on ne perçoit plus de différence.

Les mesures classiques

Après avoir très très brièvement survolé les bases fondamentales de la physiologie de l'audition, nous pouvons aborder l'examen des mesures classiques, car celles-ci dérivent de celles-là : comme l'oreille ne perçoit qu'une analyse spectrale des signaux sonores, il faut et il suffit que les appareils ayant à traiter des signaux sonores respectent le spectre de ceux-ci. Il ne faut ni retrancher ou atténuer des raies ni en ajouter ou amplifier certaines : c'est l'objet respectivement des mesures de distorsion linéaire et des mesures de distorsion harmonique.

La distorsion linéaire

C'est elle qui modifie les amplitudes relatives des différentes composantes des signaux sonores ; selon les circonstances (téléphonie, radiodiffusion AM, radiodiffusion FM, haute fidélité), les critères de qualité sont plus ou moins sévères ; l'idéal étant un niveau de transmission constant dans la bande audio : soit une bande passante à 1 dB (c'est à peu près la limite d'analyse de l'oreille) de 25 Hz à 16 kHz.

La distorsion harmonique

On l'appelle aussi distorsion non-linéaire, c'est elle qui crée de nouvelles raies ou qui modifie l'amplitude relative des différents harmoniques des fondamentaux. Pour la mesurer, on a proposé deux méthodes de mesure : la première consiste à utiliser un signal sinusoïdal pur (sans harmonique) qui est injecté à l'entrée du système à mesurer ; on filtre dans le signal de sortie la fréquence du signal injecté, le signal résiduel est composé de bruit et de signaux harmoniques produits par la distorsion ; la mesure de la distorsion est donnée par le rapport entre la puissance des signaux harmoniques

générés par le système mesuré et la puissance du signal de sortie (elle est exprimée en dB) ; on peut utiliser le rapport des tensions efficaces (elle est alors définie en %).

Avec les progrès de la technique, on a progressivement fait reculer les deux limites à la sensibilité de cette mesure : la pureté spectrale du générateur sinusoïdal et le pouvoir réjecteur du filtre du fondamental. On trouve dans le commerce de nos jours des distorsiomètres qui permettent de mesurer jusqu'à -120 dB de distorsion (voir *L'Audiophile* n° 28 p. 91) et dans le *Wireless World* de juillet 79, Linsley Hood nous propose un circuit propre à mesurer jusqu'à 0,00001 % de distorsion (-140 dB).

La seconde méthode de mesure de la distorsion non-linéaire consiste à injecter à l'entrée du système à mesurer deux signaux à deux fréquences distinctes et à observer en sortie

les produits d'intermodulation.

Cette méthode connaît deux variantes : F_1 peut être une fréquence assez basse (généralement 60 Hz) et F_2 une fréquence élevée (généralement 7 kHz) ; la distorsion est alors donnée par l'amplitude des signaux à $F_2 - F_1$, $F_2 + F_1$, $F_2 - 2.F_1$, $F_2 + 2.F_1$,... etc (voir fig. n° 4).

Dans l'autre méthode F_1 et F_2 sont deux fréquences élevées (5 kHz et 6 kHz) et la distorsion est mesurée à $F_2 - F_1$, $2.F_2 - F_1$, $2.F_1 - F_2$, $3.F_2 - 2.F_1$, $3.F_1 - 2.F_2$,... etc (voir fig. n° 4).

Contestations des mesures

Les mesures classiques et les bases de la physiologie de l'audition forment un ensemble théorique très cohérent qui avait trouvé, semblait-il, une évidente confirmation ; car, parallèlement aux progrès des instruments de mesure, évoqués plus haut, les appareils électroacoustiques s'amélioraient aussi, en distorsion linéaire et en distor-

sion non-linéaire, pour atteindre il y a quelques années les limites théoriques de la perfection pour certains éléments de la chaîne électroacoustique, particulièrement pour l'électronique.

Trouver aujourd'hui un amplificateur ayant une bande passante largement supérieure à 20 Hz-20 000 Hz et une distorsion inférieure à -80 dB, n'a rien d'extraordinaire. Comme l'oreille a une dynamique globale de 120 dB en mettant en œuvre l'atténuateur de l'oreille moyenne (environ 40 dB), sa dynamique instantanée est de l'ordre de 80 dB. Un amplificateur avec les performances décrites ci-dessus devrait donc être la perfection absolue et certains n'hésitent pas à dire (cf «De l'objectivité des tests subjectifs» dans *L'Audiophile* n° 10) que lorsqu'un amplificateur est correctement étudié, il ne perturbe pas le message sonore de façon audible et nient toute possibilité de progrès pour les amplificateurs (ce serait dommage pour notre étude).

Pourtant, au fur et à mesure des progrès, il s'est trouvé parmi ceux qui étaient confrontés à l'écoute fréquente et comparative des produits électroacoustiques des gens pour s'étonner de certaines impressions qui ne s'accordaient pas avec les résultats des mesures : la perfection attendue n'était pas au rendez-vous, des résultats de mesure identiques sonnaient différemment et une qualité d'écoute supérieure pouvait correspondre à des résultats de mesure plus mauvais.

De telles affirmations furent reçues par les gens sérieux (ou qui se prétendaient tels) comme des témoignages concernant le Yéti, le monstre du Loch Ness ou les soucoupes volantes. Le fossé ne tarda pas à se creuser entre les tenants de l'écoute comparative et les partisans de la mesure : les premiers confrontés à des évi-

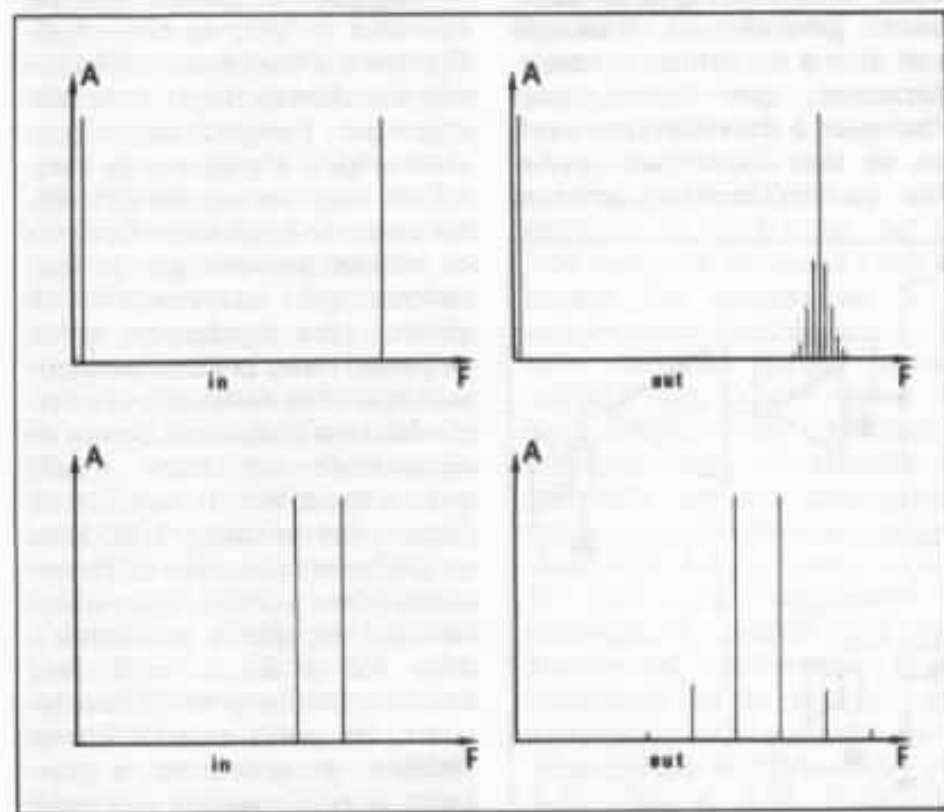


Fig. 4 : Mesure de distorsion d'intermodulation.

dences subjectives ne comprenant pas la «mauvaise foi» des seconds puisque les éléments électroacoustiques sont faits pour l'oreille et non pour les appareils de mesure ; certains n'hésitant pas à affirmer que si des caractéristiques électriques identiques correspondent à des sons différents, c'est parce que toute mesure est incompatible, par nature, avec la perception auditive et qu'il ne faut rien attendre d'aucune mesure.

Les seconds ne pouvant admettre que l'on puisse entendre des choses qui n'existent pas puisqu'on ne peut les mesurer, attribuant les résultats des écoutes comparatives à des phénomènes subjectifs et non à des phénomènes physiques. Une qualité subjectivement supérieure associée à des résultats de mesure inférieurs, étant due à des défauts objectifs propre à flatter notre sens de l'audition comme semble le confirmer l'usage volontaire de la distorsion par certains utilisateurs de guitare électrique. Des partisans de la mesure contre-attaquent sur le terrain de l'écoute comparative en réalisant des expérimentations qui dans certains cas réussissent à les conforter dans leurs posi-

tions (cf. L'Audiophile n° 10) ou qui les embarassent et qu'ils expliquent de façon assez peu convaincante («Tubes versus transistors in electric guitar amplifiers», IEEE International conference on acoustics, speech and signal processing, 1981).

Dans «Audible amplifier distortion is not a mystery» (Wireless World de nov. 1977), P.J. Baxandall, après avoir cité une phrase de Bertrand Russell («Some things are believed because people feel as if they must be true, and in such cases an immense weight of evidence is necessary to dispel the belief») sans bien réaliser qu'elle s'applique aussi bien aux idées qu'il défend qu'à celles qu'il combat, nous explique que malgré une croyance assez répandue, il ne peut pas y avoir de différence audible entre deux amplificateurs bien conçus, testés dans de bonnes conditions ; que toute différence peut s'expliquer de façon rationnelle. Que les différences généralement ressenties sont dues à des erreurs d'expérimentation, que l'oreille peut s'habituer à des défauts et souffrir de leur disparition (révélation particulièrement heureuse

sous la plume de quelqu'un qui œuvre pour l'amélioration de l'électroacoustique), que les tests subjectifs réclament des précautions qui ne sont généralement pas bien prises ; il nous décrit un montage de test des amplificateurs qui a été proposé par Quad (voir la fig. n° 5), qui permet d'entendre la distorsion qu'ils produisent et qui autorise Quad à prétendre que ses amplificateurs sont subjectivement parfaits puisque la distorsion de ceux-ci correspond dans la haut-parleur à un silence total, pour des conditions normales d'écoute. Le dispositif de Quad permet de nombreux essais : augmenter le niveau correspondant à la distorsion jusqu'à rendre celle-ci audible et ainsi connaître la marge de celle-ci par rapport à la sensibilité de l'oreille, voir les effets de la charge réelle de l'amplificateur, augmenter le niveau de la distorsion en présence du signal normal pour voir à quel niveau celle-ci dégrade la qualité sonore, constater qu'avec un bon amplificateur il n'y a pas de différence entre le chemin direct et le passage par l'amplificateur sous réserve qu'il n'y ait pas de saturation, montrer que les différences entre de bons amplificateurs ne peuvent provenir que de saturations qui interviennent en général plus rapidement qu'on ne pense, tester la distorsion harmonique et la distorsion d'intermodulation sans avoir besoin de signaux de test d'une grande pureté spectrale. Il conclut en disant que si deux très bons amplificateurs sonnent différemment, c'est que des saturations sont en jeu, que la perfection a déjà été atteinte, qu'il faut encore travailler pour réduire les coûts, les poids et accroître la fiabilité, le rendement, la puissance de sortie au lieu de perdre son temps à chercher à réduire par 100 la distorsion avec pour seul effet d'augmenter les prix et

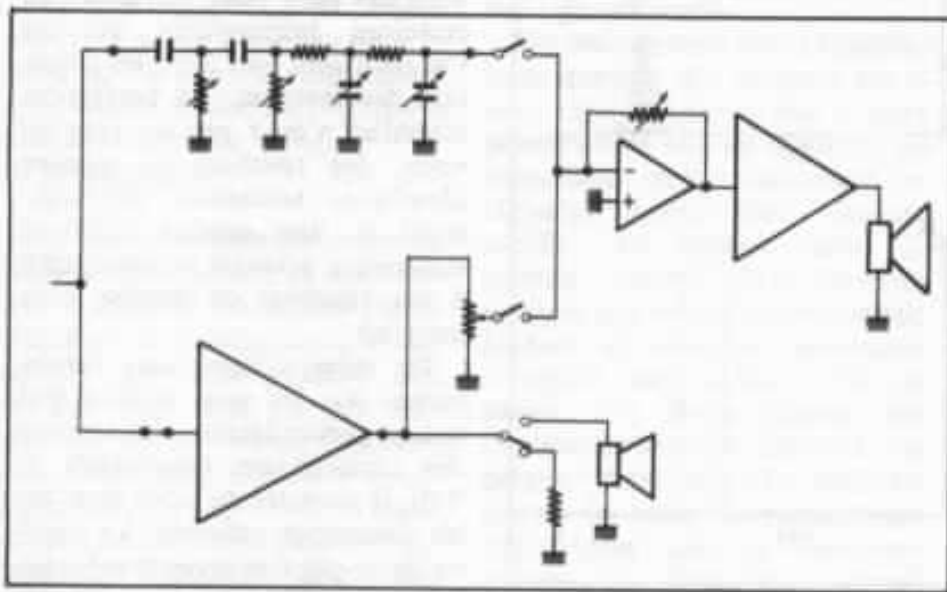


Fig. 5 : Montage de test de Quad.

d'impressionner ceux qui n'y connaissent rien.

Il faut noter quelques tentatives pour concilier mesures classiques et approche subjective comme par exemple «amplificateurs : l'analyse spectrale de la distorsion par harmonique» de J. Hiraga (Revue du Son n° 27 de déc. 1975). La mesure de distorsion harmonique en effet ne se soucie guère du contenu harmonique de la distorsion or nous avons vu que le timbre est classiquement attribué au niveau des différents harmoniques. Deux distorsions correspondant au même chiffre peuvent donc modifier de façon distincte le timbre d'un instrument. Cette explication permet de comprendre la divergence entre mesure et appréciation subjective pour les enregistrements d'instrument solo, mais n'explique rien pour les enregistrements de formation orchestrale ni n'explique le son différent de deux électroniques dont la distorsion est inférieure au seuil de sensibilité théorique de l'oreille.

Il semblerait que les tenants de l'écoute subjective aient de plus en plus de partisans ; cette attitude de marginale qu'elle était, fait actuellement de plus en plus d'adeptes parmi les amateurs et les «spécialistes». Triomphe de l'évidence pour ses partisans, mode passagère liée à un certain regain d'intérêt pour l'irrationnel, qui flatte un public naïf et incompetent en lui faisant croire que ce sont ses oreilles le seul juge, pour ses détracteurs, ce courant de pensée n'est plus nié par les traditionalistes et j'illustrerai cette véritable crise des valeurs qui soulèvent bien des passions dans le monde de la haute fidélité par deux attitudes parmi d'autres :

Les spécialistes en matériels électroacoustiques d'une revue musicale bien connue ont commencé par proclamer que le «son des amplificateurs» était un

mythe et pour garantir à leurs lecteurs le sérieux et l'honnêteté de leur banc d'essai (on aurait pu en douter ?), ils ont utilisé les services du «Laboratoire national d'essais» et la très officielle norme NF C 97.310. Il semblerait que cette garantie solennelle ne les ait pas totalement satisfaits, puisque dans le numéro de mars 84 on compare les différences entre amplificateurs à des différences de bouquet entre deux vins ; on est bien loin des procès verbaux d'essai avec le tampon à l'effigie de Marianne.

Une autre attitude : celle d'une chaîne de magasins de loisir très connue qui s'est signalée par ses prix et ses prises de position en faveur des consommateurs ; dans sa revue mensuelle elle a dénoncé «le piège à gogos» que représente à ses yeux la remise en cause des mesures officielles et se gausse de certaines officines où il faudrait réapprendre la physique puisqu'on y dit que les condensateurs ont des sons divers. Je ne doute pas de la bonne foi de cette prise de position, mais l'enfer est pavé de bonnes intentions (j'avais déjà entrevu les limites du consumérisme quand une revue de consommateur à ses débuts avait entrepris de faire tester par un jury composé de lecteurs pris au hasard, les disques de la 5^e symphonie de Beethoven !!! Une telle attitude ferait sourire aujourd'hui). Cette prise de position ne protège nullement le consommateur, au contraire elle entretient par un dogmatisme étroit une confusion qui laisse le chant libre à d'éventuels escrocs. Et tant qu'à réapprendre la physique, il faudrait déjà commencer par l'apprendre : Il y a longtemps qu'on sait (cf. par exemple «Dispersion and Absorptions in Dielectrics» par K.S. Cole et R.H. Cole dans «Journal of chemical physics» d'avril 1941 et fév. 1942) qu'un condensateur est différent du

modèle théorique auquel on l'assimile.

Pour ma part, je serais par ma formation plutôt du côté des traditionalistes et j'ai longtemps partagé leurs idées ; mais un certain nombre d'expériences et de discussions m'ont incité à les remettre en cause et, en y réfléchissant bien, à avoir une attitude plus scientifique qui intègre à la fois la conviction que toute différence à l'écoute peut s'expliquer et la constatation sereine que les mesures actuelles peuvent être en contradiction avec les résultats d'écoutes comparatives pour des raisons non subjectives. A mon avis, il est urgent de dépassionner ce débat, il faut que certains cessent de prendre pour un crime de lèse-science la remise en cause des mesures classiques pour que d'autres cessent de dire des sottises ; je refuse de croire que des appareils possédant les mêmes caractéristiques électriques, disons même physico-électriques, puissent donner un son différent. Il faut cesser de faire croire que la science ne peut expliquer les constatations des écoutes comparatives. Il n'est pas choquant de dire que des résultats de mesure identiques peuvent conduire à des son différents, cela revient à dire, tout simplement, que les mesures utilisées sont insuffisantes et que la théorie sur laquelle celles-ci reposent est imparfaite.

Il y a très souvent confusion entre la réalité physique et la théorie physique qui l'explique et les gens ont généralement du mal à admettre que le modèle mathématique de la théorie qui semble avoir été tant et tant de fois validé, soit remis en cause. Toute l'histoire de la science est là pour nous montrer que les théories physiques cernent de mieux en mieux la réalité sans jamais être sûr de la circonscrire totalement. Une théorie remise en cause n'est pas forcément fautive, elle peut

seulement avoir un champ d'application limité que les progrès de la science mettent en évidence et un jour elle est remplacée par une nouvelle théorie au champ d'application plus vaste : par exemple, nous avons vécu deux siècles avec la physique de Newton, puis la théorie de la relativité est venue la compléter car elle n'expliquait pas tout, et, aux dernières nouvelles, on attendrait une nouvelle théorie capable de regrouper les quatre types de forces connues.

De même, les bases de la physiologie de l'audition et les mesures qui en découlent ont leur champ d'application et leurs limites, et peuvent être un outil efficace dans bien des cas, sans être pour autant des vérités absolues et la recherche d'une qualité extrême en électroacoustique passe sûrement plus par une remise en cause des mesures classiques que par leur sophistication excessive et absurde : il peut être intéressant d'avoir un distorsiomètre qui ait une sensibilité de - 120 dB ou - 140 dB, mais un tel appareil ne saurait garantir à lui tout seul une qualité absolue en électroacoustique. Je suis tout à fait d'accord avec P.J. Baxandall quand il dit qu'il est inutile de vouloir encore réduire le très faible chiffre de distorsion qui transparait dans les mesures traditionnelles des «meilleurs» amplificateurs, mais je coirs qu'il y a encore des progrès à faire, que ces progrès ne se traduiront pas forcément par des chiffres de distorsion traditionnelle plus faible, mais devront être validés par l'oreille sous peine d'être aussi vains que les faux progrès décrétés par les mesures classiques ces derniers temps. Quand on relit avec un esprit critique ce qui a été écrit sur la distorsion, et plus particulièrement les écrits récents des traditionalistes, on est frappé par la confusion qui y règne entre la distorsion (déformation

dans le sens général des signaux) avec le résultat des mesures classiques de distorsion ; cette confusion qu'il faut dénoncer et refuser, est due au fait que pour ces auteurs il s'agit de la même chose. Si on fait bien la distinction, certains de leurs arguments qui pouvaient donner l'impression d'être le bon sens même, perdent beaucoup de leur force de persuasion. Les mesures classiques mettent en évidence certaines distorsions mais est-on bien sûr d'avoir avec ces mesures mis en évidence et correctement mesuré tous les phénomènes qui peuvent induire des distorsions pour les signaux audio ???

Nouvelles bases possibles pour d'autres mesures

Nous avons vu que le point de départ de beaucoup de choses en acoustique et électroacoustique était la décomposition de Fourier des fonctions périodiques. Est-on toujours bien en droit d'appliquer celle-ci ? Pour répondre à cette question, il est intéressant d'observer les signaux que notre amplificateur aura à traiter. La figure n° 6 nous montre les oscillogrammes d'un échantillonnage de signaux audio. Force nous est de constater que l'expression «fonction périodique» est une approximation plus ou moins exacte selon les cas.

Mais la théorie des intégrales de Fourier permet de remédier à cette difficulté, en effet on peut définir le spectre d'une fonction non périodique du temps. Le spectre de la 5^e symphonie de Beethoven peut être une réalité mathématique rigoureuse qui contient assez d'informations pour correspondre de façon biunivoque avec un enregistrement de cette symphonie.

Pourquoi utilise-t-on les outils mathématiques dus à Fourier ? C'est qu'ils permettent de prévoir le comportement d'un

système linéaire dont on connaît les réactions à tous les signaux sinusoïdaux, en face de n'importe quel signal. La connaissance du spectre du signal incident est suffisante pour calculer le signal de sortie résultant.

En effet, Fourier nous permet de décomposer tout signal en une somme de signaux sinusoïdaux pour lesquels la réponse du système est connue. Si le système est linéaire, c'est-à-dire que sa réaction à un stimulus A + B est la somme de ses réactions à chacun des stimuli pris séparément :

$$S(A+B) = S(A) + S(B)$$

Le signal de sortie a donc un spectre qui est la somme des réactions du système à chacune des composantes spectrales du signal d'entrée, il est donc parfaitement déterminé et calculable si on connaît :

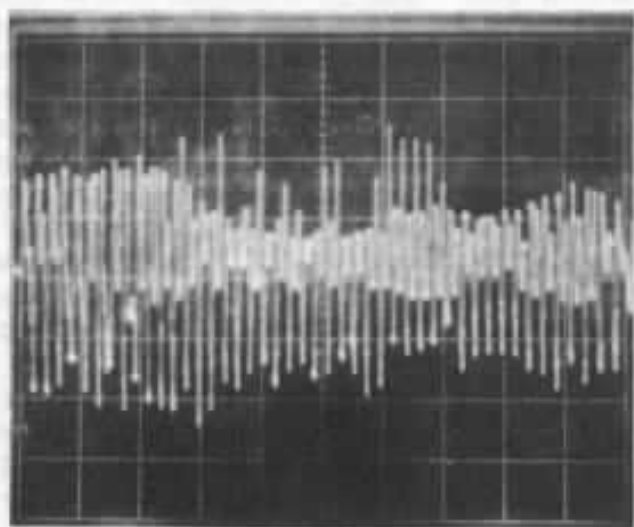
- la réponse en amplitude du système : $A(\omega)$
- la réponse en phase du système : $\varphi(\omega)$
- et le spectre du signal d'entrée

Ces explications montrent l'intérêt des travaux de Fourier qui sont très utilisés et connus, et si j'ai pris soin de réexposer très brièvement ces notions bien connues de beaucoup d'audiophiles, c'est qu'à force d'utiliser les notions d'harmonique, de spectre, de réponse spectrale on finit par en oublier la condition nécessaire à leur emploi rigoureux : la condition de linéarité. Cette condition essentielle est-elle toujours remplie dans notre cas ? Si elle n'est pas remplie, que se passe-t-il ? C'est ce que nous allons tenter de voir maintenant.

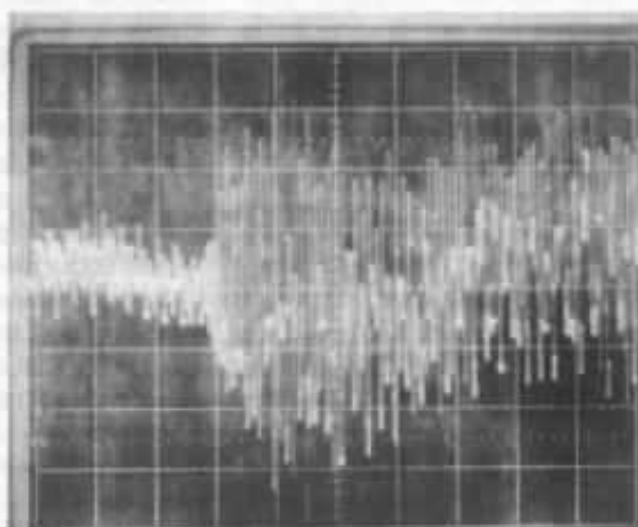
Nouvelles données de la physiologie de l'audition

Dans la vision traditionnelle de la physiologie de l'oreille sommairement rappelée au début de cet exposé, la notion de linéarité est implicite : le modèle de l'oreille, supposée linéaire, est, bien entendu, linéaire. Les recherches sur la physiologie de

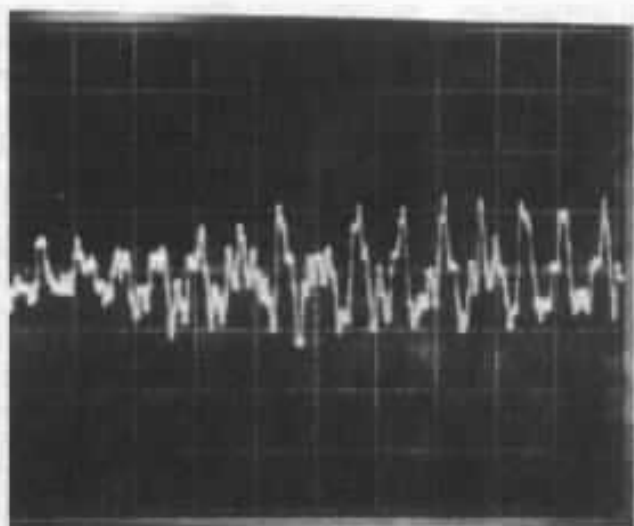
Fig. 6 : Quelques sons.



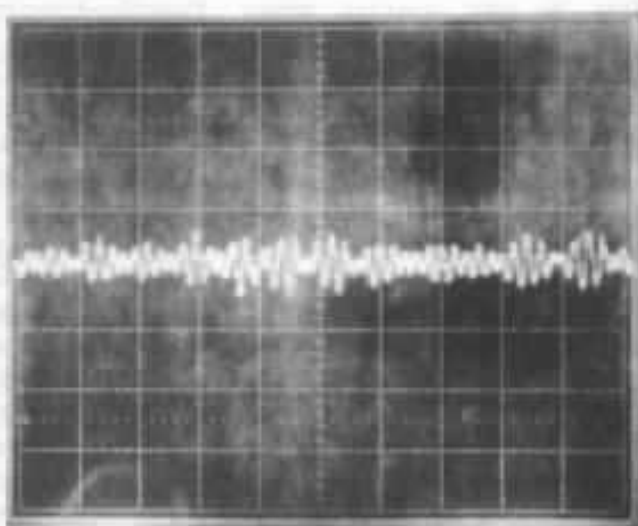
— Voix de femme



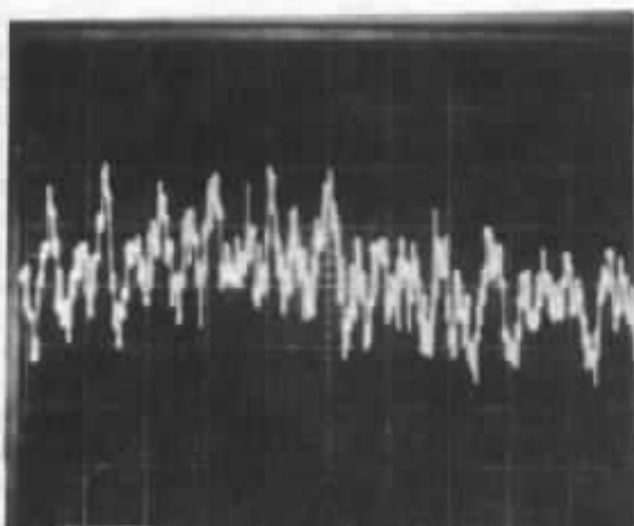
— Piano : Schumann, *Gesänge der Frühe*, 2^e pièce.



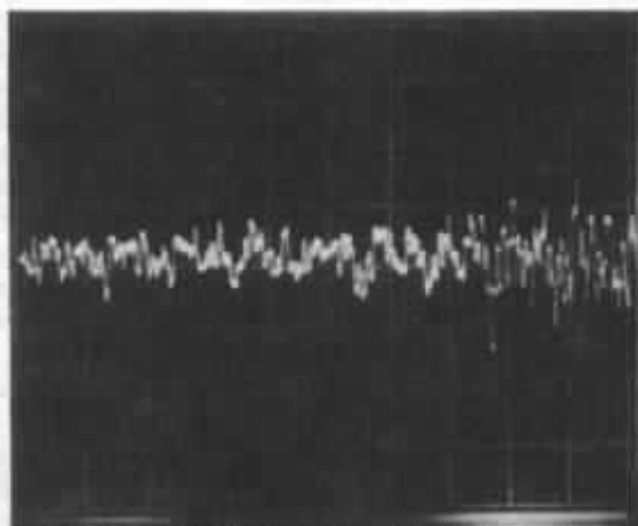
— Violon : Mozart, *Sonate K378*, 1^{er} mouvement.



— Flûte : *Musique Folklorique des andes*.



— Orgue : Bach, *Choral BWV 715*.



— Orchestre : Schubert, *Symphonie inachevée*, 3^e mouvement.

l'oreille, postérieures à l'élaboration du modèle classique ont-elles confirmé cette linéarité des phénomènes auditifs ?

La linéarité de la sensation auditive semble être une évidence ; si, par exemple, je me promène avec un ami à la campagne et que nous entendons un oiseau chanter, s'il me commente le chant de l'oiseau, mon univers sonore se composera alors de deux choses : le chant de l'oiseau et les commentaires de cet ami ; ma perception est bien linéaire puisqu'elle est la somme de deux perceptions correspondant à chacun des deux phénomènes.

Mais si une voiture nous dépasse, son bruit me gênera et peut m'empêcher de comprendre sa phrase. Je continuerai alors à avoir l'impression d'une perception linéaire de trois événements différents. Pourtant il y a eu rupture de la linéarité puisque je n'ai pas compris ce qui m'était dit. Cette rupture n'est pas perçue comme un mélange entre les sensations mais comme une gêne.

On pense généralement que la linéarité est une tendance naturelle des phénomènes physiques, surtout si l'amplitude de ceux-ci est faible. Cette fausse évidence résulte de la façon dont ont été étudiées les sciences physiques, c'est-à-dire en commençant par les phénomènes les plus simples dont les lois sont continues ; mais cette continuité n'est pas la règle générale, c'est pourquoi on a établi une « théorie des catastrophes » pour traiter les phénomènes physiques où il y a rupture brutale d'équilibre. Si on lache un vase de porcelaine à un mètre du sol, ce qui va lui arriver dans un premier temps correspond à un phénomène continu, réversible et linéaire pour de faibles amplitudes, puis il y aura rupture (c'est le cas de le dire) et les événements échapperont un court instant à toute hypothèse

simplificatrice. Tous les phénomènes à seuil, sont ainsi non-linéaires et l'oreille qui a un seuil ne saurait être totalement linéaire.

Quand on parle de l'audition, on se limite généralement au fonctionnement de l'oreille ; de même quand on parle de la vision, on pense au fonctionnement de l'œil qu'on assimile à un appareil photo ou à une caméra de télévision, sans rien expliquer ou presque des phénomènes visuels. Pour l'oreille, certains chercheurs qui avaient recueillis au cours de leurs expériences des tensions correspondant aux sons, crurent avoir montré que l'oreille fonctionnait comme un microphone et ainsi tout expliqué. Mais ce « potentiel microphonique » qui persiste quand l'action nerveuse est inhibée par des drogues, est un phénomène parasite qui ne semble pas entrer en jeu dans la perception acoustique. Cette fausse découverte illustre bien les limites d'une analyse réduite au fonctionnement de l'oreille. La figure placée au début de cet article montre l'ensemble de la chaîne auditive ; la partie correspondant au traitement nerveux est aussi importante, sinon plus, dans l'élaboration de la sensation.

Nos perceptions auditives sont le résultat de traitements très élaborés dont nous n'avons pas conscience. Les sensations correspondantes sont les conséquences de processus dont une part est innée (due à l'hérédité, elle concerne surtout le « hard » : caractéristiques de l'oreille, câblage des neurones de l'audition) et dont l'autre part est acquise (fruit de l'éducation de notre sens de l'audition durant les premières années de notre vie, ce serait une partie du « soft »). Non seulement personne n'entend les sons de la même façon, mais il peut y avoir une

barrière entre nous et les musiques et les langues pour lesquelles notre « oreille » n'est pas éduquée. C'est une notion récente, et de nouveaux cours de langues étrangères qui commencent par une rééducation de l'oreille donneraient des résultats étonnants : chaque langue a un spectre différent et les accents étrangers seraient dus à une attention excessive dans des zones de fréquences peu importantes dans la langue nouvelle, mais essentielle dans la langue maternelle et, inversement, à une inattention à des sons très importants dans la nouvelle langue.

Une langue maternelle au spectre très étendu (comme le russe par exemple) ou une bonne oreille expliquerait le « don pour les langues ».

« Entendons-nous comme les asiatiques ? » se demande J. Hiraga dans *L'Audiophile* n° 12, en nous présentant les travaux d'un neuropsychologue japonais. Même si le câblage de nos cerveaux est différent de celui des asiatiques selon ces travaux, le seul fait d'être élevé dans des univers sonores différentes (langues aux sons différentes, musiques fondées sur d'autres principes, murs en dur ou en papier, etc...) conduit à une appréhension auditive du monde environnant différente. Tout cela implique une prudence extrême pour les expérimentations mettant en œuvre une part de subjectif, un même « objet sonore » (un enregistrement précis avec un matériel donné dans des conditions matérielles données) pourra donner des sensations différentes selon la forme physique et les conditions psychologiques de l'auditeur ; on ne l'entendra pas de la même façon s'il vous a été présenté par quelqu'un digne de confiance ou non, comme une « merveille » ou comme une « cochonnerie », ou si les chiffres donnés par les mesu-

res sont bons ou moyens (selon qu'on pense que de bonnes mesures sont un indice favorable ou défavorable). Une première écoute peut être biaisée par l'acharnement de votre percepteur et cette faiblesse de l'analyse subjective a vite été dénoncée par les inconditionnels de la mesure, car elle permet à court terme bien des escroqueries intellectuelles ou basement commerciales. Heureusement à plus long terme, ce genre de conditionnement finit par perdre de son influence et la «vérité subjective» finit par se dégager.

Après ces quelques réflexions générales qui nous montrent que les problèmes de l'audition sont moins simples qu'on ne le pense en général, examinons les points particuliers de la physiologie de l'audition pour voir les divergences entre la réalité et les bases des mesures traditionnelles.

Le niveau

La notion de niveau est moins simple à saisir qu'il n'y paraît ; le niveau subjectif n'a rien d'absolu : la fatigue rend les sons plus forts, plus agressifs ; inversement on a pu définir une fatigue physiologique : si

l'oreille est exposée un certain temps à une fréquence, on constate une perte de sensibilité pour cette fréquence. La connaissance des sources de sons modifie aussi le niveau subjectif (celui qui donne des coups de marteau ne perçoit pas le même niveau subjectif que ceux qui sont à ses côtés, surtout si ceux-ci ne peuvent pas voir ses gestes).

Le vibrato (variation faible et rapide de la hauteur d'une note) est un moyen bien connu des musiciens pour donner une impression de niveau plus élevé, nous verrons un peu plus loin l'explication de ce phénomène.

Un autre phénomène qui mêle hauteur et niveau : l'effet de masque. De nombreux audiophiles connaissent les courbes de la figure n° 7 ; elles donnent l'élévation du seuil de sensibilité pour différentes fréquences en présence d'un signal à fréquence fixe à différents niveaux. Ces courbes sont un excellent exemple de l'analyse linéaire d'un phénomène qui ne l'est absolument pas. Ce genre de courbes tracées pour plusieurs fréquences ne nous permettrait de prévoir ni l'effet de masque dû à plusieurs sons purs, ni l'effet de masque

pour des sons complexes non stables. Tout au plus elles montrent que les mesures de distorsion harmonique traditionnelles (mesure du niveau d'harmoniques produits pour un son pur permanent) mesurent des signaux parasites pour lesquels nos oreilles sont peu sensibles.

Signalons enfin la persistance acoustique qui donne l'impression que les sons s'éteignent progressivement même lorsqu'ils cessent brusquement. Ce phénomène est mis en évidence en comparant un son qui disparaît brusquement au même son avec une décroissance variable : à partir d'une certaine vitesse de décroissance on ne perçoit plus de différence.

La hauteur

La hauteur d'un son semble être l'appréciation subjective de la fréquence du fondamental d'un son. En général, l'oreille a beaucoup de mal à évaluer cette hauteur dans l'absolu, mais est très précise dans l'appréciation des intervalles entre des sons successifs. Toutefois, cette évaluation nécessite un certain temps : en dessous de 0,01 s on n'a même pas d'impression de hauteur, et il faut qu'une note dure plus de 0,1 s pour commencer à avoir une idée précise de la hauteur (cela aide bien la virtuosité sur les instruments dont la hauteur dépend de l'instrumentiste).

Mais pour un son sinusoïdal pur, cette sensation de hauteur varie avec l'intensité du son : les aigus montent avec le niveau et les graves baissent avec celui-ci ; ces variations étant variables avec les sujets. Tout aussi troublant est la variation des intervalles avec la hauteur des sons : cela se retrouve dans l'accord des pianos, un bon accordeur aura une légère tendance à baisser les graves et à remonter les aigus, par rapport à la théorie comme si aux extrémités de la bande auditive les intervalles semblaient plus faibles ; un piano accordé

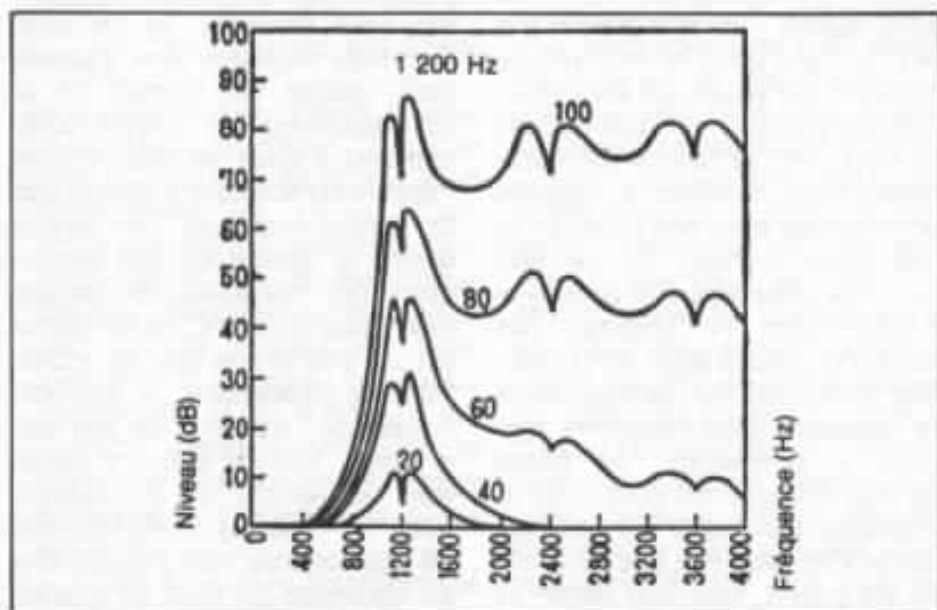


Fig. 7 : Effet de masque.

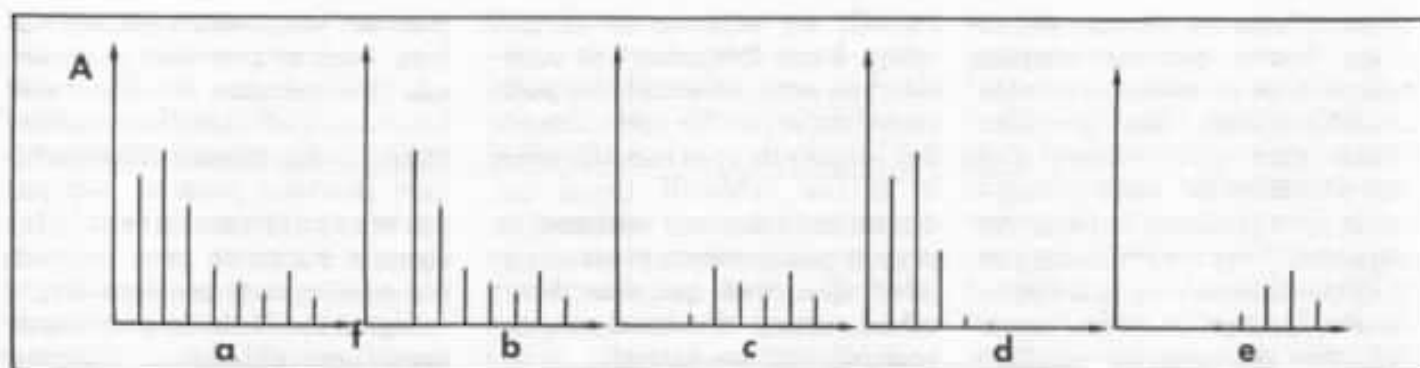


Fig. 8 : Perception de la hauteur en fonction du spectre.

selon une métrologie rigoureuse sonne faux (!!!).

La hauteur est généralement due à la fréquence du fondamental (cf. fig. n° 8a). Pourtant, cette sensation de hauteur reste la même, si le fondamental disparaît (cf. fig. n° 8b), même si tout le bas (cf. fig. n° 8c) du spectre ou une autre partie du spectre (cf. fig. n° 8d et 8e) est filtrée. Toutefois, il y a une légère différence de hauteur entre les trois derniers spectres, comme si la hauteur était déterminée par l'intervalle entre les principales composantes du son, avec les erreurs d'appréciation liées à la présence de ces composants dans le grave, le médium ou l'aigu.

Le timbre

On a longtemps cru que le timbre était dû au contenu harmonique des sons. Cette croyance était la conséquence d'expériences faites avec des sons permanents. Avec l'invention du magnétophone, on a pu étudier le rôle des transitoires et constater que si on gommait l'attaque des notes on confondait les sons produits par des instruments aussi différents que basson et violoncelle, ou que cor et flute. Le transitoire est fondamental pour le timbre. Si on fait l'analyse spectrale sur un intervalle de temps très court pendant le transitoire des notes de différents instruments, on voit beaucoup varier durant les transitoires les niveaux relatifs des diffé-

rents harmoniques ; ces variations sont très différentes même pour un même instrument, ce qui n'empêche pas l'oreille de bien reconnaître les instruments (qu'elle connaît !).

Les transitoires sont très importants pour l'audition. Il ne faut pas oublier que l'oreille n'a jamais été faite pour écouter des sons sinusoïdaux ou de la musique ; c'est un sens qui nous vient du fond des temps et qui a été optimisé par l'évolution pour favoriser la survie dans la nature ; pour signaler les proies ou les dangers, pour aider les communications à l'intérieur de la horde dont nous descendons tous.

Les transitoires sont plus riches d'informations que les sons établis ; et si l'oreille n'a pas été faite pour la musique, la musique par contre est faite pour l'oreille auquel elle doit fournir ni trop peu, ni trop d'informations. Une musique à laquelle notre oreille n'est pas habituée et que nous tentons de décoder avec une mauvaise clef (musique d'une autre civilisation, par exemple) pourra ainsi nous sembler ennuyeuse ou confuse, selon la quantité d'informations que nous y entendons. Je pense qu'une des grandes erreurs de la musique moderne, est d'avoir voulu aller plus vite que les oreilles du public, sans leur laisser le temps de digérer les nouveautés. La musique moderne est ainsi souvent trop riche en informa-

tions, sauf pour une minorité, et il n'est pas possible alors d'y prendre plaisir car celui-ci demande une dose précise d'informations.

Les transitoires sont aussi à l'origine de la faillite d'une certaine conception de la musique électronique, qui avait cru possible à ses débuts d'obtenir tous les instruments sur le clavier d'un orgue électronique. On n'est pas près d'obtenir ainsi le son d'un violon, tellement celui-ci dépend de paramètres qui sont fixés par le violoniste sans qu'il en soit toujours bien conscient.

Les distorsions de l'oreille

D'après les théories quasi-linéaires évoquées plus haut, les phénomènes de faible amplitudes sont linéaires, et les non-linéarités croissent avec l'amplitude quand les termes de la décomposition de Taylor commencent à jouer un rôle. Quand l'oreille est soumise à un son pur de niveau croissant, on perçoit quand le niveau devient important, des harmoniques subjectifs. Ceux-ci sont d'autant mieux perçus que le son pur est grave. Pour ce phénomène, le comportement de l'oreille n'est pas surprenant. Mais il existe d'autres sons subjectifs, et le malheur pour les théories quasi-linéaires est que ces sons sont perceptibles au voisinage du seuil de sensibilité de l'oreille. En particulier le «terzi suoni» déjà signalé par Tartini produit par le mélange de

deux sons F_1 et F_2 ($F_1 < F_2$) et qui est perçu à $2.F_1 - F_2$; ainsi le mélange de 4 kHz et de 5 kHz semble produire du 3 kHz. Un tel phénomène ne s'explique pas par les notions classiques de distorsion mais plutôt par des erreurs d'interprétations du système nerveux (nous y reviendrons plus loin).

On obtient aussi la génération d'un son fantôme en faisant entendre à une même oreille deux signaux de bruit décalés en fréquence d'une quantité fixe (ces deux signaux étant évidemment fournis par deux systèmes séparés). Ce phénomène semble lié à la reconstitution du fondamental d'un signal par « mesure » de la différence de fréquence entre les principaux harmoniques.

La phase

La loi d'Ohm nous dit que l'oreille est insensible à la phase des signaux. Il faut limiter cette affirmation à des temps d'analyse courts; en effet, si nous prenons le spectre de la 5^e symphonie de Beethoven dont nous avons déjà parlé, cette symphonie étant analysée à l'intérieur d'un intervalle de temps d'une heure, ce spectre est composé de raies situées tous les

$\frac{1}{3\ 600}$ Hz avec une amplitude

et une phase bien définie. Si nous perturbons de façon aléatoire cette distribution de phase, nous obtiendrons un signal d'une heure qui aura le même spectre d'amplitude que la symphonie mais qui risque bien d'être perçu par l'oreille comme du bruit aléatoire. Il est donc nécessaire d'appliquer la loi d'Ohm à des signaux continus ou dont la durée ne dépasse pas le temps d'analyse de l'oreille: de 50 ms à 100 ms.

Même avec cette correction, la loi d'Ohm semblerait selon certaines expériences ne pas être totalement vraie, surtout dans

les transitoires. On a tenté d'expliquer ces phénomènes par des non-linéarités de l'oreille qui précèderaient une analyse interne totalement insensible à la phase, on a aussi prétendu que l'oreille ne serait sensible qu'aux déphasages qui déformeraient l'enveloppe du signal audio. Toutes ces théories sont intéressantes mais elles expliquent plus ou moins bien certaines expériences: la phase d'un harmonique modifie légèrement la valeur de l'effet de masque. Si dans un signal obtenu par des impulsions à 100 Hz on retourne brutalement une des composantes de ce signal, on entend superposer au bourdonnement qui correspond à ce signal, un son bref qui a la fréquence de la composante spectrale dont la phase a varié de 180°.

Localisation

Elle est perçue comme la projection dans l'univers qui nous entoure des sensations auditives. Comme pour la vue qui est aussi un sens qui permet de connaître des éléments lointains de notre environnement, notre sensation est ressentie comme la prise de conscience d'une réalité extérieure et la sensation auditive s'intègre dans la connaissance que nous avons de cette réalité. Des essais de localisation, en aveugle, dans une salle peuvent donner des résultats surprenants.

Cette localisation utilise plusieurs analyses et donne de meilleurs résultats sur des sons complexes connus: en plus des retards entre les signaux parvenant aux deux oreilles, nous utilisons les déformations spectrales que font subir aux sons les formes tourmentées de nos pavillons; comme ces déformations sont fonction de la direction horizontale et verticale nous pouvons obtenir des informations sur la hauteur de la source sonore. Cette connaissance de nos oreilles est le fruit d'une édu-

cation qui s'est faite dans notre enfance et dont nous n'avons plus conscience. Dans notre conscience nous percevons une image synthétique du son qui fait abstraction de ces variations. Quand le système de localisation échoue à localiser un son connu (c'est le cas parfois avec des casques qui provoquent des ondes stationnaires dans le conduit auditif, qui modifient le spectre de transmission aux oreilles de façon complètement invraisemblable) il transmet à notre conscience la seule localisation qui lui reste: à l'intérieur de notre crâne.

La localisation est corrélée avec nos autres sens de façon à fournir à notre conscience une représentation de notre environnement extérieur cohérente: vision, position de notre tête donnée par l'oreille interne et les muscles du cou. Quand par exemple, nous inclinons la tête nous ne voyons pas basculer l'univers qui nous entoure bien que les sensations visuelles et sonores basculent avec notre tête en sens contraire. C'est la raison pour laquelle je ne peux pas supporter longtemps un casque quelle que soit sa qualité: j'entends le philharmonique de Berlin qui tourne avec ma tête et assez rapidement cette perturbation de corrections inconscientes, finit par me donner une impression légère mais assez pénible pour gâcher mon plaisir, de claustrophobie.

Après avoir réexaminé la physiologie de l'oreille de façon globale, continuons nos investigations critiques par l'examen du fonctionnement des différentes parties de notre oreille.

L'oreille externe

Il n'y a pas grand chose à ajouter à ce qui a déjà été dit: l'oreille externe est nécessaire à la localisation, mais cette localisation implique une connaissance préalable des sons (pour

avoir une référence) et un apprentissage du cerveau. Une analyse partielle ne permet pas de comprendre la localisation dans le plan vertical, et une expérimentation avec des sons purs est sans rapport avec la réalité. C'est en raisonnant de façon partielle qu'on a pu soutenir que la localisation aux ultrasons que fait la chauve-souris n'était pas compatible avec la dimension de ses oreilles et les longueurs d'onde utilisées. La grande force des faits sur la théorie, c'est que les faits sont têtus.

L'oreille moyenne

Nous avons vu au début de cet exposé, le rôle d'adaptation d'impédance acoustique et d'atténuateur de l'oreille moyenne. Elle a un rôle mécanique et doit sans doute participer à la création des harmoniques subjectifs qui apparaissent à fort niveau. Mais je voudrais revenir sur le fonctionnement des muscles de l'oreille interne ; la tension de ceux-ci, joue de deux façons sur la transmission des sons : d'une part sur le niveau de ceux-ci (comme nous l'avons déjà vu), mais aussi d'autre part sur la courbe de transfert en fonction de la fréquence ; le tympan est en effet, une membrane de forme assez complexe plus ou moins tendue, elle a donc une courbe de transmission avec des résonances plus ou moins amorties qui sont fonction de la tension, comme dans un instrument de musique. Ces diverses fonctions de transfert sont, comme les courbes de réponse du pavillon, connues par le cerveau mais totalement inconscientes mais leurs variations permettent une analyse des sons par un balayage en fréquence plus fin qu'une perception instantanée. E. Leipp voit même dans l'expression «tendre l'oreille», plus qu'une métaphore (voir la bibliographie).

Cette faculté de notre audition d'apporter des corrections inconscientes peut paraître surprenante au premier abord, pourtant si on y prête attention on peut s'en rendre compte dans la vie quotidienne. Ainsi par exemple si un proche dont je connais très bien la voix, me téléphone et que pour une raison ou une autre je ne le reconnais pas tout de suite (attente d'un coup de téléphone de quelqu'un d'autre, distraction, etc...), j'entends sa voix comme le téléphone la déforme, puis dès que j'ai identifié mon interlocuteur je reconnais sa voix et je l'entends «mieux» (comme une photo floue devient plus nette quand on y reconnaît un visage familier) et si j'avais pas compris ce phénomène, je me demanderais : Comment ai-je bien pu méconnaître cette voix si connue ?

L'oreille interne

C'est au niveau de l'oreille interne que la réalité des phénomènes auditifs commence à échapper de façon flagrante aux modèles linéaires. Les influx nerveux qu'on trouve sur le nerf auditif ne sont pas une traduction linéaire des signaux sonores ; malgré le potentiel microphonique (apparemment phénomène parasite, sans effet sur le

fonctionnement de l'oreille) l'oreille interne n'a rien d'un microphone.

Tout d'abord les axones du nerf auditif ne peuvent rester totalement inactifs même en l'absence de stimulus ; ils sont alors parcourus par des impulsions spontanées. Le système nerveux ne saurait être inactif, et ceux qui ont fait l'expérience de pénétrer dans une chambre sourde le savent bien : au début on a une impression de vide surprenant, puis on commence à entendre les bruits de son corps et un sifflement dont le niveau croît. Il paraîtrait même qu'un séjour prolongé dans une chambre sourde peut avoir des conséquences sur l'équilibre mental (?)

Ensuite face à une excitation qui dure, la fréquence des décharges nerveuses suit une loi dont l'aspect est donné sur la figure n° 9. Cette courbe est la conséquence des phénomènes biochimiques mis en jeu dans les cellules nerveuses qui mettent un certain temps à reconstituer les molécules utilisées pour le traitement des informations. La reconstitution des stocks de ces molécules est à l'origine de la fatigue physiologique dont nous avons parlé plus haut. Ce phénomène biochimique explique aussi pourquoi le vibrato donne une impression subjective de niveau

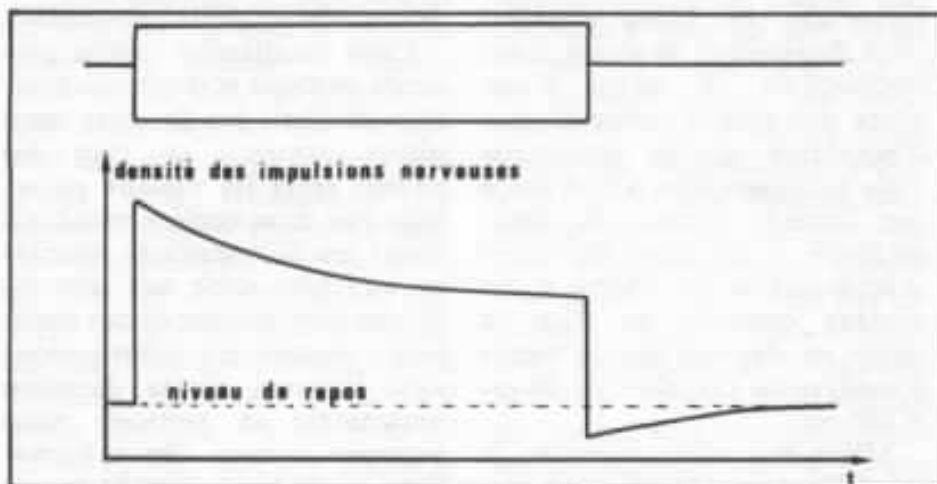


Fig. 9 : Réponse du nerf auditif à un tone-burst.

plus élevé : le signal acoustique utilise plusieurs voies nerveuses et donc un stock de ces molécules plus important.

Un autre phénomène non-linéaire intervient dans la sélectivité en fréquence de l'oreille ; en effet, les observations de von Békésy n'expliquent pas cette sélectivité, les maximum d'amplitude correspondant à chaque fréquence sont assez peu marqués. Certains ont dit que ces expériences avaient été faites sur des animaux morts depuis peu mais que les propriétés de la membrane basilaire avait déjà été un peu modifiées, c'est possible mais on ne peut pas aller bien loin sur cette voie : une surtension excessive des différents points de la membrane basilaire ne serait pas compatible avec les constantes de temps de l'oreille interne.

Ce doit plutôt être un phénomène nerveux qui est à l'origine de cette sélectivité : on sait, par exemple, que sur la rétine les cellules de la vision ont un rôle inhibiteur sur leurs voisines. Il doit en être de même ici soit au niveau des cellules ciliées, soit dans l'organe de Corti ; la voie nerveuse la plus sollicitée par le signal sonore doit inhiber les voies nerveuses voisines.

Quant au codage des informations auditives, j'ai retenu deux théories : la théorie de la volée (voir fig. n° 10) qui veut que les décharges des fibres nerveuses correspondant à une même fréquence se répartissent en fonction du niveau entre les fibres. C'est une théorie qui me plaît assez car elle concorde bien avec ce qui a été dit haut sur les inhibitions entre cellules voisines : ce serait cette inhibition réciproque qui empêcherait à faible niveau toutes les cellules de décharger en même temps ; à plus fort niveau, l'inhibition est moins efficace parce que la sollicitation du stimulus est plus forte et que

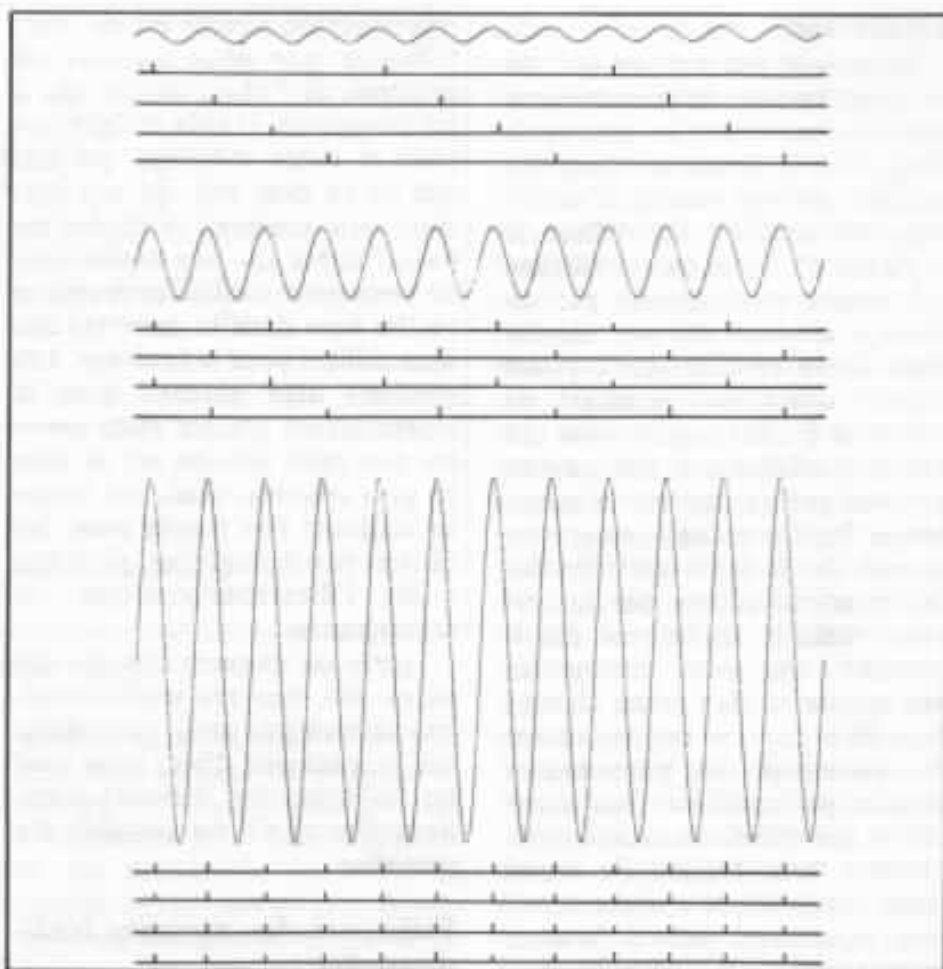


Fig. 10 : Théorie de la volée.

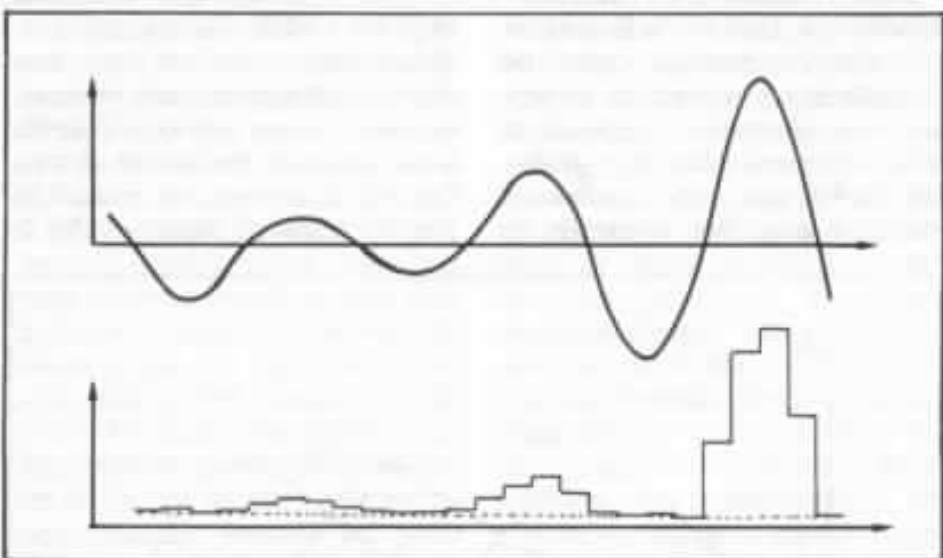


Fig. 11 : Signal nerveux en fonction du signal auditif.

peut-être l'inhibition se fatigue.

Une autre théorie qui résulte d'expériences faites sur des petits singes suggère que la densité des décharges est une fonction linéaire de l'amplitude des alternances dans un sens du signal

(voir fig. n° 11). Je manque de détails sur ces expériences mais si elles correspondent à des fréquences plus basses que celles de la théorie précédente, il n'y a pas contradiction entre ces deux théories.

Le cerveau

Il ne faut pas oublier que les différents points de la membrane basilaire ne voient ni une seule fréquence ni toutes les fréquences, ils voient le résultat d'un filtrage mécanique ayant l'allure de la figure n° 12, et que ce filtrage mécanique est complété par un filtrage nerveux dû aux inhibitions entre cellules. Le cerveau reçoit donc le résultat de l'analyse d'une image sonore qui est la conséquence des vagues sonores qui parcourent la membrane basilaire. Le sonographe permet de se faire une idée des informations reçues par le cerveau mais le traitement est si complexe que nous ne pouvons pas encore en dire grand chose ; peut-être que les connaissances du traitement des phénomènes visuels qui semblent plus avancés, et qui cherchent aussi à comprendre le traitement de sensations issues d'une surface sensitive, pourraient aider à la compréhension des phénomènes auditifs.

Pour l'instant, ils semblent mystérieux, tant il y a loin entre les influx nerveux qui sortent de l'oreille et les sensations auditives qui donnent l'impression d'être perçues dans leur globalité. Le but que nous cherchons à atteindre avec nos appareils de

reproduction sonore est de créer l'illusion que nous sommes en présence de l'objet sonore qui a été enregistré, et cela malgré nos yeux et notre mémoire qui sait que ce ne peut être qu'une illusion. Au cinéma, la tâche est moins ardue car nos oreilles ont les yeux pour complices et cela se vérifie bien dans la pauvreté des sons utilisés pour le bruitage. Les résultats déjà obtenus dans la reproduction sonore nous montre que cette illusion est de plus en plus crédible, mais elle risque de toujours être fragile pour des raisons psychologiques, pour lesquels l'électroacoustique est innopérante.

Après cet examen critique des bases des mesures traditionnelles, intéressons-nous aux mesures proprement dites, pour voir les faiblesses des mesures traditionnelles et s'il est possible d'y remédier.

Faiblesses des mesures traditionnelles

Après cette partie de notre exposé, quelqu'un pourrait objecter : «OK, les mesures traditionnelles reposent sur une analyse linéaire des phénomènes, et nous avons vu que l'oreille n'est pas très linéaire et il s'en faut de beaucoup, et alors ? Si j'ai un appareil linéaire, j'ai le

droit en toute rigueur de l'analyser de façon linéaire ; donc si j'ai un appareil qui a une distorsion harmonique nulle et une bande passante suffisante, que peut-on lui reprocher ?».

C'est vrai les non-linéarités de l'oreille permettent seulement de dire que des critères de non-linéarité n'autorisent pas la prédiction des effets subjectifs des non-linéarités des appareils électroacoustiques. Mais la linéarité ne suffit pas pour un appareil électroacoustique. Nous ne nous étendrons pas sur le manque de rigueur du pseudo-syllogisme : «Un appareil linéaire ne produit pas de distorsion harmonique, cet appareil produit peu de distorsion harmonique, donc il est presque linéaire !», pour mieux voir les limites intrinsèques de l'analyse linéaire dans le domaine audio.

Mesures linéaires

Le grand défaut de l'analyse linéaire réduite aux mesures d'amplitude est de ne pas tenir compte de la nature des messages sonores et de leur richesse en transitoires. Je pense que quelques exemples éclairciront mieux mes propos qu'un exposé théorique trop abstrait :

Premier exemple : Je suis un constructeur d'enceintes acoustiques et après avoir fixé le haut-parleur de grave sur mon prototype, je relève la courbe de réponse en amplitude (cf. fig. n° 13a) et je constate que la coupure basse naturelle de mon enceinte ne me donne pas des chiffres qui me permettraient par la suite de vendre cette enceinte et de gagner ma vie. Je suis donc fortement motivé pour remédier à cela, et je rajoute donc une résonance dans mon enceinte (cf. fig. n° 13b) et j'obtiens une courbe de réponse (cf. fig. n° 13c) qui me donne des chiffres plus satisfaisants que j'espère plus rémunérateurs. Ceci dit, si ma résonance est mal

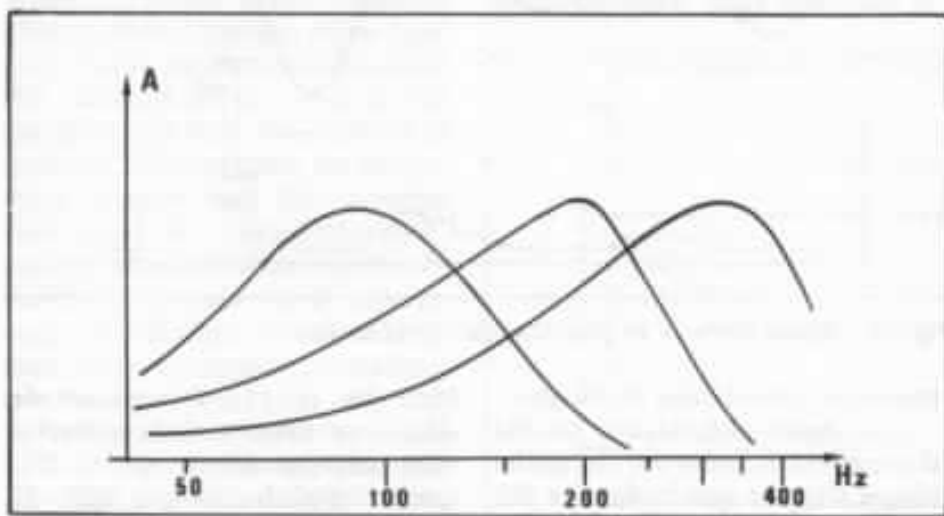


Fig. 12 : Filtrage de la membrane basilaire.

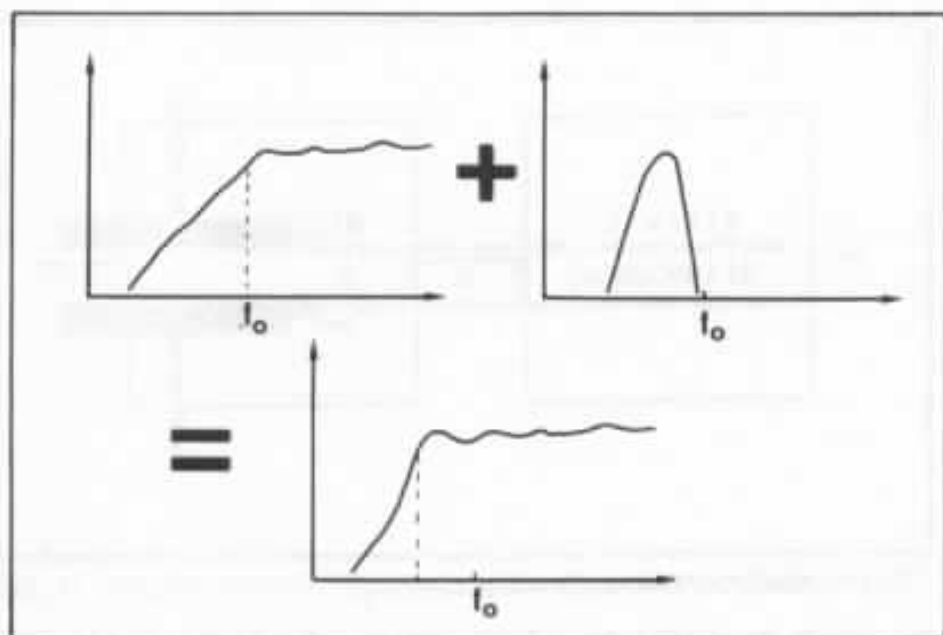


Fig. 13 : Conception d'une enceinte !!!

amortie, j'ai remplacé un manque de graves naturel qui, subjectivement parlant, ne gênait pas beaucoup l'oreille qui sait restituer le fondamental, par des graves agressifs : en effet, chaque fois que le message sonore comportera des fréquences situées à l'intérieur de la bande «gagnée», leur extinction sera limitée par la résonance de mon enceinte. On a le droit d'aimer de tels graves, mais si on recherche la fidélité, une amélioration des chiffres correspond ici à une dégradation de la qualité. Une telle enceinte se reconnaîtrait facilement avec les enregistrements de musique de variété actuel ou le rythme est souvent ponctué par des coups de grosse caisse ; un tel son correspond à un choc (toutes les fréquences sont excitées) suivi de l'amortissement des résonances de l'instrument. L'enceinte décrite plus haut imposera sa propre résonance et donnera toujours le même «BOUM» ou le même «BAOUM» quel que soit l'enregistrement. Je ne veux pas croire que de telles enceintes existent dans le commerce, je laisse votre oreille juge.

Second exemple : J'ai une chaîne de reproduction dans ma

salle de séjour et j'emprunte à un ami plus fortuné un sonomètre. Au moyen d'un disque où sont enregistrées des fréquences pures et du sonomètre je relève la courbe de réponse de mes enceintes dans ma salle de séjour et, oh horreur, je découvre que cette courbe de réponse est très tourmentée ; je le suis aussi et je me précipite pour acheter un «égaliseur» qui me permettra de «compenser» les défauts de ma salle de séjour, d'être rassuré et accessoirement de montrer aux voisins qu'on a son standing. Mais il n'est pas évident que j'ai amélioré la qualité de ma reproduction électroacoustique. Les irrégularités dans la courbe de réponse de ma salle de séjour sont dues à des parcours différents des ondes acoustiques qui sont plus ou moins réfléchies par les obstacles et qui se recombinaient suivant Fresnel au point d'écoute ou de mesure et à des résonances, ces phénomènes sont d'autant plus marqués et moins localisés que la longueur d'onde est grande et donc la fréquence basse. L'oreille connaît bien les réflexions multiples et les résonances des lieux clos, mais elle ne travaille pas avec Fresnel pour les sons réels, elle perçoit plu-

sieurs incidences d'un même son ; Si ces incidences sont très décalées temporellement, on a conscience d'un ou plusieurs échos, s'ils sont rapprochés cela change un peu le timbre, un instrument sonne différemment en fonction du local sans que l'oreille soit agressée par un manque de fidélité. Ai-je eu raison de corriger électroniquement des défauts acoustiques, d'utiliser des résonances électriques (on a pu voir dans le premier exemple les risques des résonances et tout le bien qu'il faut en penser). J'aurais peut-être mieux fait de traiter acoustiquement les résonances qui peuvent être subjectivement assez gênantes en jouant sur des revêtements muraux et sur la disposition de ma pièce et d'accepter les irrégularités qui subsisteraient et avec lesquelles mon oreille sait vivre depuis fort longtemps. Peut-être, mais je n'aurais pas un bel appareil avec une face avant noire ou chromée pleine de boutons, à montrer aux voisins.

Troisième exemple : Le correcteur physiologique, ce dispositif fait varier la courbe de réponse d'un préamplificateur en fonction de la commande de volume pour compenser les variations de sensibilité de l'oreille pour différents niveaux. Nous ne parlerons pas de sa réalisation pratique (souvent approximative), nous n'insisterons pas sur le fait que la correction est fonction de la position d'un potentiomètre et non du niveau réel (fonction outre de la position du potentiomètre, du niveau du signal d'entrée et du gain derrière ce potentiomètre (attention au rendement des enceintes)) pour insister sur les vices de principe d'un tel dispositif : Ceux qui l'ont conçu se sont inspirés de courbes de sensibilité de l'oreille telles celles de Fletcher et voulaient donner à faible niveau une impression subjective équivalente à celle à fort niveau ;

ce serait possible pour des signaux dont toutes les composantes évolueraient dans une dynamique très réduite, cela limite énormément le choix des programmes musicaux ; pour les signaux sonores habituels qui ont une certaine dynamique, l'action de l'oreille moyenne fait évoluer la courbe de réponse de l'oreille d'une façon que Flechter n'a pu mesurer puisqu'il a fait ses mesures sur des signaux sans transitoires. Heureusement cette bonne idée (sur le plan commercial) a fait long feu, et on n'en parle plus guère aujourd'hui.

Dans ces exemples, où des erreurs ont été commises, parce qu'on ne se souciait que de la réponse en amplitude, je n'ai pas parlé des malheurs de la réponse en phase : celle-ci qui pourrait d'ailleurs servir le signal d'alarme dans tous ces égarements, laisse présager des réactions sur les signaux transitoires, pour le moins regrettables. Tant pis pour ceux qui ont l'extravagance d'écouter autre chose que les signaux utilisés pour tester les matériels électroacoustiques, après tout il existe d'excellents enregistrements de signaux sinusoïdaux.

Mesures non-linéaires

Les mesures de non-linéarité, essentiellement la mesure de la distorsion harmonique, correspondent aux principales sources de distorsion qu'on peut estimer, en première approximation, être les seules. C'est pour cela qu'elles se sont imposées et ont permis au début des progrès réels et plus près de nous des progrès moins réels. Admettre aujourd'hui qu'elles sont le reflet de toutes les distorsions que peut subir le signal audio relève d'une méconnaissance des circuits électroniques ; ces mesures se réfèrent à un modèle théorique de circuit électronique composé d'un circuit linéaire

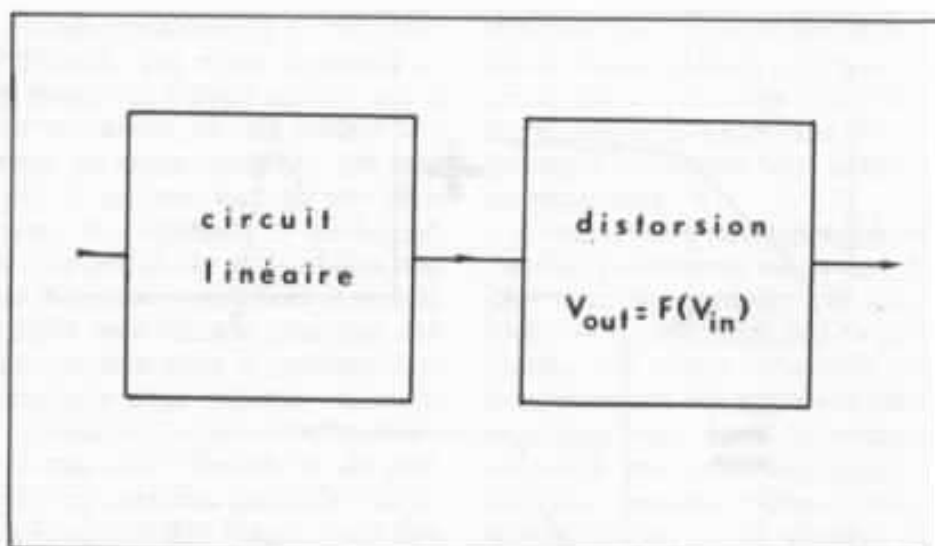


Fig. 14 : Modèle classique des circuits.

du circuit à modéliser) et d'un circuit producteur de non-linéarités (défini par une loi $V_{out} = F(V_{in})$) (cf. fig. n° 14).

Ce modèle est très pratique car il permet, par une analyse quasi-linéaire, d'utiliser les outils de l'analyse linéaire. Nous avons déjà vu à propos du fonctionnement de la contre-réaction (voir «la distorsion dans l'amplificateur de puissance», L'Audiophile n° 28) les dangers d'une telle simplification. De plus, déjà sur un plan purement théorique, ce modèle ne recouvre pas toutes les sources de distorsions : On peut, par exemple, avec plusieurs de ces modèles, faire le schéma qui conduit à la fameuse distorsion d'intermodulation transitoire ; le circuit ainsi obtenu échappe au modèle lui-même (voir la très abondante littérature sur le sujet).

Dans quelques articles rigoureux que j'ai eu l'occasion de lire et dont les auteurs utilisaient ce modèle, ils prenaient bien soin de dire que la loi $V_{out} = F(V_{in})$ était unique et continue, que le circuit était sans mémoire ; ce sont bien là les différences qui peuvent exister entre le modèle et la réalité : la loi n'est pas toujours unique, elle peut dépendre de causes physiques extérieures indépendantes ou conséquence

du signal lui-même ; mais pas conséquence de la valeur instantanée du signal (sinon cette dépendance serait comprise dans la loi $V_{out} = F(V_{in})$) mais de son évolution dans le passé, le circuit a donc une certaine mémoire : celle-ci peut se manifester par exemple par de l'hystérésis ou une limite de slew-rate.

La distorsion liée à la mémoire des circuits est très pernicieuse car elle peut être très discrète dans les mesures traditionnelles qui se font avec des signaux sagement stables et devenir très actives pour des signaux avec de nombreux transitoires comme les signaux audio. Cette mémoire peut être thermique par exemple : la chaleur due au passage de courant modulés par le signal est stockée puis diffuse vers d'autres éléments qui peuvent être thermosensibles (variation de résistivité, effet thermoélectrique, modification des lois des semi-conducteurs, dilatation modifiant des caractéristiques électriques), parfois c'est l'élément lui-même qui est thermosensible et qui se modifie par autoéchauffement (voir les articles sur la distorsion thermique dans les n° 32 et 33 de L'Audiophile).

Cette mémoire peut être diélectrique : L'absorption diélectrique dans les condensateurs a

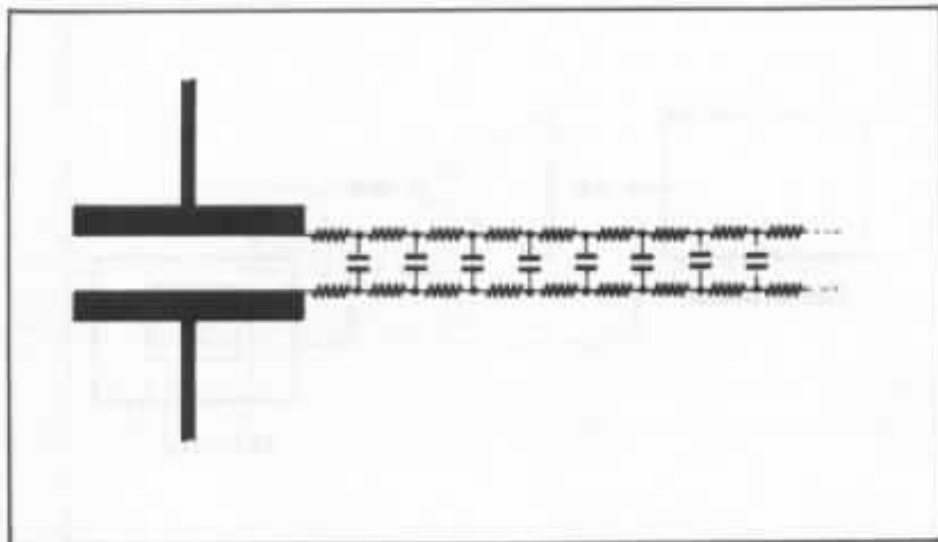


Fig. 15 : Modélisation de l'absorption diélectrique dans un condensateur.

été modélisée de façon linéaire selon le schéma de la figure n° 15. Le réseau ainsi défini constitue une véritable ligne à retard pour les signaux, qui a très peu d'influence sur les signaux stables et qui n'est pas détectable par les mesures traditionnelles ; ce peut être une explication parmi d'autres au son des condensateurs, n'en déplaise à ceux qui ont mal appris la physique.

Cette mémoire peut être mécanique : G. Chrétien m'a raconté comment il avait été surpris par le son d'un amplificateur à tubes dont il ne reconnaissait plus le son ; finalement, ce phénomène trouva son explication : l'amplificateur dans cette expérimentation qui se voulait rapide, avait été placé à proximité de l'enceinte et par microphonie les sons qu'elle émettait étaient partiellement réinjectés dans l'amplificateur. Ceux qui tournent en dérision les « oreilles d'or » n'auraient pas pu constater quoi que ce soit d'anormal en mesurant alors l'amplificateur dans la configuration même du défaut.

Il y a encore d'autres phénomènes qui peuvent produire des distorsions pour des raisons parfaitement admises par la physique : par exemple des vibrations produites par des forces électrostatiques (loi de Coulomb, voir le

témoignage de J. Hiraga sur ce phénomène pour les condensateurs dans L'Audiophile n° 1) ou par des forces électromagnétiques (loi de Laplace, dans les câbles de haut-parleur multibrins par exemple) impliquent des échanges d'énergie entre le circuit électrique et son environnement mécanique donc force électromotrice ou contre-électromotrice. Si les phénomènes mécaniques sont linéaires et sans mémoire on peut espérer rejoindre le canon des mesures classiques, sinon...

Il y a sans doute d'autres causes physiques possibles pour produire des distorsions qui échappent aux mesures traditionnelles et je serais désolé si après cet exposé quelqu'un venait me voir et me disait : « C'est bien beau vos distorsions bizarres, mais finalement ça peut faire combien de % ? ». Poser le problème en ces termes c'est rester prisonnier du modèle classique de distorsion ; les distorsions qui échappent à ce modèle ne peuvent pas se chiffrer en % ; Vouloir tenter de définir des % de distorsion en transitoire comme je l'ai déjà lu ne me paraît pas sérieux.

Quelles mesures ?

La critique est aisée, paraît-il ; Pas celle des mesures classiques en tout cas : il m'a fallu plu-

sieurs années pour leur échapper tellement nous sommes imprégnés d'une culture technique qui repose sur celles-ci. En proposer d'autres est encore plus difficile.

Pourquoi des mesures ?

C'est une question qu'il faut se poser, et si certains la posent, c'est qu'ils ont une réponse toute prête à cette question : « Plus de mesures, celles-ci nous ont déjà fourvoyés une fois, pourquoi prendre le risque de recommencer ? ».

Je vois principalement deux raisons qui justifient les mesures à mes yeux. La première est égoïste ; la mesure, ce doit être un guide pour l'audiophile à la recherche de la vérité sonore, qui peut lui faire gagner du temps dans sa quête ; en effet, même si c'est l'oreille qui est le juge ultime, on ne saurait avoir le temps de tout écouter et il faut faire tant de choix ; plus on affine les problèmes et plus il faut de temps car l'oreille, qui a de très grandes facultés d'adaptation, est un juge débonnaire pour les petits défauts, dont la patience finit par se lasser.

Face à ce problème, l'audiophile qui a renoncé à la mesure risque d'être tenté par la démesure et d'être victime de ce que je serais tenté d'appeler le syndrome du marteau-pilon ; quoi de plus tentant, en constatant que le remplacement de la capacité de 1 000 μF par une de 5 000 μF dans un montage apporte une amélioration audible, que de vouloir essayer avec 10 000 μF , puis 2 x 10 000 μF , puis pour être sûr d'obtenir la meilleure qualité 5 x 10 000 μF voire 20 x 10 000 μF en caressant le rêve de mettre un jour 100 x 10 000 μF . Privés du repère des mesures, certains se rassurent dans l'ivresse de la démesure.

Pourtant ici encore, le mieux finit aussi, parfois, par être l'ennemi du bien : par exemple pour les câbles des haut-

parleurs, on pourrait être tenté de croire que des fils énormes de plusieurs cm² de section représenteraient le progrès absolu par rapport aux fils maigrelets qui sont encore généralement utilisés. MM Isoda et Fukuda ont constaté (cf. L'Audiophile n° 34) par des études qui représentent cinq années d'écoute (!) que le gigantisme n'est pas l'arme absolue.

Voulant atteindre certains buts avant d'avoir une barbe blanche et des oreilles fatiguées, je tiens à utiliser la mesure pour me guider chaque fois que cela sera utile, mais une mesure qui soit un gage de progrès, car il vaut mieux pas de boussole, qu'une boussole qui fonctionne mal.

L'autre raison plus altruiste qui justifie les mesures, est que la mesure est un moyen de communication, une référence objective qui permet les progrès collectifs. Le manque actuel de mesures qualifiées fait du monde de la haute fidélité une véritable jungle. Soumis à la pression économique les fabricants de matériel et de composants ont besoin de mesures, ils peuvent difficilement investir dans de longues recherches subjectives aux résultats jugés aléatoires, et pour lesquels il n'y auraient pas d'argument immédiat pour un succès commercial.

C'est pour cette raison que l'audiophile doit se sentir impliqué dans l'élaboration et la promotion de bonnes mesures ; si aujourd'hui les meilleurs condensateurs sont les modèles Y de la marque «Machin» fabriqués à tel endroit, le jour où la fabrication de ce condensateur évoluera pour une raison ou pour une autre, si une mesure ne permet pas d'établir et de vérifier la qualité souveraine du produit, il y a de fortes chances que la nouvelle version de ce condensateur ne vaille pas l'ancienne.

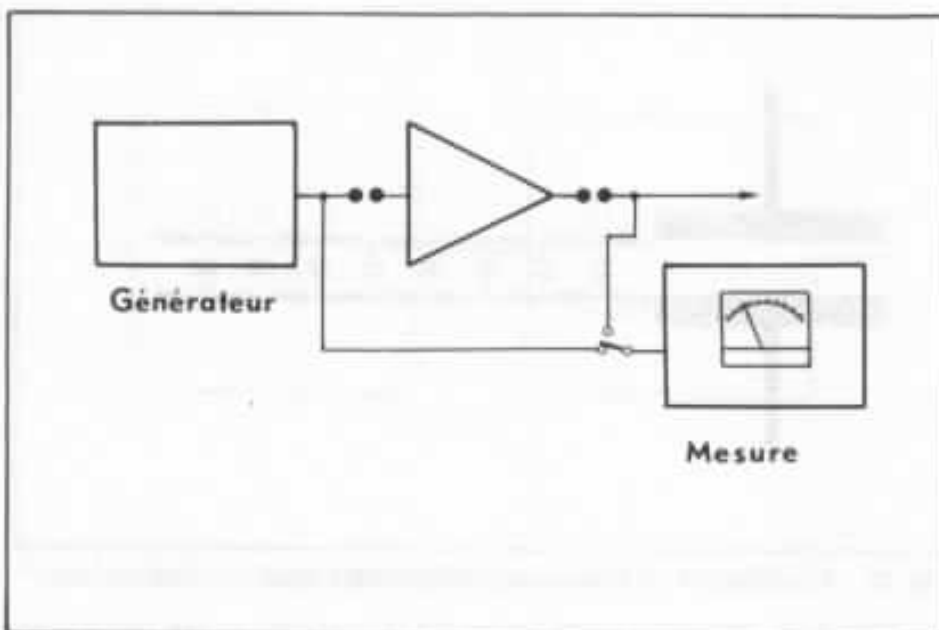


Fig. 16 : Principe des mesures.

Principe des mesures

Une mesure, dans le cas qui nous occupe ici, se définit par un signal et une caractéristique à mesurer. Un générateur (voir fig. n° 16) fournit à l'entrée de l'appareil à mesurer, le signal sur lequel la caractéristique à mesurer est connue ou mesurée (et en général, d'une valeur voulue nulle), et un dispositif de mesure évalue la caractéristique qui nous intéresse dans le signal de sortie : l'évolution de cette caractéristique avec éventuellement une pondération permet de chiffrer une performance de l'appareil testé.

Ainsi pour les mesures classiques la caractéristique est le contenu spectral et le signal de test est composé d'une ou deux raies pures. On mesure donc la valeur efficace des raies supplémentaires créées par l'élément mesuré.

Nouvelles mesures déjà proposées

La plus connue concerne la mesure de la distorsion d'intermodulation transitoire. A mon sens elle présente surtout un intérêt historique, car c'est la première remise en cause des mesures traditionnelles qui ait touché beaucoup de monde, grâce à une

analyse plus rigoureuse de la contre-réaction. Elle a mis fin à certains abus dans l'usage de celle-ci. Mais elle n'a pas toujours été bien comprise puisque beaucoup la confondent avec la mesure du slew-rate maximum. Au-delà d'une certaine valeur la mesure du slew-rate maximum n'a plus de sens : cette limite existe sur tout appareil, mais doit être masquée par des limites linéaires de bande pour tout signal d'entrée dont l'amplitude est limitée.

Pour la mesure de la distorsion d'intermodulation transitoire le signal d'entrée est composé d'un signal à fréquence élevée superposé à un signal carré de basse fréquence et de forte amplitude (voir fig. n° 17). La caractéristique à surveiller est l'amplitude du signal à fréquence élevée qui ne doit pas être affectée par les brusques variations du signal basse fréquence.

P. Antoniazzi, C. Buongiovanni et S. Tintori proposent dans «Measuring transient intermodulation in audio amplifiers» (Wireless World de mai 1981) une autre méthode de mesure qui utilise comme signal d'entrée une combinaison de dents de scie filtrée (voir fig. n° 18) et comme

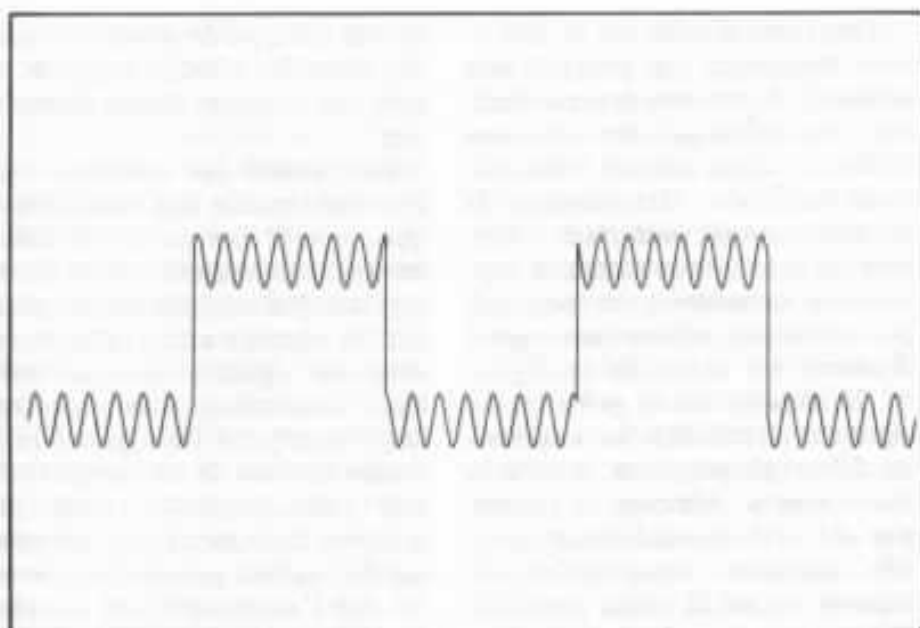


Fig. 17 : Signal de test de la T.I.M.

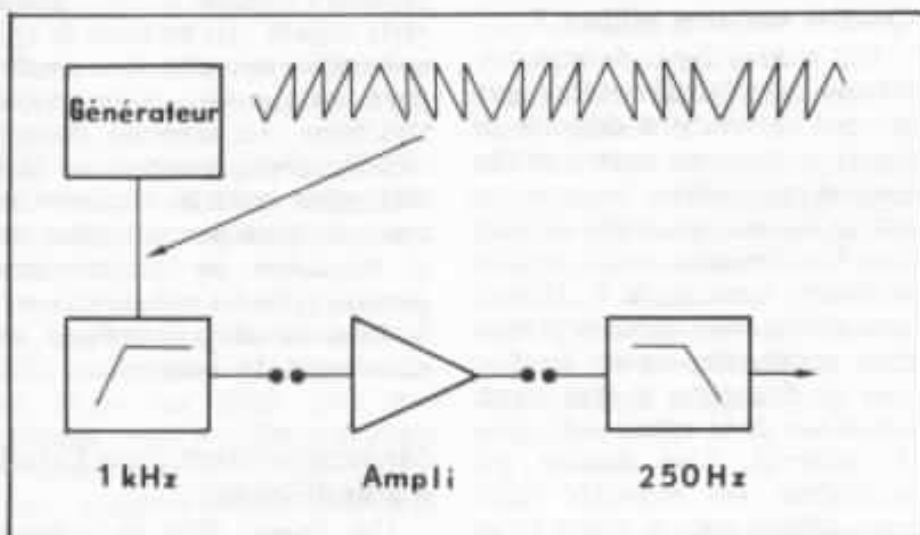


Fig. 18 : Une autre mesure de la TIM.

caractéristique à mesurer l'amplitude du signal correspondant à la fréquence de commutation après filtrage des signaux hautes fréquences.

La BBC, vénérable institution britannique, a testé une nouvelle méthode de mesure de distorsion qui utilise comme signal d'entrée un bruit pseudo-aléatoire obtenu de façon digitale («A new distortion measurement» par R. Belcher, *Wireless World* mai 1978). Un tel bruit correspond à un spectre de raies (voir fig. 19), la caractéristique à mesurer est le niveau d'autres raies produites par l'appareil à mesurer. C'est une idée intéressante mais une distorsion de modèle classique (génération d'harmoniques) échappe à cette mesure. Une évolution de cette mesure a consisté à utiliser la somme de deux signaux de ce type de fréquences de base différentes et d'utiliser deux filtres en sortie, ce qui permet de retrouver les distorsions du modèle classique.

Y. Hirata dans «Quantifying amplifier sound» (*Wireless World* d'oct. 1981) nous propose une mesure basée sur une étude théorique qui a examiné l'effet des distorsions connues sur un signal composé de demi-sinusoïdes de période et d'ampli-

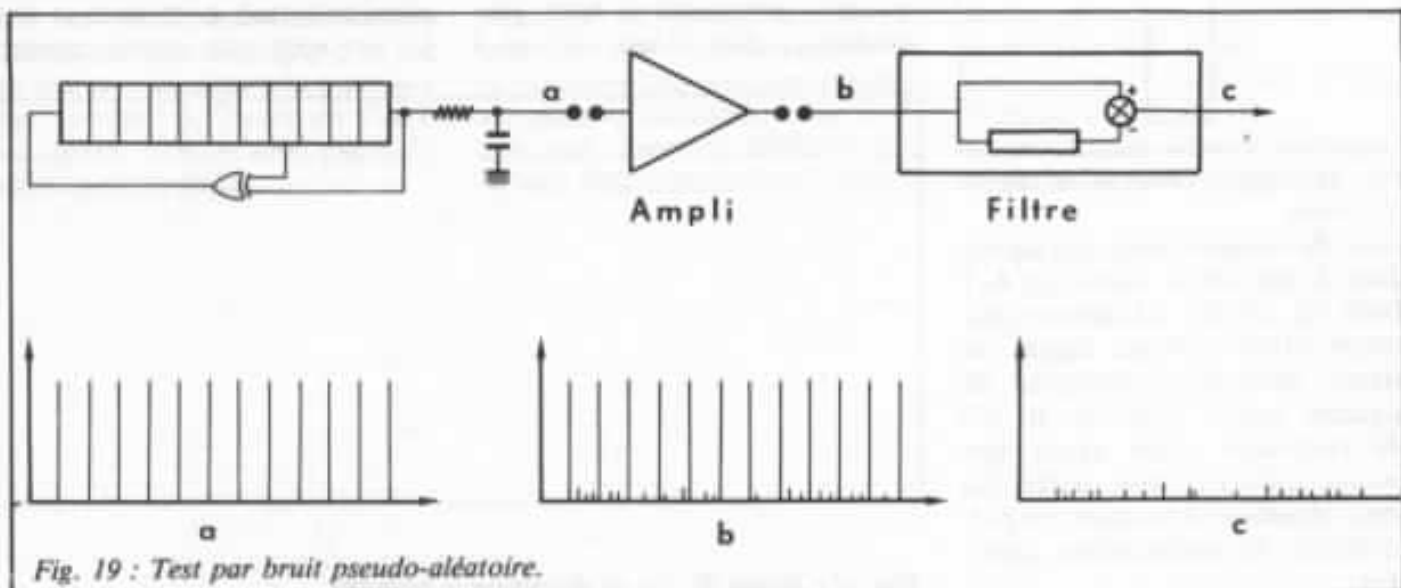


Fig. 19 : Test par bruit pseudo-aléatoire.

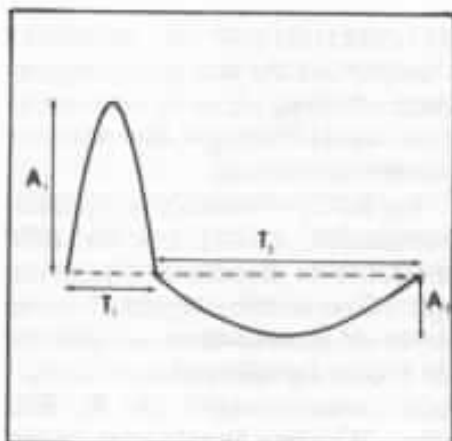


Fig. 20 : Signal théorique de test de Y. Hirata.

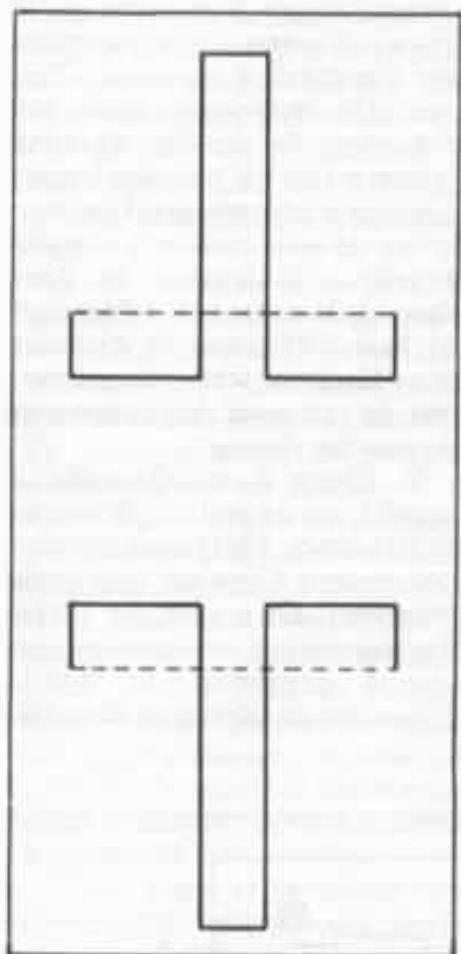


Fig. 21 : Signal pratique de test de Y. Hirata.

tude différentes mais correspondant à une même valeur de $A.T$ (voir fig. n° 20). La mesure proposée utilise comme signal un signal périodique composé de signaux carrés (voir fig. n° 21) dissymétrique mais ayant une composante continue nulle. La caractéristique à mesurer est précisément la composante continue.

Dans mes études sur la distorsion thermique j'ai proposé une méthode de mesure des transitoires, et envisagé des moyens d'étendre cette mesure à des circuits complets. Des mesures de ce type devrait permettre d'étudier les effets de certaines distorsions à mémoire ; on pourrait par exemple utiliser un signal d'entrée tel celui de la figure n° 22 et observer la présence de signaux alternatifs ou continus en dehors du stimulus, mais si la distorsion à mémoire se traduit par des intermodulations entre des signaux temporellement séparés on ne la verra peut-être pas.

Quelles mesures utiliser ?

Il y a deux types de mesures, les mesures générales et les mesures qui cherchent à détecter tel ou tel phénomène source de distorsion particulière. Les mesures qui se veulent générales (distorsion harmonique, bruit pseudo-aléatoire, mesures de Y. Hirata) sont ambitieuses car elles prétendent appréhender toutes les formes de distorsion et être représentatives de la valeur subjective de celles-ci. Une mesure qui atteindrait ces objectifs serait merveilleuse mais je doute au vu de ce qu'on sait sur la perception auditive que ce soit possible. Les mesures particulières sont plus modestes, elles visent surtout à

limiter un type de distorsion précis, dont les effets subjectifs ne sont pas toujours faciles à apprécier.

En général les mesures utilisent des signaux très caractéristiques sensés mettre en évidence les dysfonctionnements du montage testé dont pourraient souffrir les signaux audio. Des essais avec des signaux réels me semblent nécessaires ; un problème important pour les signaux réels (outre le choix de ces signaux) est leur reproductibilité pour des mesures comparatives ; on peut espérer que les possibilités ouvertes par l'enregistrement numérique du son permettent de résoudre cette difficulté. On peut faire plusieurs mesures sur les signaux réels utilisés ; les mesures de type spectral ne sauraient être absolues après ce que nous avons vu de l'audition, les mesures de type «oscilloscopique» (mesure de la différence entre les tensions instantanées) ne permettraient que de qualifier un amplificateur parfait, pour les mêmes raisons ; il faudrait alors combiner ces deux types de mesures.

Mesures retenues pour l'étude d'amplificateur

J'ai retenu déjà les mesures traditionnelles parce que même si elles ne sont pas la référence absolue qu'on a longtemps cru, je ne vois pas quelle mesure

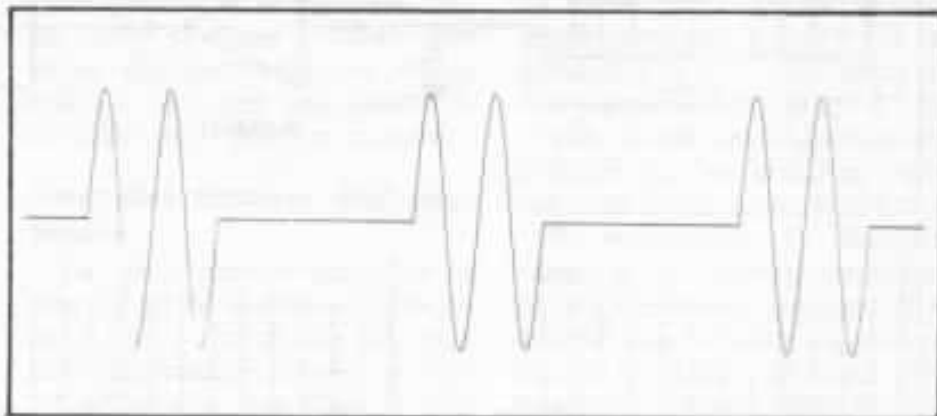


Fig. 22 : Signal de test de distorsion à mémoire.

pourrait aujourd'hui les remplacer dans ce rôle ; mesures traditionnelles donc mais en les affinant et en connaissant leurs limites. La mesure de bande passante sera affinée par des mesures de phase destinées à mettre en évidence des problèmes que ne peuvent révéler seules des mesures de niveau en régime établi. Mesure de distorsion harmonique en sachant qu'au-delà de 80 dB, les chiffres ne veulent plus rien dire et en surveillant l'évolution de cette distorsion (amplitude, forme et éventuellement contenu spectral) en fonction de la fréquence ; pour les circuits apériodiques que je veux faire elle ne doit pas beaucoup évoluer.

Les mesures traditionnelles doivent être complétées, par d'autres mesures ; je considère que les mesures traditionnelles ne mesurent qu'une dimension de la distorsion. Si on compare la distorsion à un objet dont on veut réduire la taille le plus possible, la garantie d'épaisseur maximale que représentent les mesures classiques n'est pas une garantie pour la taille maximale de la distorsion, c'est pourquoi il faut mesurer dans d'autres dimensions.

Je ferais également des mesures dans le genre de celles qui ont mis en évidence la distorsion thermique afin d'essayer d'éviter les distorsions dues à la mémoire des circuits : à l'heure où j'écris ces lignes, elles ne sont pas définitivement arrêtées.

Enfin, dernière mesure objective faite sur des signaux réels, il faudra mesurer les différences entre les tensions instantanées d'entrée et de sortie, comme dans le dispositif de Quad pour rechercher des causes de distorsion qui auraient encore échappé aux premières mesures. Il faut faire attention dans ces mesures aux problèmes de rotation de phase due aux coupures de bande de l'amplificateur, nous verrons le montage retenu lorsqu'il aura été testé sur des circuits réels. Je ne crois pas que des mesures spectrales avec des signaux réels puissent donner plus de renseignements que les mesures de distorsion, tant elles sont difficiles à mettre en œuvre avec précision.

Puis the last but not the least il faudra que les oreilles confirment les résultats de ces mesures croisées, dont on ne peut pas être sûr qu'elles permettent de tester tous les défauts d'un amplificateur. J'ai le sentiment qu'un tel choix met toutes les chances de mon côté mais cette opinion sur le choix des mesures objectives à faire est bien subjective (!).

Conclusion

J'ai essayé dans cet exposé de concilier les points de vue de ceux qui sont bien conscients de la nécessité des mesures objectives dans le domaine audio, et de ceux qui savent en définitive que le seul juge absolu c'est l'oreille

de chacun (qui n'est pas la même pour tout le monde). Même si Saint Augustin a dit que la seule mesure en amour c'est la démesure, je crois que la passion des audiophiles a tout à gagner à l'usage de bonnes mesures ; le problème est immense, et je n'avais pas ici l'ambition de le résoudre totalement. Malgré cela je pense avoir ici mieux posé le problème qu'il ne l'est généralement et j'espère que la suite de cette étude permettra à nos oreilles de valider a posteriori le choix des mesures fait ici.

Bibliographie

Pour ceux qui sont intéressés par la physiologie de l'audition et les problèmes de perception, voici quelques références qui m'ont été bien utiles pour mieux aborder ce problème et pour faire cet exposé.

E. Leipp ; Acoustique et musique, Masson 1980

E. Leipp ; La machine à écouter, Masson 1977

M. Schroeder ; Models of Hearing, Proceedings of the IEEE, sept. 1975

A. Gribenski ; L'audition, Que sais-je PUF 1969

J.J. Matras ; Le son, que sais-je PUF 1972

J.J. Matras ; Acoustique et électroacoustique Tome 1, Eyrolles 1965

Son et musique, collection Pour la Science, dif. Belin

Le cerveau, collection Pour la Science, dif. Belin

La perception visuelle, collection Pour la Science, dif. Belin.

On en parle...

Un nouveau transducteur, par Siegfried Klein...

Siegfried Klein est un nom désormais bien connu dans le domaine des transducteurs. Plus précisément, son nom est associé aux transducteurs ioniques en application audio dont il est incontestablement le père : de l'ionophone au tweeter ionique Magnat. Nous avons rencontré M. Klein à plusieurs reprises pour parler des transducteurs ioniques, un article très détaillé sur le tweeter Klein-Magnat a été publié dans notre numéro 18 de décembre 80.

A l'heure où nous bouclions ce numéro, nous avons été contacté par M. Klein qui tenait à nous présenter en toute première exclusivité un nouveau transducteur dont le principe de fonctionnement repose sur une application et un procédé d'utilisation

du phénomène de la magnétostriction non encore utilisés à ce jour. De quoi s'agit-il ? Nos lecteurs se souviendront peut-être de leurs cours de physique... La magnétostriction caractérise le changement de dimensions de certains corps tels que le nickel et plusieurs de ses alliages, avec le cobalt par exemple, soumis à l'influence d'un champ magnétique. Cette caractéristique n'est pas nouvelle, elle est connue depuis fort longtemps. On trouve l'application de ce principe dans des oscillateurs, des lignes à retard et même des microphones...

En fait, même si son principe de base est extrêmement simple, cette application n'était pas évidente.

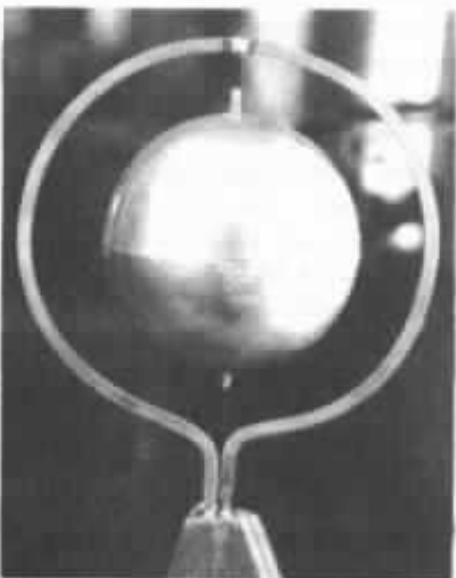
Si vous prenez une barre d'une substance magnétostrictive, que vous la placiez dans un champ

magnétique (bobinage parcouru par un courant continu, ou aimant), celle-ci subira le phénomène de magnétostriction : sa longueur va rétrécir. Si maintenant vous appliquez non plus une tension continue mais un signal alternatif aux bornes de votre bobinage, sur les alternances positives votre barre va rétrécir et sur les alternances négatives elle va également rétrécir. C'est à ce niveau que se situe le problème. En fait, le signal caractérisant les mouvements de votre barre en fonction du temps aura l'allure d'un signal de redressement en double alternance dont la fréquence est double de celle du signal électrique d'excitation de votre bobinage. L'idée de Siegfried Klein pour résoudre ce problème est extrêmement simple ! Elle consiste à appliquer une tension continue

superposée au signal alternatif qui «polarise» en quelque sorte votre barre à une dimension intermédiaire entre sa position au repos et sa position au maximum de contraction. Ainsi, la barre répondra au signal alternatif à la même fréquence, son signal de déformation oscillera de part et d'autre de sa position de repos fixé par la «polarisation» (compression sur les alternances positives et extensions sur les alternances négatives), il sera le reflet du signal électrique d'excitation. Voilà pour le premier point.



Siegfried Klein et sa dernière invention.



Siegfried Klein, fort de l'expérience sur les tweeters ioniques, voulait réaliser un transducteur omnidirectionnel utilisant ce principe. Pour lui, il semble évident que la restitution sonore doit passer par des transducteurs dont le diagramme de rayonnement est le plus ouvert possible et donc sphérique. Suite à divers essais sur des sphères placées à l'intérieur d'un champ magnétique créé par un bobinage sphérique placé à sa périphérie, il est arrivé au prototype de transducteur qu'il nous a présenté : un anneau à l'intérieur duquel est placée une sphère de la taille d'une grosse orange. L'ensemble repose sur une petite pyramide d'une vingtaine de centimètres de haut ayant pour rôle d'éliminer tout effet de bords au rayonnement acoustique. La sphère est parcourue par un courant continu ayant pour rôle de «polariser» la sphère à un diamètre intermédiaire à ses elongations maximales, comme nous l'avons expliqué précédemment avec la barre de métal en créant par induction le champ magnétique bien évidemment nécessaire à la magnétostriction. Notons également qu'il serait possible d'obtenir cette polarisation par le champ magnétique induit par un aimant permanent placé dans la sphère. L'anneau périphérique n'a en fait qu'un rôle de support conducteur. Le signal sonore électrique est appliqué à travers un transformateur d'adaptation d'impédance nécessaire compte tenu de la résistance ohmique de la sphère (de l'ordre de 0,1 Ω).

Le secondaire du transformateur est découplé du continu.

Voilà donc dans les grandes lignes la dernière innovation de M. Klein. A ce sujet, plusieurs brevets ont été déposés en collaboration avec une grande institution scientifique française. Le phénomène de magnétostriction permet sans problème la restitution d'ondes acoustiques jusqu'à

des fréquences de 200 kHz. Il faut préciser que lors de ces recherches, divers alliages ont dû être mis au point de sorte à disposer d'un matériau dont la sensibilité à l'effet de magnétostriction soit la plus importante possible. D'après ce que nous avons pu savoir, l'alliage est réalisé à partir de nickel et de cobalt dans des proportions qui sont du domaine du confidentiel...

La réalisation de la sphère se fait par dépôt électrolytique sur une anode en cuivre sphérique qui est «dissoute» après dépôt par un procédé chimique. La sphère d'alliage spécial ainsi obtenue est remplie d'un matériau absorbant afin d'éliminer tout effet de résonance dû à la cavité interne. Les connexions électriques sont effectuées par fils souples aux deux pôles de la sphère. D'après M. Klein, la sphère prototype qu'il nous a présentée descend sans problème jusqu'à 2 000 Hz. Il travaille actuellement sur la réalisation d'une grosse sphère afin de gagner en surface et ainsi descendre en fréquence dans l'espoir de réaliser un transducteur large bande. Lequel offrira en outre l'avantage d'avoir une résistance série de l'ordre de 4 Ω , ce qui permettrait d'éliminer le transformateur d'adaptation d'impédance. A préciser que de par le principe même de fonctionnement, l'augmentation des dimensions de la sphère ne limitera en rien les performances de restitution dans l'aigu, à l'inverse des transducteurs électrodynamiques pour lesquels plus la dimension est importante et plus la réponse en haute fréquence est limitée. L'épaisseur de la sphère étant extrêmement fine (environ 1/100^e de mm), les pertes par courant de Foucault sont pratiquement négligeables. Il y a fonctionnement en sphère pulsante. La seule inconnue, ou presque reste le rendement. Les écoutes préliminaires que nous

avons pu faire en comparaison avec le tweeter Magnat ont clairement mis en évidence le bien-fondé et l'avancement des recherches de M. Klein. Nous avons pu noter une efficacité pour le nouveau transducteur du même ordre de grandeur. Certes, le tweeter ionique procure des performances très sensiblement supérieures dans la précision et le filé des sons. Notons toutefois que le nouveau transducteur n'en est qu'au stade du prototype, il sera baptisé Saturne. C'est une découverte française ! Quelle sera la société qui le développera ? Pour l'instant, rien n'est fait. Avis aux professionnels et aux industriels. Ce serait tout de même bien que cette découverte française trouve preneur sur notre territoire...

Les Journées de la Haute Fidélité en mars 85

Nous ne reviendrons pas en détail sur les Journées de la Haute Fidélité de mars 85, nos dates de parution font que nos lecteurs ont pu lire les différents commentaires détaillés dans la Nouvelle Revue du Son. Un grand bravo tout de même à l'ensemble des exposants et en particulier des constructeurs français dont le niveau des réalisations ne cesse de progresser. La haute fidélité française, après un passage à vide dans les années 70, a sérieusement redoré son blason et peut prétendre se situer dans le peloton de tête des réalisations mondiales dans le secteur de haut de gamme.

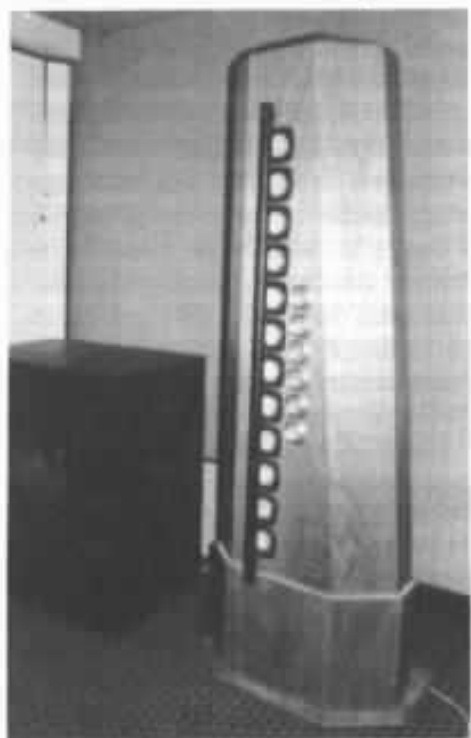
Nous profiterons toutefois de cette rubrique pour communiquer des informations plus détaillées à nos lecteurs qui n'ont pu se rendre au Sofitel et ainsi leur faire part des dernières évolutions de notre système.

En système acoustique, deux gros systèmes étaient présentés. D'une part, le système Totem (cf. L'Audiophile n° 32) dont la voie aigu a subi quelques modifi-



Onken avec médium TAD 2001 + pavillon bois sablé et tweeter JBL 2405.

cations avec une ligne acoustique de six tweeters Technics 5HH10 qui remplacent les quatre Fostex FT50, en outre, un diffuseur a été placé devant la ligne des médiums de sorte à améliorer encore le diagramme de rayonnement de cet étonnant système.



Enceinte Totem version 85, nouveaux tweeters et diffuseur sur le médium.

D'autre part, notre nouveau système à pavillon avec le TAD 2001 couplé au pavillon en bois sablé que nous avons développé.



L'ensemble de l'électronique.

Cette nouvelle voie médium constituait sans nul doute un des clous de notre exposition en matière de nouveautés. Deux articles dans ce numéro abordent la question.

Chacun des deux systèmes acoustiques était alimenté en tri-amplification. Les caissons de grave Onken étaient alimentés par un amplificateur Le classe A. Le médium dans le cas Totem utilisait un amplificateur expérimental de 100 W à Mos Fet et dans le cas TAD chambre de compression, le grand classique Hiraga 20 W dans sa dernière version. L'aigu était alimenté par les surprenants amplificateurs monophoniques Nemesis dont nous parlons également dans ce numéro. Le filtre actif était bien évidemment un modèle Kanéda.

En matière de préamplification, il y avait là aussi une grande première. Notre tout nouveau préamplificateur Le Solstice. Il s'agit bien évidemment d'un circuit de base

Kanéda. Nous restons fidèles à nos premières amours. Cependant, forts des expériences de ces cinq dernières années sur ce schéma, nous avons tenu à appliquer sur cette version commerciale les apports les plus significatifs. Au niveau de l'alimentation, nous avons retenu une version passive mais avec cinq étages de filtrage procurant une excellente régulation vis-à-vis des fluctuations secteur, toujours critiques dans le cas de préamplification de faible niveau. Malgré son apparence, le préamplificateur Le Solstice possède une alimentation plus «musclée» que celle de la version DC1. Au niveau semi-conducteur, les nouveaux double fet de chez Toshiba 2 SK 240 ont été retenus ; d'une part, leur degré d'appariement est remarquable, d'autre part, leur performance en bruit les place au plus haut niveau de la technologie.

La question du réglage de la balance, toujours extrêmement critique car imposant un deuxième potentiomètre en série avec celui de volume (tout potentiomètre est un «dévoreur» d'informations dont il est préférable de se passer...) a été réglée par l'utilisation de deux atténuateurs complètement indépendants, l'un pour le canal gauche, l'autre pour le canal droit. Ces atténuateurs réalisés à partir de commutateurs de très haute qualité et de résistances apportent très peu de dégradation au signal tout en offrant une souplesse d'utilisation remarquable. Il faut bien noter que suivant la tête de



La platine Verdier version 85.

lecture utilisée (bobine mobile avec ou sans prépré, aimant mobile), la sensibilité d'entrée des amplificateurs, le rendement des enceintes, le gain nécessaire pour se placer dans des conditions très confortables d'utilisation peut varier de plus de 40 dB suivant les combinaisons. Ce qui est énorme et qui se traduit soit par un travail en tout début de course de potentiomètre avec une bien piètre précision de réglage (avec les problèmes que pose la plupart des potentiomètres doubles en début de course en matière de linéarité indépendante : un canal démarre toujours avant l'autre...), soit par un gain global limité et un travail en bout de course avec les limitations de dynamique que cela implique. L'intérêt des atténuateurs séparés est de pouvoir, d'une part régler la balance si cela est nécessaire avec une précision de l'ordre du dB et d'autre part, de régler le gain global du système de sorte à pouvoir travailler à mi-course sur le potentiomètre de volume.

Le Solstice a été développé dans une optique «produit fini», un grand circuit imprimé reçoit l'ensemble des éléments. Les commandes de la face avant sont transmises par des prolongateurs d'axe aux éléments de commutation implantés sur un petit circuit imprimé vertical à proximité des entrées et des sorties. Tous les composants utilisés sont du plus haut niveau et choisis pour leur excellente performance subjective. Aucune limitation de coût n'est rentrée en ligne de considération pour le développement de ce préamplificateur. Par rapport à la version DC1, Le Solstice conserve les immenses qualités du circuit Kanéda, c'est évident, avec, en surcroît, un gain significatif sur les micro-informations. Cela se traduit par une restitution encore plus ample de l'image sonore avec un aigu plus détaillé et filé. Le grave gagne lui aussi en impact et en précision. L'alimentation n'est pas étrangère à ces évolutions.

Le système de lecture était composé de la platine Verdier qui, cette année, faisait peau neuve avec un look plus «habillé». Cela non pas uniquement pour des raisons esthétiques mais surtout consécutivement à l'emploi d'un nouveau moteur d'origine Studer à très haut couple, ce moteur découplé mécaniquement et possédant son circuit de régulation est monté dans un bloc totalement séparé



Le nouveau préamplificateur...

de la platine elle-même. L'entraînement s'effectue par fils (le raccord s'effectue par simple nœud... pour répondre aux nombreuses interrogations de nos lecteurs...). L'amélioration apportée par ce nouveau moteur est très significative. La stabilité des sources sonores a considérablement progressé. Le registre grave bas-médium a lui aussi gagné en performances par un son mieux tenu et beaucoup plus précis. La cellule utilisée était une DL 103 équipée d'un capot en plomb (désormais disponible à la Maison de l'Audiophile). Le bras SME 3012 était câblé en fils Isoda jusqu'à l'entrée du préamplificateur qui était la version commerciale Le Prépré. Enfin, le couvre-plateau utilisé était un modèle en peau de notre fabrication. L'ensemble des connexions était effectué en câbles Isoda, le lecteur compact-disc utilisé pour la circonstance était un modèle Phonophone que nous avons choisi pour ses bonnes prestations subjectives (base Philips retravaillée au niveau des étages analogiques et de l'alimentation où la plupart des régulateurs ont été supprimés car ils apportent des duretés à la restitution).

Nous tenons à remercier le très nombreux public qui nous a rendu visite pour sa très grande attention et sa grande «discipline»... qui nous ont permis d'effectuer nos démonstrations dans les meilleures conditions.

Pas de chance !

Dans notre numéro 34 dans cette même rubrique, nous vous annonçons la découverte d'un transformateur pour cellule bobine mobile dont les performances étaient tout à fait remarquables. Malheureusement, la société danoise spécialisée dans la réalisation de transformateurs de toutes sortes a récemment fait faillite... Cela ne nous vaut rien de jouer les chasseurs de petites merveilles !

Câbles Isoda

Tous nos lecteurs connaissent désormais les très étonnants câbles de liaison ampli-enceintes acoustiques de technologie hybride dénommés Isoda. Un article dans le numéro 34 détaille toutes les étapes du développement de ce câble de structure tout à fait hors du commun. Lors des Journées de la Haute Fidélité de mars au Sofitel étaient présentés les prototypes du câble de modulation coaxial. Cela nous a valu de très nombreux coups de téléphone. Tous les amateurs ayant pu expérimenter le câble haut-parleur attendent avec grande impatience la sortie de ce câble de liaison entre électroniques dans l'espoir de faire progresser d'autant les performances de leur système de restitution. Malheureusement, ce câble coaxial n'est pas encore disponible, nous n'avons pu disposer que d'échantillons prototypes et il faudra très vraisemblablement attendre l'automne 85 pour qu'enfin les amateurs puissent câbler toute leur installation en Isoda.

Toutefois, nous pouvons vous annoncer des nouveaux modèles de câbles développés par Isoda. Tout d'abord, un câble de liaison ampli-enceintes acoustiques de référence HB 3160. Il s'agit d'un câble comportant 22 brins (le modèle déjà distribué dont la référence est HB 3320 comporte lui 55 brins). Ce câble se veut être une version «économique» en structure hybride, il utilise trois composants : cuivre, aluminium et laiton. Il se présente sous forme d'un câble bifilaire, comme la plupart des câbles haut-parleurs. Son prix est lui aussi beaucoup plus «standard» de l'ordre de 50 F le mètre, soit de l'ordre du tiers de prix du modèle HB 3320 qui, rappelons-le, se présente sous forme de câble simple et non pas bifilaire,

il en faut quatre pour une installation stéréo.

Autre nouveauté de référence très proche, le HB 3160S qui est en fait une version monofilaire du 3160. Sa structure est donc identique et il est destiné au câblage intérieur tant d'enceintes acoustiques que d'électroniques. C'est une grande nouveauté et les essais préliminaires que nous avons pu faire au câblage interne avec ce modèle ouvrent réellement des horizons nouveaux. Vivement que l'on puisse remonter jusqu'au micro en technologie Isoda pour toutes les connexions...

Isoda travaille également, outre les modèles coaxiaux dont nous vous avons parlé précédemment, sur des versions de plus petite section pour les câblages internes de 7 à 11 brins par conducteur ainsi que sur des câbles de modulation pour bras de lecture. A ce sujet, nous avons eu la chance d'avoir eu des échantillons afin que nous puissions en faire l'évaluation, le SME 3012R qui équipait la platine Verdier au Sofitel était câblé en Isoda...

Système Mini-Onken-PM6-5HH10

Dans cette même rubrique, nous annonçons dans le n° 34, les essais préliminaires que nous avons faits sur l'association Mini-Onken équipée du Focal 10C01 dans le grave (Audiophile n° 26), du Lowther PM6 dans le médium et du tweeter 5HH10 Technics. Les premières expérimentations se sont avérées très encourageantes et nous ont incités à creuser la question.

L'association du Lowther et du petit tweeter Technics est tout simplement surprenante. Il faut bien savoir que la qualité intrinsèque d'un haut-parleur dans la bande de fréquences qu'il est chargé de reproduire n'est pas une condition suffisante pour parfaitement définir les performances de restitution d'un

système, qu'il soit en deux ou trois voies. Si les choses étaient si simples, la plupart des enceintes du commerce serait de très haut niveau de restitution, malheureusement il faut bien reconnaître que les très bonnes enceintes ne sont pas légion. L'association, le mariage des haut-parleurs entre eux est un point capital. Il est clair que la qualité de ce couplage n'est pas simplement régie par des critères de réponses en pression ou de phase en fonction de la fréquence. L'habitude et l'expérience mettent clairement en lumière des couples mieux réussis que d'autres. Dans ce sens, l'association PM6-5HH10 nous a pleinement fait prendre conscience de cette vérité trop souvent négligée par les concepteurs, sans doute à cause du petit côté «loterie» qu'elle implique et surtout du fait que la mesure traditionnelle que nous connaissons ne révèle rien de réellement significatif quant à la qualité de l'association. Le PM6, haut-parleur large bande que nous utilisons en médium est un transducteur que nous aimons beaucoup, de par ses qualités de définition et de dynamique. Il a néanmoins des limitations notoires. Il faut lui reconnaître certaines colorations dans la bande médium avec une accentuation nette du registre haut-médium pouvant se traduire dans certaines associations par une mise en avant fort désagréable de ce registre. Cependant il est clair pour nous que dans l'esthétique de restitution qui nous intéresse et dans l'éventail de ce que nous propose le marché, le 21 cm Lowther reste, sans nul doute, en application médium l'un des meilleurs choix en transducteur à membrane. Nous l'avons essayé dans de nombreuses configurations, comme nos lecteurs ont pu le suivre au fil des numéros. Entre autres avec le caisson Onken équipé de l'Altec 416-8 et le

tweeter T 925, ou T 825, de Fostex, en filtrage passif ou actif. Dans cette configuration, le filtrage actif, en mettant de côté les considérations de coûts, était sans conteste la solution qui s'imposait. A noter qu'une self de 0,2 mH était conseillée en série avec le PM6 de sorte à lisser le haut-médium et à procurer un bon couplage avec le tweeter. Le T 925 a beaucoup d'énergie dans le «bas-aigu» et il est impératif que le médium «n'en rajoute» pas dans cette zone au risque d'avoir une image médiocre par des effets de mise en avant de projections sur certains instruments. Avec le T 825, le couplage était moins critique sur ce critère, car ce tweeter, de par une dispersion plus large, est moins sujet à ce défaut. D'ailleurs, il est intéressant de remarquer, suite aux expérimentations sur ces deux tweeters qui, rappelons-le, diffèrent essentiellement de par le pavillon, que la notion de puissance acoustique rayonnée au raccordement entre le médium d'une part et le tweeter d'autre part, constitue à n'en pas douter une des plus sérieuses explications à la qualité d'une association médium-tweeter. En matière de puissance acoustique rayonnée, le PM6 est un transducteur d'étude on ne peut plus intéressant. La courbe de réponse en pression qu'il présente est bien loin de l'idéal que tangente les constructeurs anglais partisans du bas rendement... Par contre, en milieu semi-réverbérant, il faut bien reconnaître que le PM6 s'avère excellent, sa courbe en puissance acoustique rayonnée est remarquable et surpasse la quasi-totalité des transducteurs de développement plus récent. Sa qualité de grande intelligibilité est très certainement corrélée à cette performance (le lecteur pourra se référer aux deux articles intitulés «Le PM6 et sa courbe de réponse» parus dans

les n^{os} 33 et 34).

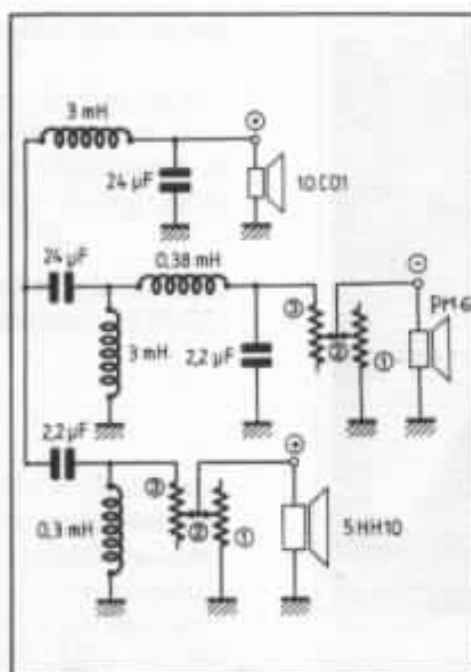
Lorsqu'on raccorde un tweeter à un médium, il faut bien être conscient que, par exemple, dans le cas d'un filtrage à 12 dB/oct. et une coupure à 7 000 Hz, le niveau restitué par le médium à 14 000 Hz n'est jamais qu'à -12 dB en dessous du niveau de référence. 12 dB, c'est pas beaucoup, pour s'en convaincre, il suffit de penser aux améliorations que l'on peut apporter en matière de bruit d'alimentation, par exemple sur une électronique, où les différences peuvent se situer en dessous de -80 dB ; pourtant, l'oreille n'est pas dupe et la différence dans certaines applications peut être surprenante. Pour le tweeter, les choses sont moins critiques car dans bien des cas, sa coupure acoustique est très marquée en dessous de 5 000 Hz et quoi qu'il en soit de par sa constitution il n'est pas apte à délivrer de fortes énergies dans la zone médium. En outre, au raccordement, chacun des transducteurs émet simultanément le signal. Et là, il y a un point très important à prendre en considération : c'est celui de l'angle solide de rayonnement à cette fréquence, ou plus simplement l'enveloppe, le volume dans lequel le signal est dispersé.

Plus on monte en fréquence et plus l'angle d'émission a tendance à se refermer dans le cas d'un médium, si bien que pour une énergie constante, laquelle rappelons-le dépend du volume dans lequel le son se répartit, sur le plan perceptif dans bien des cas il pourra apparaître une impression subjective de courbe montante. Ce désagrément est compensé sur beaucoup de médiums par leur constitution intrinsèque qui fait qu'au-delà de 4 000 Hz la plupart des médiums s'avèrent déficients sur le plan de l'énergie. Le tweeter pour sa part, a souvent une courbe de directivité à la fréquence de raccordement beau-

coup plus ouverte que celle du médium. Au plan perceptif, il apparaît clairement dans cette zone un manque de consistance du son, d'impact, de piqué, bref de réalisme, même si le résultat de l'ensemble peut paraître agréable voire enjolivé.

Ce long préambule était nécessaire à notre sens pour que vous compreniez mieux les écueils importants qui peuvent exister dans le choix d'une association médium-tweeter. Bien évidemment, vous pouvez penser que si, comme nous l'avancions, le critère de puissance acoustique rayonnée constitue un gage très sérieux de réussite, pourquoi les constructeurs n'œuvrent-ils pas dans cette voie ? Deux raisons, très simples à notre sens, expliquent cela. Tout d'abord, l'instrumentation nécessaire à l'analyse de la puissance acoustique rayonnée est extrêmement lourde et onéreuse, sans commune mesure avec celle nécessaire aux mesures de réponse en pression. Ensuite, cette prise de conscience et cette analyse de l'incidence de ce paramètre sur le résultat subjectif ne sont pas encore très répandues, il faut bien le reconnaître...

Il est certain que l'expérience que nous avons pu accumulée en la matière en travaillant pendant plusieurs années sur le PM6 et en essayant un nombre très conséquent de tweeters, nous a permis de recueillir une quantité d'informations ayant servi à notre réflexion. L'arrivée du 5HH10 a pour nous été une révélation. Car outre ses qualités intrinsèques très honorables, c'est surtout l'association au PM6 qui est exceptionnelle. Coup de chance ! Certainement... Toujours est-il que le résultat est là. Depuis janvier et le n° 34, nous avons, comme nous vous le disions, creuser la question et fait de nombreuses autres expériences. Il faut reconnaître après coup que l'associa-



Filtre passif retenu pour l'association Mini-Onken-Lowther PM6-tweeter Technics 5HH10.

tion de ces deux transducteurs PM6 et 5HH10 «transcende» littéralement à la fois le médium et l'aigu. Le tweeter utilisé dans d'autres configurations avec des médiums plus performants s'est avéré un peu triste ! Et combien d'amateurs ont fait la triste expérience du PM6 avec certains tweeters procurant un médium dur et projeté.

Nous vous donnons le schéma du filtre que nous avons retenu après divers essais. Est-ce un hasard ? Mais nous sommes arrivés à une solution 12 dB/oct. avec des valeurs très proches du filtre Onken trois voies passif... Les fréquences de coupure sont 600-6 000 Hz. Le potentiomètre à impédance constante sur la voie médium n'est pas indispensable, toutefois suivant la réverbération du local d'écoute, il peut être intéressant d'avoir la possibilité de ce réglage pour parfaire l'équilibre tonal quitte à passer par la suite à un atténuateur réalisé à partir de résistances bobinées de puissance fixes.

Nous vous avons dit énormément de bien de ce système sans

toutefois détailler les qualités qui nous ont enthousiasmés. Sans vouloir découper le spectre en tranches c'est souvent une vue de l'esprit bien trompeuse, la première chose à noter est la texture du grave qui est très différente de celle que l'on peut obtenir avec le même caisson mais avec d'autres solutions médium-aigu. Dans le cas présent, le grave sans toutefois atteindre les performances d'un gros Onken, il ne faut pas rêver, est bien défini, correctement timbré, nuancé et dans certains cas même, léger. Cela prouve, une fois de plus, que la qualité de restitution d'un son, passe en premier lieu au plan perceptif par la qualité de restitution des harmoniques... Le médium a les qualités d'intelligibilité, de définition, d'expression, que procure le Lowther avec toutefois, un gain important par rapport aux systèmes précédents en matière d'ouverture et de profondeur. A préciser également que la petite pointe du PM6, souvent agaçante sur les voix, semble disparaître ici. L'aigu est très beau, filé, précis et doux en même temps, l'impact dans le haut-médium et le «bas-aigu» est excellent, franc et sans bavure, sans aucune projection. Outre les qualités propres à chacune du partie du spectre, c'est avant tout l'homogénéité de l'ensemble qui constitue le point fort de ce système avec une restitution de l'ambiance et un «feeling» musical vraiment très séduisants.

Nous sommes vraiment très heureux d'être en mesure de vous proposer un tel système car le degré de performances atteint en regard du coût de réalisation (de l'ordre de 3 000 F en kit) est extraordinaire. A préciser enfin qu'il est possible d'utiliser la version PM6 Alnico plus onéreuse, il est vrai, que la version ferrite classique, mais honnêtement la différence de dépense en vaut réellement la peine.