

# L'AUDIOPHILE



3<sup>e</sup> Année

N<sup>o</sup> 14 Février 1980 30 F.

**Page non  
disponible**

# Réalisation d'un amplificateur à tubes de 10 W

## Simple étage, montage ultra-linéaire

Jean Hiraga

*Nombreux de nos lecteurs sont intéressés par la réalisation d'amplificateurs à tubes. L'amplificateur 300 B a soulevé un vif intérêt, malheureusement les composants sont difficilement trouvable à l'heure actuelle en France. Voici donc une réalisation utilisant le tube KT 88 en montage ultra-linéaire qui pourra être aisément construite.*

Les amplificateurs à tubes à utilisation haute fidélité ont presque entièrement disparu du marché international.

Heureusement quelques rares appareils sont encore disponibles, à un prix souvent élevé.

Le Japon représente une exception en matière d'amplificateurs à tubes issus que réalisations artisanales ou de petite série utilisant des tubes triodes spéciaux. Les jeunes européens amateurs de Hi-Fi ne connaissent, pour la grande majorité d'entre eux, que des tubes de puissance pentode ou tétrode du genre EL 84, EL 34, KT 66, les jeunes japonais connaissent

quant à eux, pratiquement tous les vieux tubes triodes de qualité venant des USA et d'Europe : pour les USA les séries de petite puissance 45, 50, 2A3, 6B4G, 6A3, 12A, VT 52, 10, WE 275A, WE 252A, puis, pour les puissances moyennes et assez élevées les 211, 845, WE 300B, WE 242C, WE 945. Si, pour quelques tubes allemands et anglais seuls quelques initiés et anciens de la basse fréquence connaissent les RE 604 (Telefunken) PX 4, PX 25, DA 30, DA 60, PP3/250, PP4/400 (Grande Bretagne), beaucoup moins encore connaissent les meilleurs tubes triodes d'origine française tels

que les TM 100 (Société Française Radio-Electrique) de dissipation plaque 100 watt, les R0 4408, AT 20, E 105B, (Visseaux SFR, Belvu, Vatea, LMT etc). Tubes bien sûr hors production depuis parfois plus de 20 ans, mais que l'on peut encore trouver en parfait état de fonctionnement.

Alors que durant les années 1930 à 1940 ces vieux tubes étaient utilisés sur tous les amplificateurs B.F. il est certain que les transformateurs de sortie de l'époque, les haut-parleurs, ne donnaient qu'une petite partie des possibilités de ces tubes.

Après la guerre, on est passé

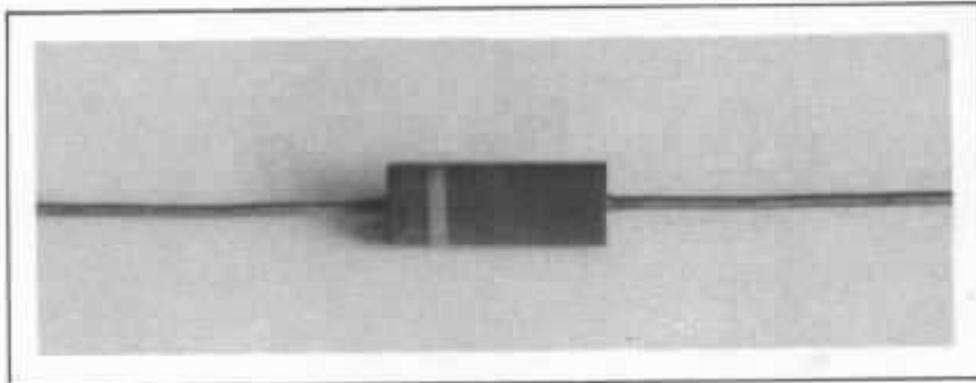
progressivement, en B.F., aux tubes noval, tubes pentodes et tétrodes. Et puis avec les débuts de la stéréophonie, des premiers amplificateurs « Haute-Fidélité » les vieux tubes triodes ont disparu très rapidement de réalisations. Il n'y a guère qu'au Japon que l'on a redécouvert ces tubes aux performances remarquables.

Mais vu le succès étonnant qu'ont remporté ces tubes, dont la durée de vie était en moyenne de 2 000 à 3 000 heures et compte-tenu le nombre d'amateurs dépassant au moins 50 000, les stocks de vieux tubes triodes

## Le tube KT 88

Ce tube d'origine anglaise, fabriqué par la GEC est le plus puissant des séries « KT » : commençant par la KT 8, lui-même dérivé de la PX 25 nouvelle version (triode, mais avec une grille supresseuse supplémentaire) KT 33, KT 55, KT 66 (toujours fabriqué et très connu) KT 77 (en quelque sorte une « super » EL 34) et finissant par cette KT 88.

Destiné à la basse fréquence, aux sorties ligne de téléviseurs aux alimentations régulées série, sa dissipation plaque est donnée



Résistance à couche de carbone Allen Bradley

ont bien vite fait de s'épuiser définitivement. A part le fameux 300B qui est encore fabriqué par la Western Electric et quelques autres tubes américains encore trouvables, comme les VT 52, les 211, 845, 6B4G les meilleurs d'entre eux ont à la fois disparu et atteint des prix d'or.

Dans cet article, il ne serait donc pas question de parler de tubes triodes de qualité exceptionnelle pour en faire une réalisation inaccessible. Il va être question tout simplement d'un tube de puissance très courant, le KT 88, qui, malgré des défauts certains va être ici utilisé dans un circuit simple mais performant. Son plus gros avantage : puissant, de prix d'achat abordable, et facile à se procurer.

pour 42 W. En réalité cette dissipation plaque maximum n'est que de l'ordre de 35 W et même beaucoup moins sur les séries « économiques » fabriquées entre 1973 et 1978.

Certaines de ces séries « économiques » sur lesquelles le nickel, de prix élevé, était utilisé en plus faible épaisseur pour les écrans et les plaques avaient pour grave conséquence de rendre celles-ci inutilisables sur des amplificateurs où ces tubes étaient utilisés « à fond », cas du Mc Intosh MC 275 dont le circuit original permettait d'obtenir 75 W sans distorsion ceci entre 20 et 20 000 Hz.

Aux USA il existait autrefois une filiale de la G.E.C. baptisée la British Industries qui, à une

époque donnée vendait ces tubes KT 88 sous la marque « Gold Lion », tubes dont le gros avantage résidait en des tolérances très sévères, un appairage parfait et des courbes individuelles pour chaque tube. Après 1970, la British Industries cessa son activité mais les tubes KT 88 « Gold Lion » obtenant toujours un succès mérité auprès de ses acheteurs (Mc Intosh, Citation etc), un grossiste américain eut l'idée de lancer une série « Gold Monarch » qui n'était en fait qu'un simple bon appairage de tubes GEC courants. Ceci explique la raison pour laquelle de nombreux constructeurs américains d'amplificateurs de haut de gamme sont passés au tube équivalent 6550 (équivalent de la KT 88, mais de construction interne légèrement différente, et fabriqué par la RCA, Tung-Sol, GE. et Sylvania). Depuis, la baisse du dollar n'arrangeant pas les choses pour la GEC, la diminution dans les ventes avait été telle, entre 1975 et 1977 par exemple, que cette firme, se trouvait en 1978 avec une production qui était très loin, pour les KT 88, des 800 000 tubes produits par an, vers 1970. Heureusement, depuis environ Mars 1979, la G.E.C. vient de repropuler la série « Gold Lion », la vraie, qui devrait donc donner pleine satisfaction du point de vue respect des caractéristiques maximales, tolérances etc. De chauffage 6,3 V (1,6A), de brochage octal américain, il possède des caractéristiques maximum très intéressantes : courant de cathode maximum de 230 mA, tension plaque de 800 V tension écran de 600 V, température du bulbe de 250° C.

Inutile de dire que ces caractéristiques sont maximales et que

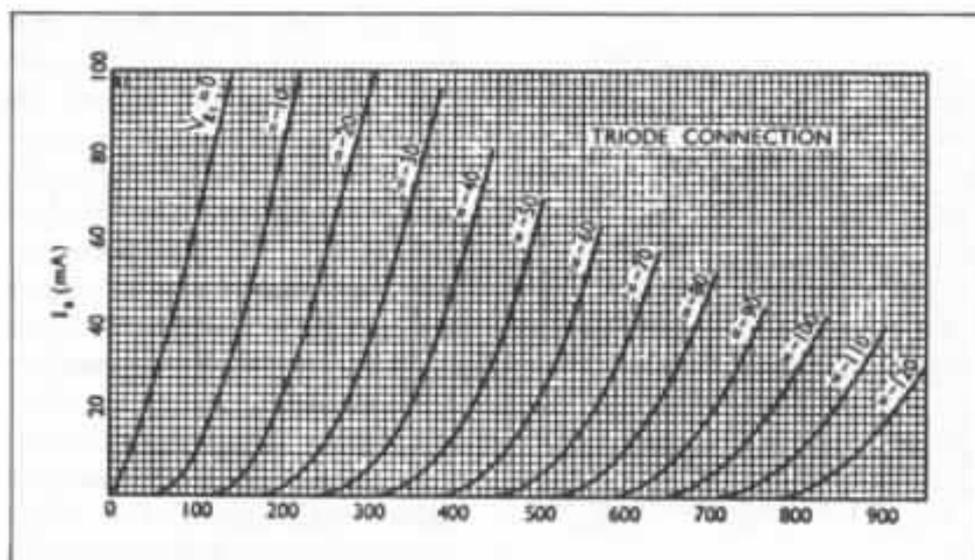


Fig 1 : La KT 66 montée en pseudo-triode. Caractéristique  $I_p/U_p$ .

dans telles conditions la durée de vie du tube serait bien courte.

Dans la très grande majorité des circuits, ce tube est utilisé en push-pull ultra linéaire. De très nombreux circuits commerciaux ont été proposés dans tous les pays. Bien que ce tube soit intéressant pour tirer entre 50 et 100 W à l'aide d'un circuit simple, nous allons utiliser ici ce tube KT 88 en sortie simple étage et en montage ultra linéaire.

### Montage ultra linéaire

Il y a, dans la conception de ce montage, plusieurs considérations à faire simultanément : montage simple, si possible non push-pull, puissance de sortie de 8 à 10 watts, taux de distorsion bas et spectre de distorsion aussi propre que possible. Ajoutons aussi un autre élément essentiel qui est le prix de revient du tube et sa facilité d'achat.

C'est ainsi que par exemple, un tube un peu moins puissant mais bien plus intéressant du point de vue linéarité des courbes, tant en pentode qu'en pseudo-triode aurait pu être utilisé : le KT 66. Sur la figure 1 on remarque l'excellente linéarité d'un montage pseudo-triode

(bien que l'on soit encore très loin de ce que donne un bon tube triode à chauffage direct). Cependant on s'aperçoit que ce montage pseudo-triode lié à une dissipation plaque de 25 watts, forçant le courant d'écran ne permet finalement que de tirer 5 à 6 watts sans trop de distorsion (7 % pour le tube pris seul, sans contre réaction).

La figure 2 montre ce même tube KT 66, mais monté cette fois en pentode, ce qui donne cette fois une puissance de sortie d'environ 9 à 10 watts. Noter que les caractéristiques  $I_p/U_p$  changent très sensiblement en fonction de la tension d'écran.

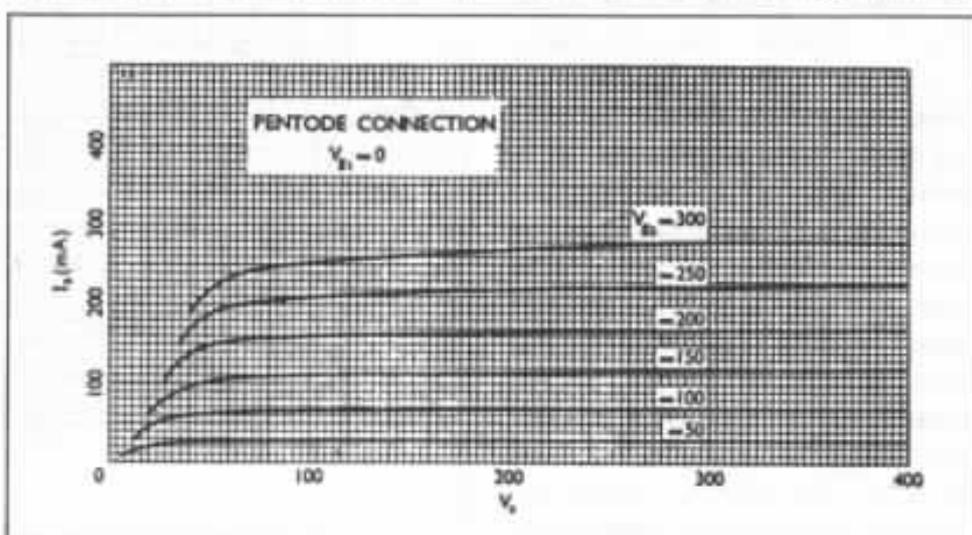


Fig 2 : La KT 66, en montage pentode. Caractéristique  $I_p/U_p$  pour  $U_{g2} = 300$  V.

Bien que ce tube soit assez linéaire le taux de distorsion voisine 11 % ce qui commence à devenir important.

En passant au tube KT 88, le compromis taux de distorsion/puissance est nettement amélioré, malgré des caractéristiques beaucoup moins bonnes. La figure 3 montre la KT 88 montée en pseudo-triode ce qui donne des caractéristiques cette fois tassées et arrondies, et qui entraîne une augmentation le taux de distorsion (en particulier l'harmonique 3). On obtient ainsi environ 8 watts, un peu plus en forçant le tube, en montage pseudo-triode. En montage tétrode, la puissance passe à 12/13 watts ce qui est déjà très bien pour un montage mono-tube. Cependant le taux de distorsion sera élevé, ce qui est évident si l'on regarde les caractéristiques de la figure 4. Plutôt que de passer au montage push-pull, qui arrange malgré tout bien des choses et qui permet de passer facilement à 50 watts en puissance, un montage mono lampe de puissance 10 watts environ a été choisi, en prenant par contre toutes les précautions concernant les composants, l'alimentation, tels que celles écrites dans les numéros

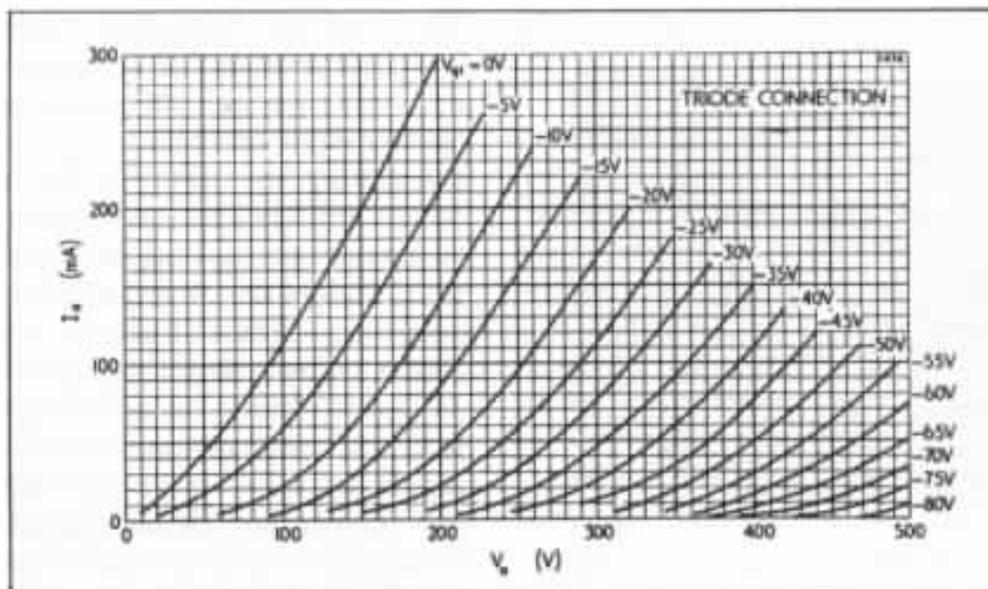


Fig 3 : La KT 88 montée en pseudo-triode. Caractéristique  $I_p/U_p$ .

précédents (montage 300 B, VT 52 etc). La raison : la recherche, pour la puissance donnée d'une qualité sonore proche des meilleures triodes souvent inaccessibles.

C'est pourquoi le montage ultra-linéaire a été finalement retenu. Suivant l'endroit où va se trouver la prise d'écran sur la charge on passe ainsi de la courbe de la figure 3 à celle de la figure 4.

Sur la figure 5 on obtient ainsi, pour une prise d'écran à 40 % une caractéristique dite « ultra linéaire », que l'on peut diviser en trois parties : une partie étant pratiquement celle d'une pentode (ou tétrode), c'est-à-dire celle où la polarisation de grille est proche de 0 V. La seconde partie est celle où le tube travaille près du « cut-off », avec grille profondément polarisée et qui donne une caractéristique proche d'une pseudo-triode et enfin une partie « ultra-linéaire » c'est-à-dire dans le cas de la figure 5 les parties comprises entre -15 V et -35 V.

Partie qui devrait, théoriquement, comme l'indique son nom « ultra-linéaire », être faite de

caractéristiques  $I_p/U_p$  équidistantes et parallèles. On peut, malgré tout trouver un point de fonctionnement intéressant, ceci après de nombreux essais, écoutes et mesures consécutives.

Du point de vue tension plaque et bien que le tube puisse travailler sans trop de danger jusqu'à 500 Volts, il a été choisi ici une tension plaque assez basse

soit 300 Volts (point de repos) et une polarisation de -37,5 V, ceci pour une courant plaque de 100 mA.

La charge primaire, après plusieurs essais a été fixée à 2500 Ohms. Normalement, on prend une charge plus élevée soit 3 à 4 kOhms. Comme c'était le cas pour la 300 B, le choix de 2,5 kOhms vient non pas d'une adaptation d'impédance maximum vis-à-vis de la puissance de sortie, mais plutôt d'un choix basé sur les possibilités et limites de qualité des transformateurs (pour une question de bobinage et de limites pratiques) et de taux de distorsion. Trop souvent, la qualité baisse au fur et à mesure que l'impédance augmente, ce qui fait que pour les tubes 211 ou 845 par exemple, l'impédance primaire optimum de 10 kOhms ne vaut pas, en pratique, les résultats obtenus avec un primaire de seulement 3 à 4 kOhms.

Il faut aussi penser que dans le transformateur de sortie simple

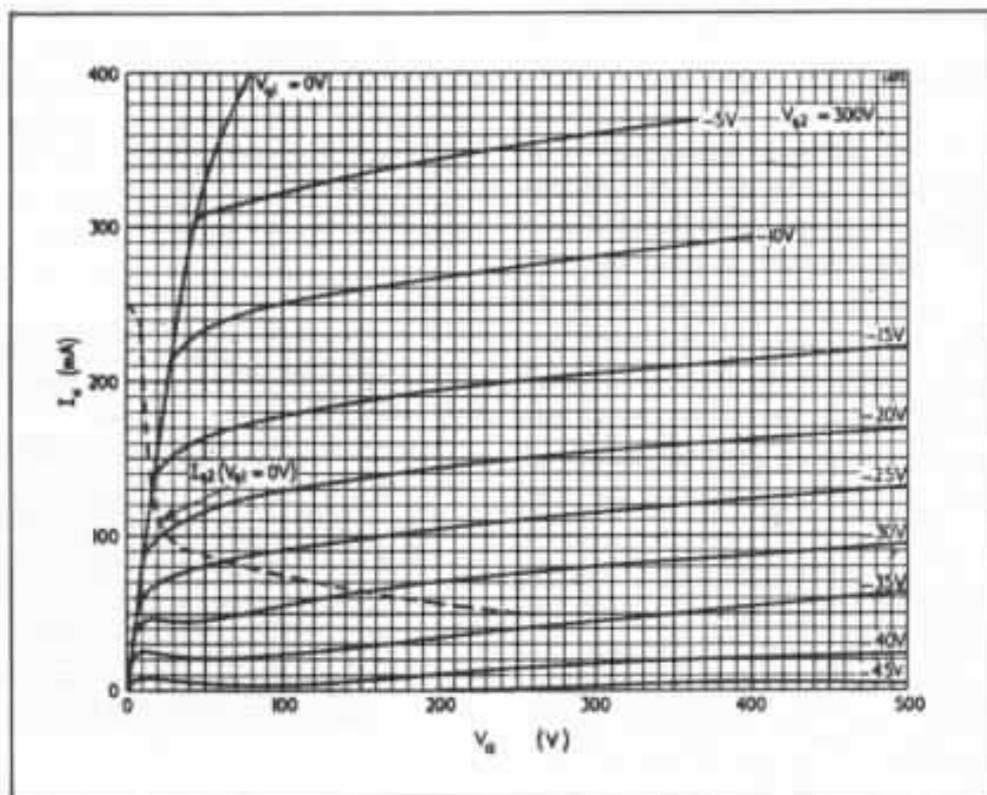


Fig 4 : La KT 88. Montée en tétrode. Caractéristique  $I_p/U_p$  pour  $U_{g2} = 300 V$ .

étage, le courant continu passant dans les tôles exige l'emploi d'un entrefer qui réduit toujours de beaucoup l'inductance et défavorise la régularité de réponse en phase et en linéarité aux fréquences élevées.

Le tube KT 88 ainsi monté en ultra-linéaire, prise à 40 %, polarisé à -37,5 V et dont le courant de repos est de 100 mA (plaque) +4 mA (écran) est auto polarisé. Ceci donne pour la résistance de polarisation une valeur moyenne de 360 Ohms.

Cependant, vu les tolérances des tubes, il est possible que pour cette valeur de 360 Ohms, la polarisation varie quelque peu soit + ou - à 1,5 V. Vu que le tube travaille au-dessous de ses possibilités maximum il n'y aurait donc pas de réglage ultérieur de polarisation à refaire.

D'autre part, le tube KT 88 étant à chauffage indirect il n'y a pas non plus de réglage de bruit de fond à l'aide de rhéostat, cas des tubes 2A3, VT 52 ou 300 B par exemple, ces derniers étant à chauffage direct.

Ce tube KT 88 possède donc sa résistance de polarisation de 360 Ohms, qui doit être si possible de fort wattage, malgré la dissipation calculée faible (soit un peu moins de 5 W), et il est conseillé de prendre une valeur de 40 à 50 W pour réduire l'échauffement. La raison est qu'à proximité de cette résistance (du genre Sfernice RH 50) va se trouver le condensateur de découplage (ou plutôt l'ensemble de condensateurs) qu'il est préférable de ne pas trop chauffer.

Le découplage est fait par un électrochimique de 100 $\mu$ F 160 V sur lequel se trouve un autre condensateur, au mylar de valeur 6,8 $\mu$ F 200 V, du genre Shizuki.

Cette combinaison permet une amélioration de la courbe d'impédance aux fréquences supérieures à 10 kHz, pour lesquelles l'électrochimique seul, à cause de son effet selfique et de sa résistance série fait sensiblement remonter la courbe d'impédance. L'ensemble électrochimique + mylar régularise au mieux cette courbe.

Vu que pour un bon découplage, jusqu'aux fréquences basses il faut au moins 50 $\mu$ F dans le cas présent, certains seraient

ditionnel circuit SRPP. est utilisé, car il permet d'attaquer à basse impédance le tube KT 88. Son gain, avec le tube ECC83 (et équivalent E 83CC, ECC803S, 12AX7XA etc) est de 63, soit donc 36 dB.

La polarisation est de 1,2 V. Ce circuit n'est pas relié directement à la grille du tube KT 88. En effet malgré les avantages du couplage direct, il existe un défaut inhérent au montage SRPP, qui est une dérive en continu ainsi qu'une légère dissymé-

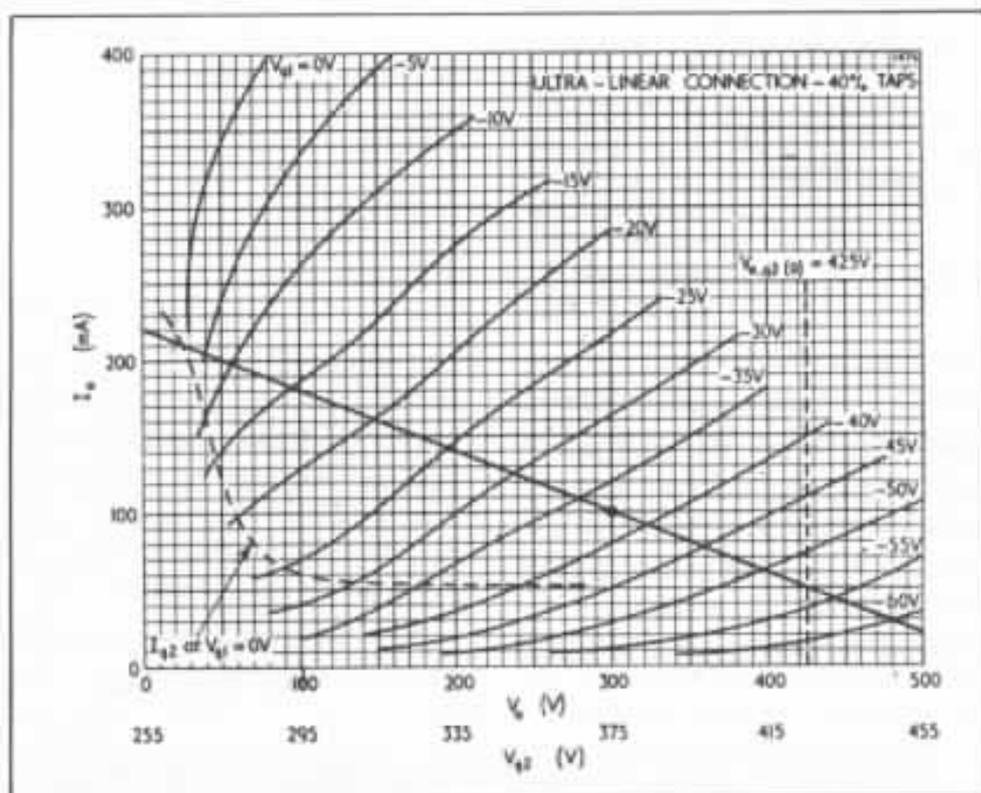


Fig 5 : La KT 88. Montage ultra-linéaire, prise écran à 40 %.

tés d'utiliser des condensateurs de très haute qualité, comme ceux au tantale, série bipolaire ; ceci est possible mais est très onéreux car il est difficile de trouver dans le commerce et dans les composants spéciaux, des valeurs dépassant 10 $\mu$ F pour un isolement d'au moins 100 V.

### Etage d'attaque

Pour l'étage d'attaque, le tra-

trie en sortie (distorsion de linéarité). Ici ces deux défauts vont être palliés tant bien que mal, en évitant le couplage direct et en choisissant un mariage ECC83 en SRPP/KT 88 en montage ultra-linéaire améliorant au mieux les caractéristiques de distorsion : il faut non seulement les réduire mais aussi conserver un spectre de distorsion propre, ceci à différents niveaux de sortie. Tout ceci, qui paraît simple est pourtant la clef de la réussite

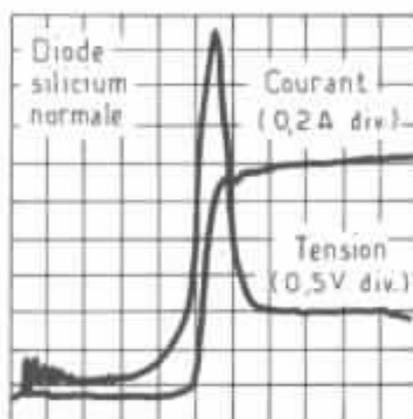
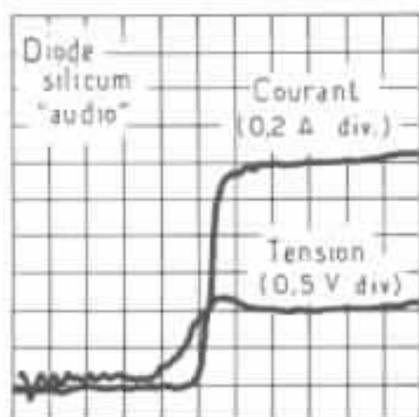


Fig 6 : Caractéristique courant-tension de diodes silicium normale en haut et audio en bas.

des bons amplificateurs : le spectre de distorsion, stable dynamiquement et régulier en distribution spectrale n'affecte que très peu l'enveloppe du spectre musical et permet ainsi de conserver les timbres musicaux. C'est pourquoi la recherche du taux de distorsion minimal dans un cir-

cuit doit toujours tenir compte de ces questions, ceci pour ne pas retomber dans le cas de l'amplificateur au taux de distorsion « immesurable » et pourtant très pauvre en écoute sur programme musical.

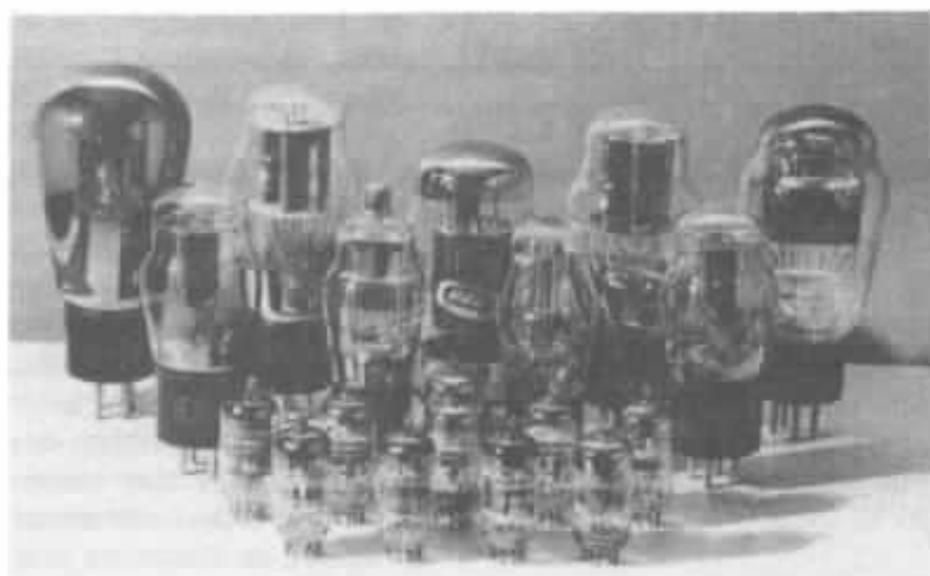
Pour les harmoniques de rang plus élevé, les composants vont

cette fois jouer sur leurs niveaux respectifs, de même que le type de redresseur utilisé : redresseur à vide, à diodes au silicium, régulation par dérivation parallèle d'un courant important, régulation par diode zener. Pour tout cela il est très aisé de démontrer par une écoute ou une mesure sur analyseur de spectre les défauts qu'apportent un redressement par diodes au silicium ou une régulation par diode zener, soit le plus souvent un son dur ou une dureté quelque part dans le haut du spectre. Ce n'est que très récemment que l'on s'est aperçu de ces problèmes dans le domaine des amplificateurs et préamplificateurs de haute qualité. C'est ainsi que sont apparues sur le marché japonais quelques diodes au silicium « spécial audio » ne présentant presque plus les défauts de « pics » affectant de beaucoup la qualité de reproduction sonore (voir fig 6). Ceci est d'autant plus grave, que même après passage par une alimentation régulée ces défauts restent nets et sensibles à l'écoute.

### Redressement.

Il n'est pas fait usage ici de diode au silicium pour les raisons citées ci-dessus et le choix a été fixé sur le tube 5U4 G, tube américain en support octal, redressement à chauffage direct.

Remarquer que le filament 5 V, 3 A du tube 5U4 G, qui est aussi la cathode, est normalement relié d'un côté au circuit haute tension. Ici il passe par un rhéostat (on peut aussi prendre un point milieu sur le transformateur si le chauffage est fait de deux circuits 2,5 V en série) dont le point milieu est relié à la self de filtrage. La raison est qu'après filtrage, le résidu alter-



Echantillonnage des tubes

natif devient plus symétrique et régulier par ce moyen. Normalement le résidu alternatif se compose, vu que le filament n'est relié que d'un côté à la haute tension, d'un composé dissymétrique. Vu du point milieu du rhéostat on obtient un résidu bien sinusoïdal.

Quant au choix du tube 5U4 G, il a été fait uniquement pour une raison de qualité subjective, vu qu'il est encore possible de se procurer de très nombreuses redresseuses à vide biplaques à chauffage direct et indirect.

### Puissance de sortie

On obtient avec ce circuit simple et ne demandant aucun réglage, une puissance de 10 watts avec un taux de distor-

qui est calculé pour annuler une partie de la distorsion ainsi que du taux de contre réaction de 7 dB.

### Transformateur de sortie

Les caractéristiques du transformateur de sortie sont :

Primaire 2,5 kOhms, résistance en continu environ 50 Ohms

Prise écran à 40 %.

Courant max. 150 mA.

Secondaire 4,8, 16 Ohms.

Inductance primaire : Plus de 20 H si possible.

Puissance admissible à 40 Hz 50 watts.

Bande passante à 1 W. : 5 — 100 000 Hz à 1 dB près.

Pour le montage décrit ici, il a été utilisé un transformateur de marque japonaise, de référence

sant la boucle de contre réaction de 7 dB et le transformateur U 808 est linéaire à + et - 0,2 dB près, entre 10 Hz et 50 kHz. Ceci est normalement très difficile à obtenir avec un tel taux de contre réaction et avec un schéma aussi simple. Un étage d'attaque normal limite en effet la bande passante, (sans contre réaction) à 12 ou 15 kHz. Le montage SRPP utilisé ici est donc très avantageux, en particulier parce que la polarisation de la KT88 n'est pas très profonde et que ce circuit d'attaque peut délivrer bien plus sans problème.

Dans le montage décrit, la sensibilité est de 1 V pour 10 W. Sans contre réaction, la sensibilité passe à 0,55 V, mais le taux de distorsion à 10 W monte à 3 % environ.

### Facteur d'amortissement

Celui-ci est particulièrement linéaire en fonction de la fréquence et se situe, pour le montage prescrit à 6.

### Courbe de réponse en phase

Cette réponse en phase dépend beaucoup du type de transformateur utilisé. Le problème à voir ici n'est pas tellement la rotation de phase aux fréquences élevées, mais plutôt la stabilité de la phase dans cette région, pour des puissances variant d'une façon transitoire entre 50 mW et 10 W. La bande passante recommandée de 100 kHz à 1 W est donc tout à fait raisonnable signifiant que la rotation de phase ne s'amorcera que vers 20 kHz, avec la première résonance au delà de 100 kHz (respectivement 100 kHz pour le modèle U 808). Ce genre de transformateur est tout à fait

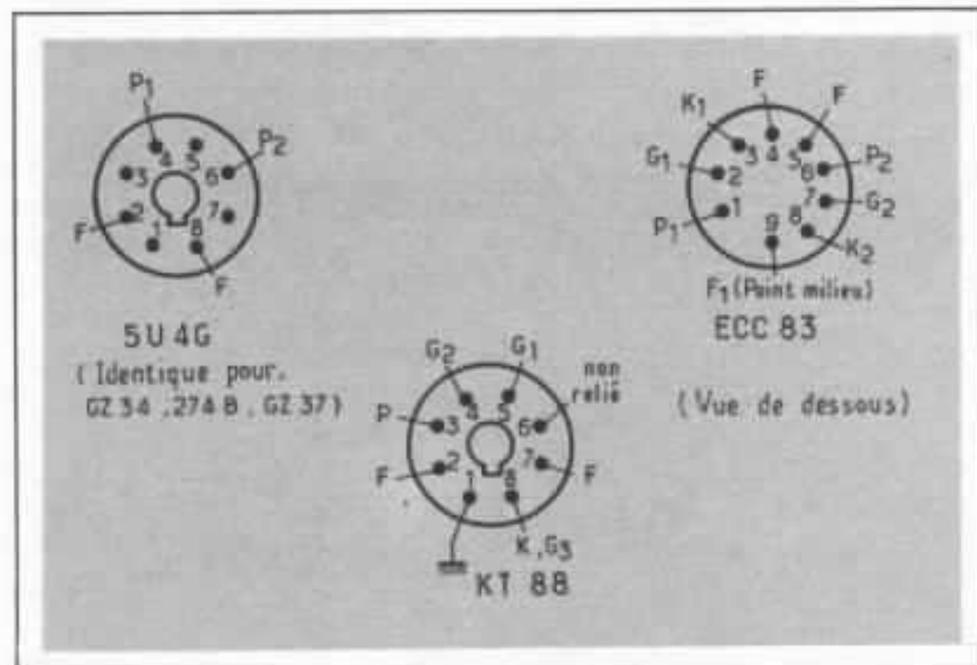


Fig. 7 : Brochages des tubes

sion de 1 % environ, ceci avec un taux de contre réaction de seulement 7 dB. Le tube KT 88 seul procure en fait, bien qu'utilisé en montage ultra-linéaire, un taux de distorsion voisin de 11 %, ceci dans les meilleures conditions. L'abaissement à 1 % vient du couplage ECC83/KT 88

U-808 Hirata. D'autres modèles plus luxueux existent, comme les Tamura (voir photo de l'amplificateur monté).

### Bande passante :

La bande passante obtenue avec le montage décrit, en utili-

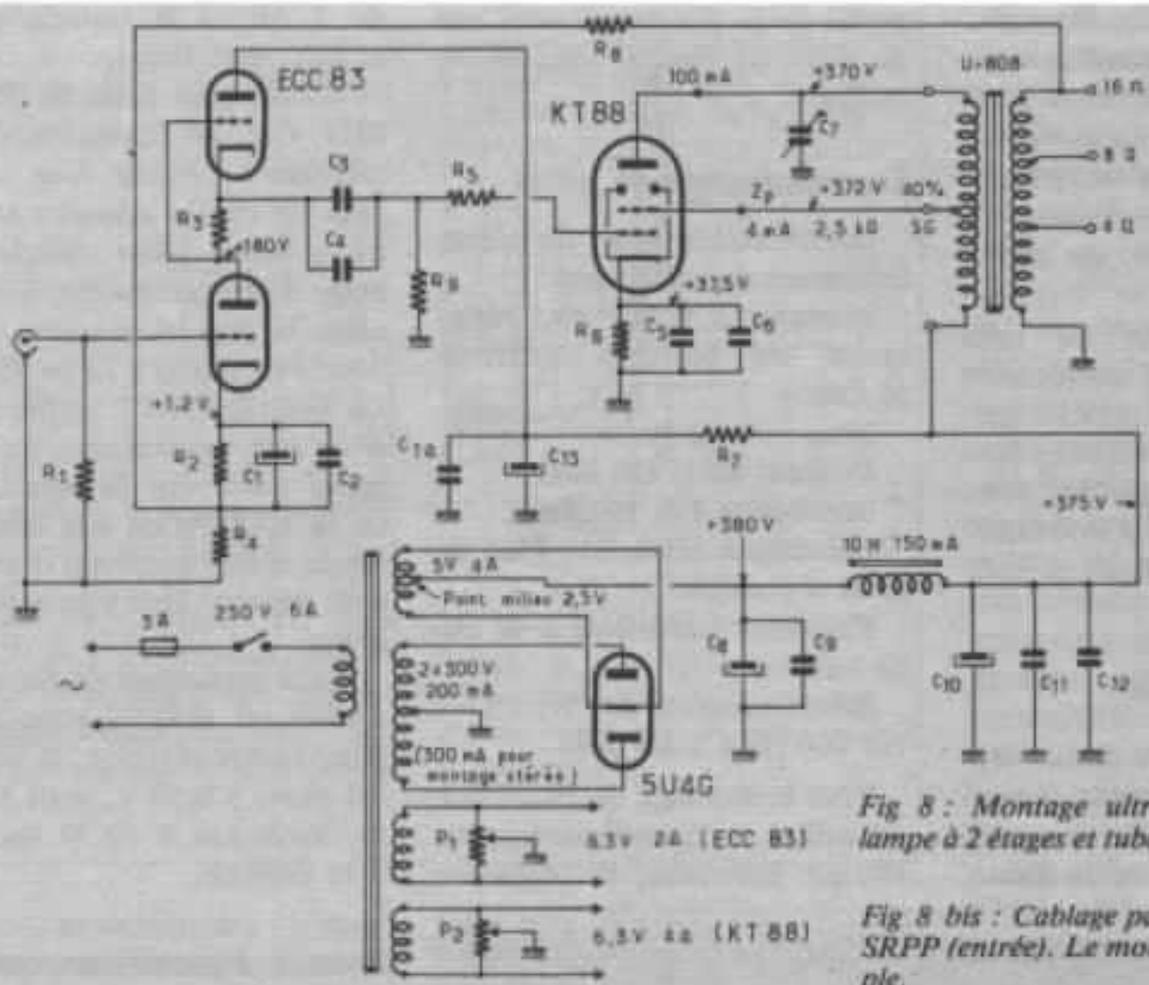
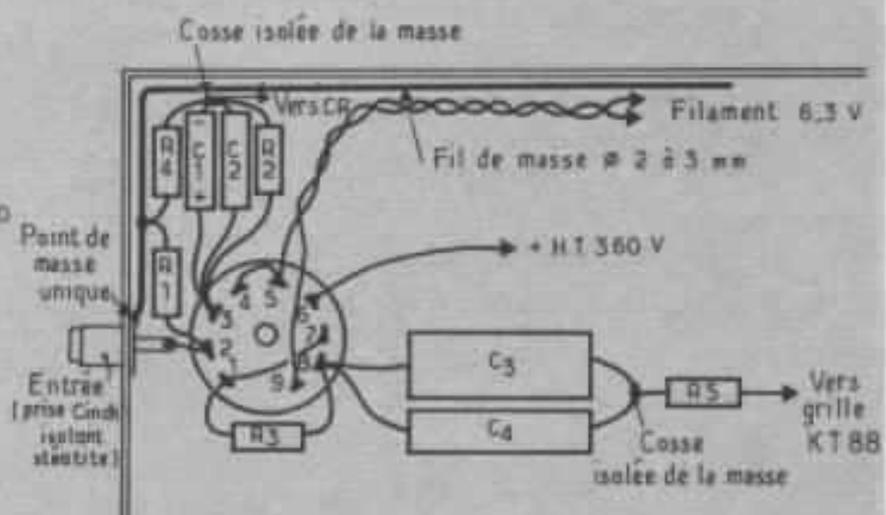


Fig 8 : Montage ultra-linéaire mono-lampe à 2 étages et tube de sortie KT 88.

Fig 8 bis : Cablage partiel de la partie SRPP (entrée). Le montage est très simple.

- R : 100 kOhms 1/2 W Allen Bradley 5 %
- R<sub>1</sub> : 1 kOhm 1 W Allen Bradley 5 %
- R<sub>2</sub> : 150 Ohms, 1 W Allen Bradley 5 %
- R<sub>4</sub> : 1 k Ohm Allen Bradley 5 %
- R<sub>5</sub> : 300 Ohms, 50 W, à radiateur, Type Stermice AH 50
- R<sub>6</sub> : 2 x 30 k en parallèle (Allen Bradley 1 W 5 %)
- R<sub>7</sub> : 1500 Ohms, Allen Bradley 1/2 W 5 %
- R<sub>8</sub> : 68 kOhms, Allen Bradley 1/2 W 5 %
- C : 100 µF 25 V, Tantale solide
- C<sub>1</sub> : 1 µF 250 V ITT PMC
- C<sub>2</sub> : ITT PMT 0,47 µF 400 V
- C<sub>3</sub> : Mica argenté 20 nF
- C<sub>4</sub> : 100 µF 160 V Electrochimique
- C<sub>5</sub> : 1 µF ITT PMC 250 V
- C<sub>6</sub> : 1 000 à 1 500 pF 500 V, mica argenté (ajuste la courbe de réponse au delà de 80 kHz)
- C<sub>7</sub> : 100 µF 500 V, électrochimique
- C<sub>10</sub> : 100 + 100 µF (en parallèle) 500 V, électrochimique
- C<sub>9</sub> : Mylar 10 µF 600 V
- C<sub>11</sub> : Mylar 10 µF 600 V
- C<sub>12</sub> : ITT PMT 0,47 µF 400 V
- C<sub>13</sub> : 47 µF 500 V, électrochimique
- C<sub>14</sub> : Mylar 3,3 µF 600 V
- P<sub>1</sub> P<sub>2</sub> rhéostat bobiné 30 Ohms à 50 Ohms 5 Watts



Transformateur d'alimentation :  
 Genre Millerieux F 3266B, (pour un ampli mono) ou J 3136B (stéréo). Dans ce cas, on peut relier ensemble les circuits filaments des KT 88 et des ECC 83. Pour le point milieu de la 5U4G, prendre un rhéostat de valeur 30 Ohms bobiné, 5 watts.

Transformateur de sortie :  
 2,5 kOhms prise écran à 40 %,  
 Puissance 50 watts à 40 Hz.  
 Secondaire 4,5 16 Ohms.  
 Inductance primaire plus de 20 H.  
 Bande passante - 10 à 100 000 Hz à 1 W, + - 1 dB.

réalisable, ne serait-ce que par des spécialistes français du transformateur BF, comme les maisons Chrétien, Millerioux, Hatte etc.

Il est de plus essentiel que ce transformateur de sortie soit largement dimensionné, soit 50 W à 40 Hz pour une utilisation ne dépassant pas 10 W, pour garantir une inductance constante quelle que soit la fréquence.

Signalons aux lecteurs qu'à cet effet le modèle commercial le plus imposant fabriqué est le Tango 150SR, capable de supporter à 30 Hz une puissance de 150 W. Il est évident qu'un tel transformateur utilisé avec un tube 300 B procure une linéarité en fréquence, phase et puissance remarquable.

### Composants passifs

Ceux-ci figurent avec le schéma. Pour les résistances et si les modèles conseillés sont difficiles à se procurer on peut utiliser les résistances à couche de carbone de marque Allen Bradley, modèle 1 W, qui sont remarquables du point de vue qualité subjective. Leur seul défaut (ici tout à fait négligeable) est un léger bruit de fond (environ - 130 dB) et une dérive thermique (ici aussi négligeable) plus importante que les résistances de type film métallique, film de tantale etc.

### Tubes ECC83, KT 88, 5U4G

Leur brochage (vu de dessous) est indiqué sur la figure 7.

### Cablage

(voir aussi fig 8)

Respecter les conditions suivantes :

Entrées proches du tube d'attaque ECC83.

Sorties éloignées des entrées.

Gros fil de masse (fil de cuivre, 2 mm environ)

Fil de cablage de diamètre 1 mm environ.

Fils torsadés pour les circuits de chauffage filament.

Utilisation de support à isolant stéatite pour les tubes.

Soudure multicore, genre Savbit ou LMP.

Composants reliés entre eux électriquement et parfaitement, ceci avant soudure (wrapping, fils entourés au moins une fois sur les cosses).

Bonnes soudures (baisser si nécessaire la température du fer à souder).

### Ecoute

L'amplificateur décrit ici est surtout destiné à ceux désireux de monter un amplificateur à tube de puissance moyenne, pour un système de haut parleur

de moyen ou haut rendement, ou pour utilisation dans le secteur médium aigu s'il s'agit d'une tri-amplification.

Bien plus économique que l'amplificateur 300 B, amplificateur assez difficile à réaliser pour son prix de revient, ses composants assez spéciaux, ses tubes rares et très onéreux (WE 274B, WE 310A, WE 300B), l'amplificateur décrit ici arrive pratiquement au même niveau en taux de distorsion. En spectre de distorsion (voir figure 9) il arrive malgré les divers « camouflages » à un résultat tout à fait honnête, vu que jusqu'à l'harmonique 7 la décroissance est régulière. Au delà, les niveaux deviennent très faibles, et se situant très près du bruit résiduel, sont pour ces harmoniques de rang plus élevé ( $H_8$ ,  $H_{10}$  ...  $H_{18}$  etc) très influencés important. Beaucoup d'amplificateurs sont souvent « déséquilibrés » subjectivement parlant,

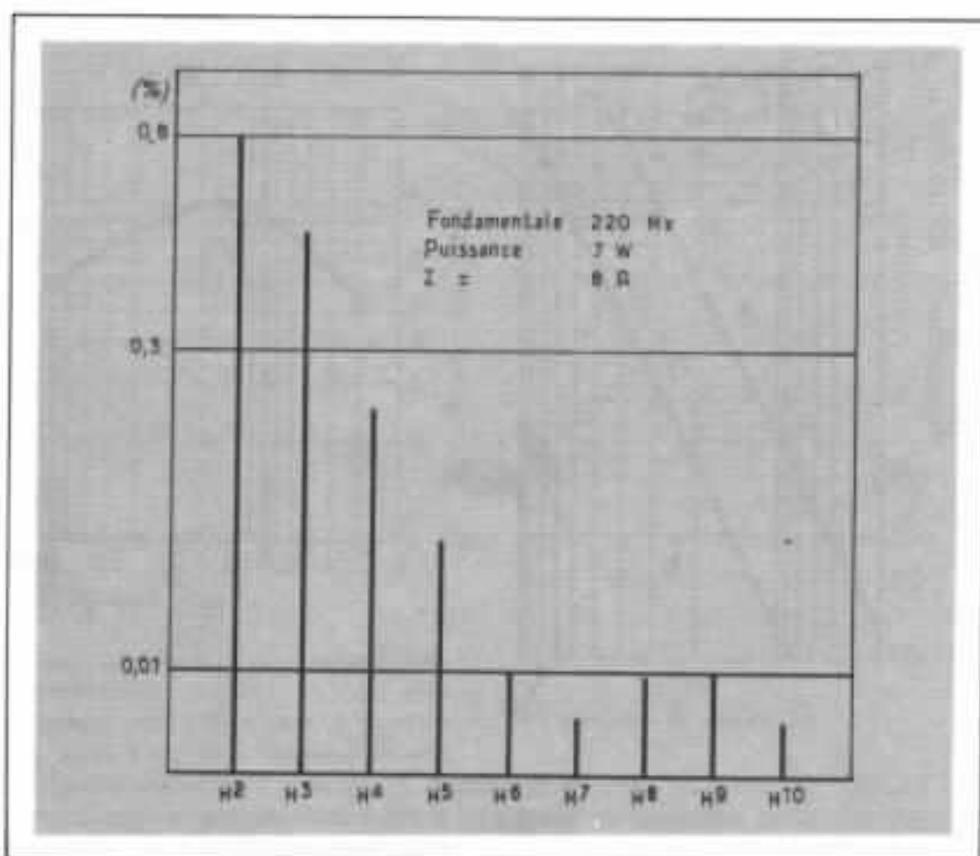
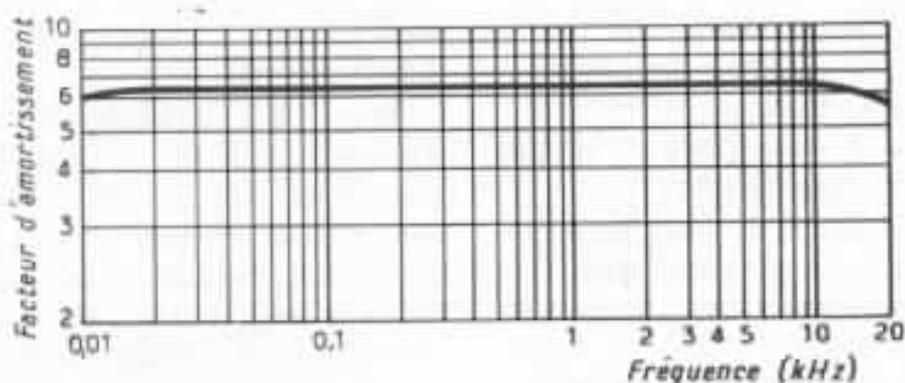
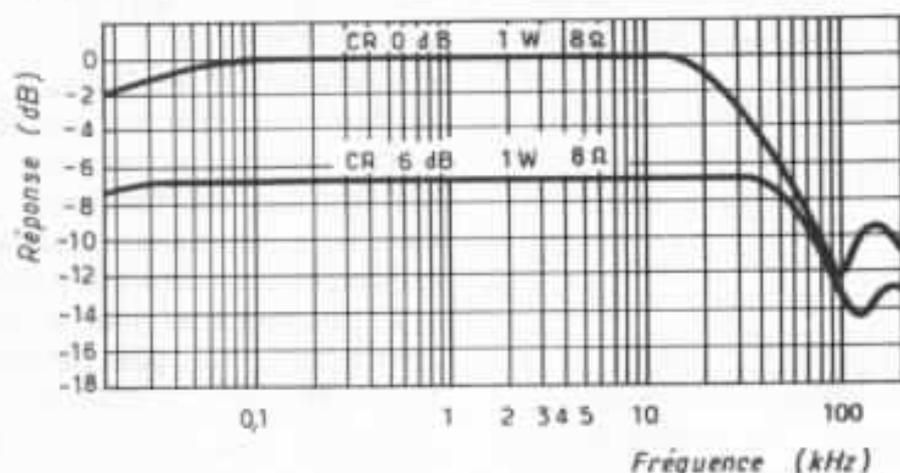


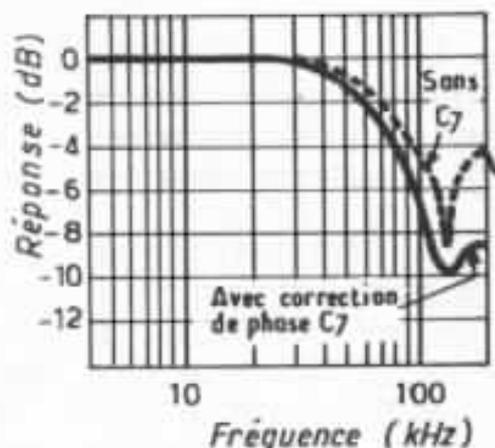
Fig 9 : Spectre de distorsion de l'amplificateur ECC 83/KT 88 (générateur Radford séries 2, analyseur Takéda TR 9305).



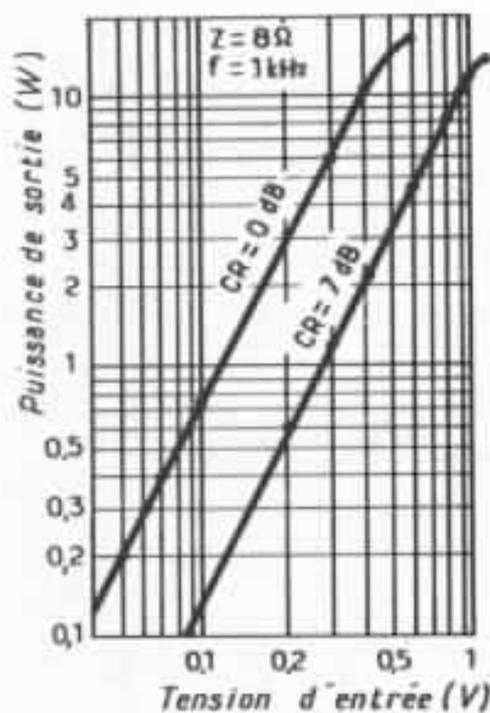
Facteur d'amortissement en fonction de la fréquence. Remarquer l'excellente linéarité de celui-ci.



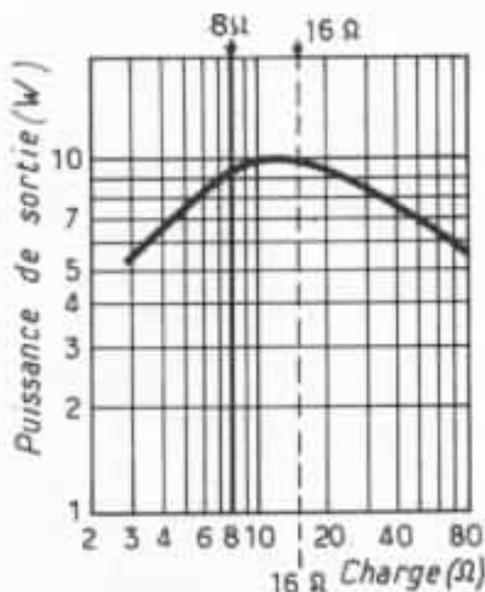
Bande passante de l'amplificateur ultra-linéaire mono-lampe avec et sans C.R.



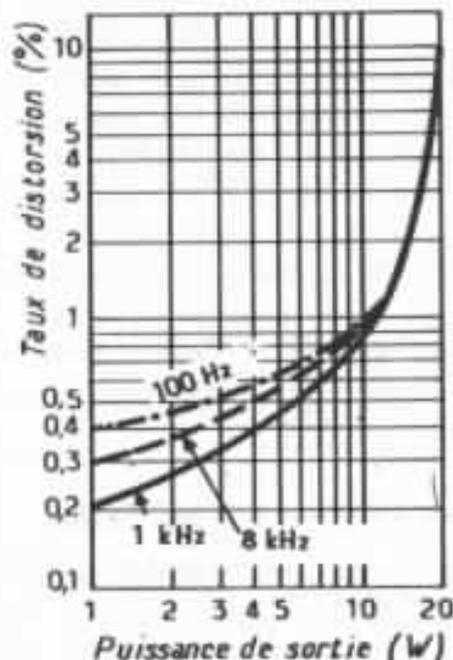
Correction de phase  $C_7$  due à la première résonance du transformateur U 808. Noter que la correction est à ajuster suivant l'origine du transformateur, vu que cette première résonance peut se situer plus haut ou plus bas.



Courbe de sensibilité d'entrée en fonction de la puissance de sortie, avec et sans C.R.



Distribution de la puissance en fonction de la charge. Remarquer qu'entre 3 Ohms et 70 Ohms, la puissance disponible reste de 8 watts à  $\pm 2$  watts près. Ce n'est pas le cas de la très grande majorité des amplificateurs transistorisés.



Taux de distorsion en fonction de la puissance. Remarquer la forme de la courbe de distorsion régulièrement montante, appelée « Soft distortion ».

c'est-à-dire trop « graves » trop « aigus » trop « médium ». Cet équilibre joue en effet lui aussi sur les timbres et la fidélité de leur re-crédation, sur la fatigue auditive lors d'une longue écoute.

Du point de vue définition, il est, comme le 300B très bien placé. Comme cela était recherché, il s'agit d'un très bon compromis performance/prix de revient, allié à une grande facilité de réalisation.

par les composants passifs et aussi par le genre de tube redresseur utilisé.

Concernant le tube 5U4G, le « son » de cette valve est particulièrement agréable, sans acidité aucune, sans dureté. Un autre tube, beaucoup plus défini dans l'aigu, beaucoup plus ferme dans le bas du spectre, le GZ 37 (à cause de son impédance

interne très basse) devient par contre plus dur dans le haut du spectre et ceci est d'autant plus sensible que l'électronique et les tweeters sont de bonne qualité.

Tel que présenté il doit donner un bon équilibre, ce qui est

Dans le grave, il est un peu moins ouvert que le 300B mais est par contre très dynamique dans toute la bande, ceci avec pratiquement aucune dureté.

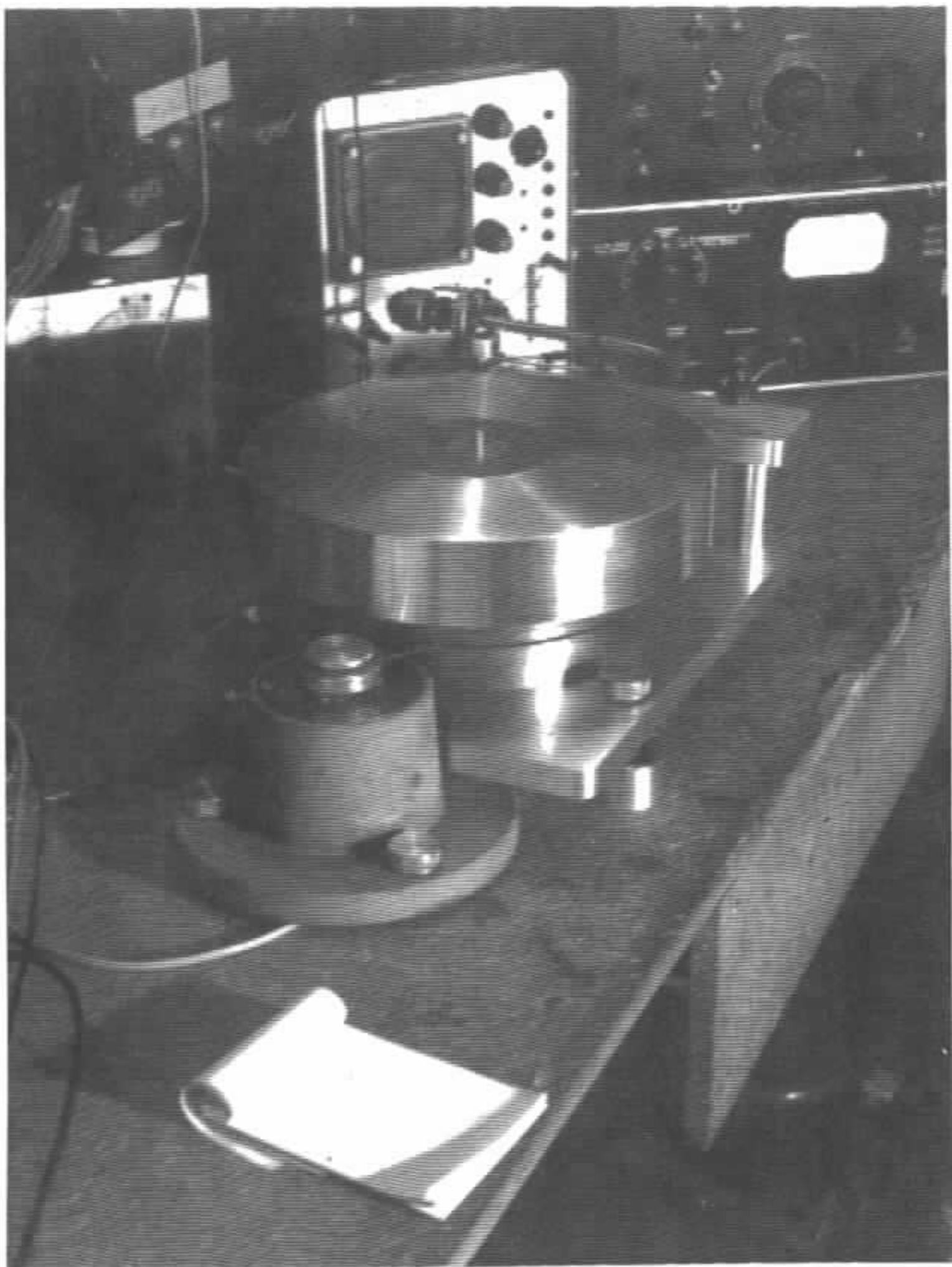
A cause de son léger taux de contre réaction, le grave est par contre ferme, sans passer au son « froid » ou « plat » de beaucoup d'appareils transistorisés.

Noter que pour ce résultat, le transformateur joue un rôle important, pouvant, si mal réalisé apporter de nombreux défauts (duretés, déséquilibre, distorsion, manque de définition etc).

Finalement et pour ceux qui connaissent très bien les tubes, il est possible de « pousser à fond » le tube KT 88 (série Gold Lion uniquement) c'est-à-dire lui faire dissiper plus de 40 W, ce qui donne une puissance de sortie de l'ordre de 18 à 19 watts. Il faut pour cela monter la valeur de la haute tension à près de 500 Volts; régler la polarisation de la KT 88 à environ — 50 V.

L'étage d'attaque est aussi alimenté à environ 480 V, ce qui augmente la tension d'attaque disponible. Le taux de distorsion reste de l'ordre de 1 % avant saturation, ce qui est donc performant pour le circuit décrit

Dans cette condition la vie du tube est écourtée, mais ce tube n'est pas du prix d'une 300B. Les frais d'un diamant de rechange pour cellule ne sont-ils pas aussi nécessaires de temps en temps ?



# Réalisation d'une platine de très haute qualité

## 2 - La fabrication

*Jean Constant Verdier*

*Dans la première partie J.C. Verdier a défini son « cahier des charges ». Dans ce numéro il aborde la réalisation dans tous ses détails. Détails qui pourront paraître rébarbatifs à certains mais qui, nous le pensons, sont nécessaires à ceux qui auraient l'envie de se lancer dans l'expérience de fabriquer leur platine.*

### Realisation

La fabrication de la maquette du tourne disque suppose bien entendu que le réalisateur ait à sa disposition un minimum d'outillage.

Un tour parallèle et une fraiseuse accompagnés de leurs accessoires est le minimum requis. Le recours à un atelier de mécanique extérieur est toujours possible mais à condition de faire passer le « message » ; en effet les plans côtés et tolérancés ne suffisent pas puisque notre but est d'obtenir la meilleure précision possible, par des procédés d'usi-

nage non industriels et relevant souvent du bricolage. Pour la fabrication des pièces tournantes, le mot d'ordre est concentricité d'abord. Nous allons voir comment il convient d'ordonner les opérations pour atteindre le but recherché.

Le plateau est constitué de 4 pièces A, B, C, D, F que l'on retrouve sur le plan d'ensemble (fig. 1). Avant d'entreprendre la pièce principale (le plateau A), il faut préparer le palier B et le circuit magnétique C en les ébauchant près de leur côte de finition, il faut par ailleurs disposer de l'axe F.

### L'axe

L'axe est composé d'un cylindre en acier (référence 100 C 6) traité et rectifié. Je conseille d'avoir recours pour cette pièce à une société spécialisée dans la réparation des roulements usagés. En effet les spécifications retenues pour les aiguilles de roulements sont les plus sévères qui soient tant pour la rectitude que pour l'état de surface après rectification qui doit présenter un minimum de rugosité (poli miroir). La tolérance sur le diamètre de l'axe n'est pas une caractéristique importante puisque nous verrons par la suite que

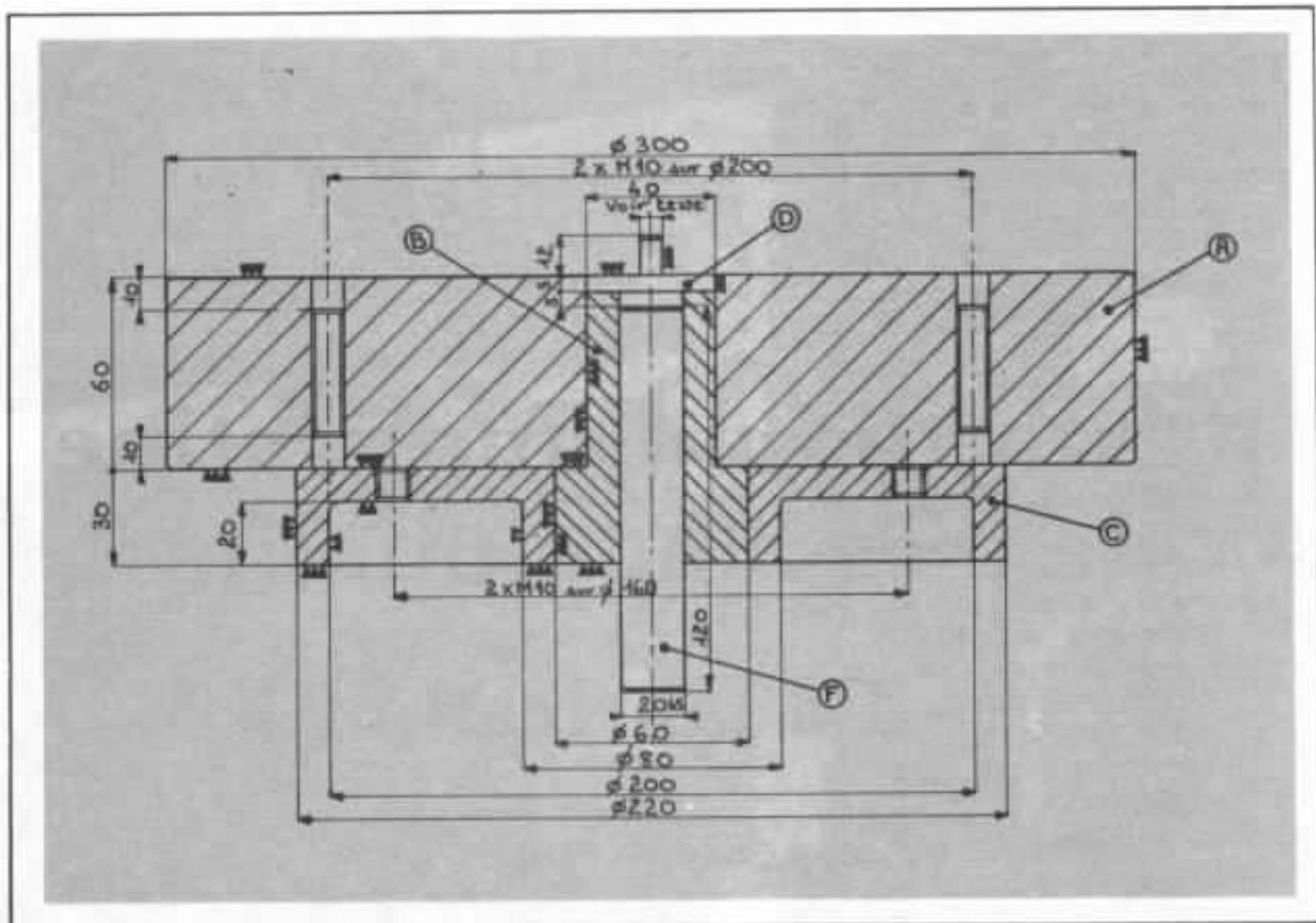


Fig 1 : Vue en coupe du plateau terminé accompagné du palier et du circuit magnétique

l'alésage du plateau sera usiné en fonction de l'axe, celui-ci étant utilisé comme calibre. Cependant, il est de bon ton de préciser  $h5 (+ 0 - 9$  micro mètre dans le cas de notre axe de 20 mm) c'est ce que la norme ISO offre de plus raffiné pour l'ajustage d'un arbre avec jeu de fonctionnement.

### Préparation du palier B

Le matériau utilisé pour la fabrication du palier est le Zamac. Ce choix peu courant résulte avant tout de la pratique. Généralement, les paliers de tourne disque sont en bronze car cet alliage se comporte très bien au point de vue de la friction avec l'acier. Malheureusement le frottement du bronze sur l'acier

s'avère relativement bruyant et il est possible d'obtenir beaucoup mieux. A ce titre, une matière plastique comme le Delrin est

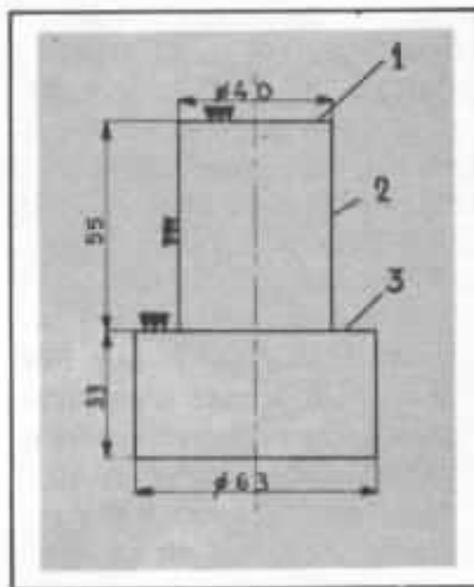


Fig 2 : Ebauche du palier en Zamac avant son montage dans l'alésage du plateau.

extrêmement satisfaisante, en contrepartie son instabilité dimensionnelle peut conduire à bien des déboires. Le Zamac quant à lui se révèle aussi silencieux que le Delrin. Son usage est extrêmement agréable et en particulier au moment de la finition de l'alésage il est possible d'effectuer des passes de très faible profondeur et d'obtenir brut d'outil un état de surface quasi parfait. D'autre part le Zamac est un matériau très dur et très résistant à l'usure. Ces dernières qualités le font retenir pour la fabrication de matrices économiques pour le découpage de pièces métalliques de faible épaisseur. Ces matrices sont obtenues en coulant le Zamac en fusion autour du poinçon préalable-

ment établi. J'ai vu des outillages conçus de cette manière découper sans incident plus de 2 000 pièces.

L'ébauche sera usinée conformément à la figure 2, en partant d'un jet de Zamac coulé de 65 mm de diamètre et de 120 mm de longueur. On prendra bien soin de ne pas démonter la pièce en cours d'usinage afin que les faces 1 et 3 et le diamètre 2 soient en parfaite concentricité. Ces faces et ce diamètre seront l'objet de la meilleure finition possible puisqu'ils ne seront pas retouchés ultérieurement.

### Préparation du circuit magnétique C

Le circuit magnétique est composé de deux pièces en acier doux ayant des cotes identiques. La réalisation de ces deux pièces diffère sensiblement du fait que l'une aura un rôle statique tandis que l'autre, liée au plateau devra satisfaire à des impératifs de précision bien plus sévères.

Il est possible d'utiliser comme ébauche de départ des rondelles sciées dans du jet de 250 mm de diamètre. On peut aussi envisager la création d'un modèle pour obtenir des ébauches par moulage au sable, toutefois cette solution ne peut se révéler économique que pour la création d'une petite série de pièces et ne sera pas décrite dans ces lignes.

Les rondelles d'acier doux brutes de sciage ont leur faces aussi peu parallèles que possibles et la première opération consistera à dresser ces faces sur le tour parallèle.

Nous disposons donc maintenant de deux rondelles d'acier doux dont les faces sont devenues planes et à peu près parallèles. Au lieu de les usiner en les

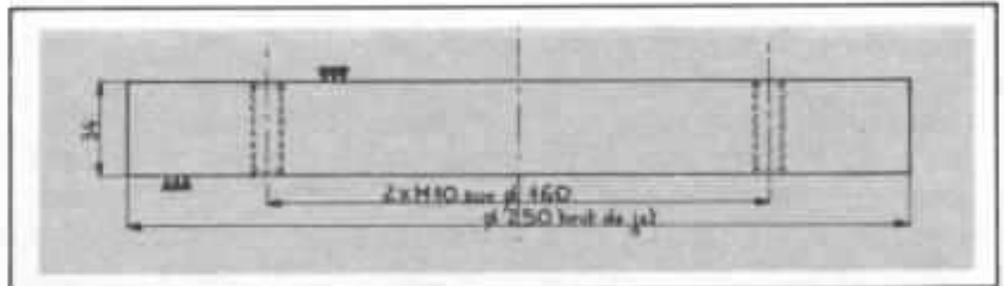


Fig 3 : Ebauche du circuit magnétique avant son usinage sur le plateau du tour.

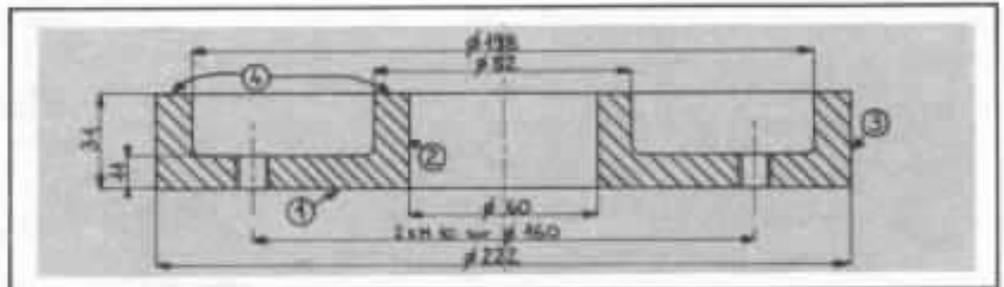


Fig 4 : Ebauche du circuit magnétique tournant avant son montage sur le plateau.

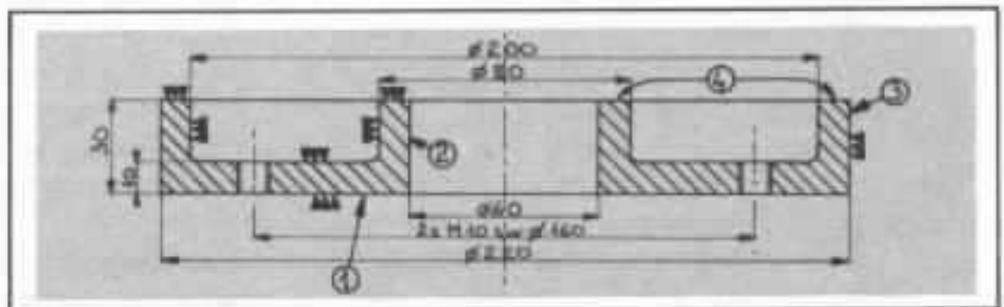


Fig 5 : Circuit magnétique statique terminé.

prenant dans les mandrins du tour comme précédemment, elles seront montées sur plateau. Ce montage se fera par deux trous taraudés aménagés dans les ébauches selon la figure 3. Le montage sur plateau a l'avantage de ne pas imposer la déformation temporaire que ne manque pas de provoquer la pression des mors du mandrin qui enserrant la pièce à usiner. Ce phénomène pourrait être particulièrement gênant dans le cas de nos pièces dont la déformation augmenterait au fur et à mesure de l'avancement de l'usinage de la face évidée pour le logement de l'aimant.

Au contraire, dans le cas du montage sur plateau, la pièce est plaquée sur une surface très

rigide que l'on peut considérer comme la meilleure référence de planéité et de concentricité qui soit à notre disposition.

Il est préférable d'entreprendre d'abord la partie « statique » du circuit magnétique, dans le but de mettre au point la méthode de travail ; de se faire la main en quelque sorte. L'usinage commencera par le dressage de la face 1. La pièce sera ensuite retournée pour l'usinage du diamètre extérieur 3, des détails de la face 4 et de l'alésage 2 dont la finition sera exécutée à l'outil pour garantir la perpendicularité avec les faces (selon la figure 4). On procédera exactement de la même manière pour la partie mobile du circuit magnétique, la différence résultant seulement

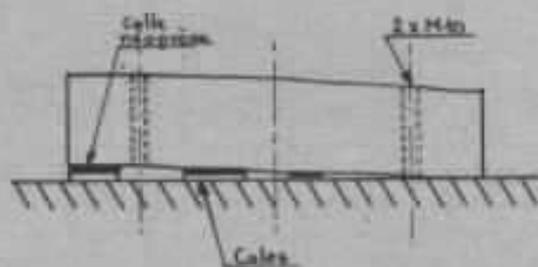


Fig 6 : Calage du plateau en vue du perçage et de l'usinage.

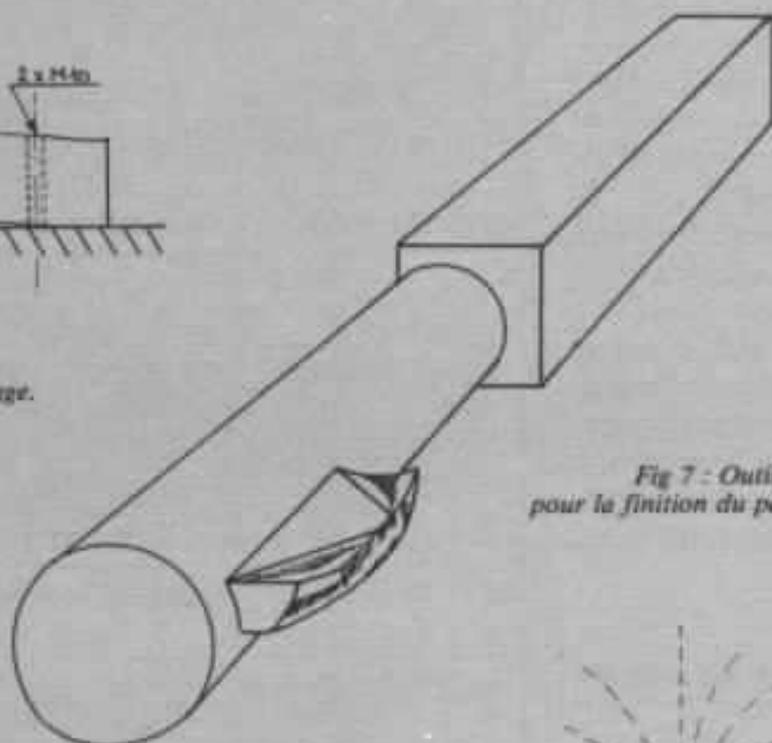
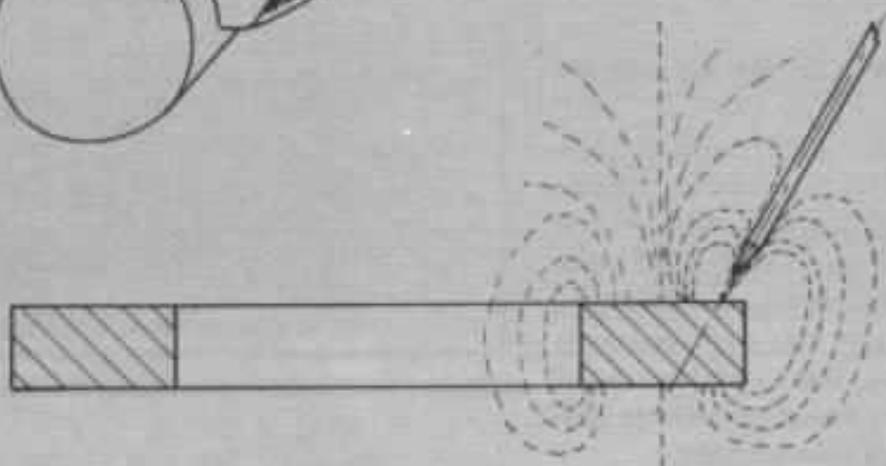


Fig 7 : Outil à aléser utilisé pour la finition du palier en Zamac.

Fig 8 : Une aiguille en acier sera utilisée pour débarrasser les aimants des limailles.



des cotes de finition puisque l'on réservera 1 mm de surépaisseur sur toutes les cotes des détails de la face 4 et du diamètre 3. (selon figure 5).

### Préparation du plateau

Le plateau sera usiné à partir d'une rondelle en dural (AU 4 G) obtenue par sciage dans un jet de 300 mm de diamètre. Comme précédemment pour les rondelles d'acier du circuit magnétique, les faces brutes de sciage présentent un aspect tourmenté et tous nos efforts devront concourir pour obtenir une pièce dont les deux faces soient parallèles. Le tour dont je dispose ne

permet pas malheureusement de prendre une pièce d'un tel diamètre dans son mandrin. Cela contraint à une certaine gymnastique pour fixer la pièce directement sur le plateau du tour. En effet on se heurte à une succession de difficultés :

Le perçage des trous M 10 pour la fixation, risque de ne pas être perpendiculaire à l'axe de la pièce.

Les deux trous risquent de ne pas être parallèles entre eux. Lors du serrage de la pièce sur le plateau, il est fort probable que l'on va provoquer une déformation de ce dernier.

La parade à ces graves incon-

véniements est de disposer des cales constituées par des petits morceaux de tôle ou des rondelles d'épaisseur convenable sous la pièce et à sa périphérie. Quant un calage satisfaisant est obtenu, il y a lieu de fixer provisoirement les cales par des points de colle néoprène. Cela réalisé, on peut procéder au perçage des deux trous de fixation avec un bon espoir de réussite. (figure 6)

Bien entendu les cales seront conservées pour le montage de la pièce sur le plateau du tour et les vis de fixation seront serrés sans excès pour ne pas provoquer de déformation. Cette fixation étant précaire, il est nécessaire

d'effectuer les premières passes avec la plus grande prudence. Dès que la première face est dressée, on retourne la pièce et maintenant il convient de serrer les vis à fond, les déformations n'étant plus à craindre. La deuxième face étant dressée on procèdera à une passe de finition en utilisant une avance très faible liée à une grande vitesse de coupe pour obtenir un bel aspect brillant. La face ainsi obtenue sera le dessus du plateau. On retourne une dernière fois le plateau en veillant soigneusement au nettoyage de la pièce et du plateau du tour pour éviter qu'un débris de métal ne vienne abîmer la belle finition précédemment obtenue. *A ce stade de la fabrication le plateau ne sera plus démonté jusqu'à sa complète finition.* Aussi bien il ne devra absolument pas bouger sous peine de ruiner les efforts précédents. Il est donc prudent de vérifier périodiquement le serrage des deux vis de fixation.

On procèdera à l'usinage du diamètre et de la face puis de l'alésage qui sera terminé à l'outil. Cet alésage étant destiné à recevoir le palier en Zamac, c'est celui-ci qui servira de calibre pour la finition. La cote finale de l'alésage devra permettre un assemblage à frottement gras avec le palier. Pour obtenir cette cote, il faudra procéder par passes très fines de 1/100ème de mm en vérifiant l'affûtage de l'outil à aléser qui doit couper comme un rasoir. La vitesse sera réglée pour obtenir un copeau continu, signe de profondeur de coupe constante, et une absence de vibration de l'outil qui aurait un effet très néfaste sur la qualité de l'état de surface. J'ai utilisé pour ma part un outil de forme assez particulière donnant de bons résultats dans cet usage très

spécial. (figure 7). La fixation du palier dans le plateau sera obtenue de manière définitive par collage à la colle araldite. La notion de rentabilité étant absente de notre propos, je conseille d'utiliser de l'araldite normale à prise lente qui permet aux pièces de prendre bien leur place tandis que la colle se répartit en une pellicule uniforme et mince. Durant les 24 heures nécessaires à la prise de la colle, la poupée mobile du tour sera utilisée pour maintenir le palier en pression.

Cet assemblage terminé, il faudra procéder à l'ajustage du circuit magnétique sur le palier en Zamac par usinage du diamètre de ce dernier. Le procédé est comparable à ce que nous avons vu précédemment et l'opération se terminera à nouveau par le collage du circuit magnétique et 24 heures d'attente pour la prise de la colle. Reste à effectuer l'alésage du palier. Une nouvelle fois, c'est une pièce précédemment usinée, qui servira de calibre, ici l'axe en acier rectifié. La finition de l'alésage se fera de la

même manière et avec le même outil que l'alésage déjà réalisé dans le plateau. L'état de surface de l'alésage, pèsera lourd sur le résultat final ; en particulier, le niveau de bruit résiduel sera d'autant plus faible que l'état de surface du Zamac sera parfait. Il faut cependant résister à la tentation d'utiliser un alésoir sous prétexte de parfaire cet état de surface car l'alésoir partira toujours un peu en biais, compromettant le centrage excellent obtenu par l'outil.

La dernière opération consistera en la mise à la cote finale du circuit magnétique. Eventuellement, une dernière passe à grande vitesse de coupe sur le diamètre et la face du plateau donneront un bel aspect de finition.

*Toutes les opérations que je viens de décrire se sont succédées sans que la pièce ait été démontée.* Cela garantit le meilleur équilibre et la meilleure concentricité possible pour la pièce réalisée et élimine l'effet des inévitables défauts de parallélisme du

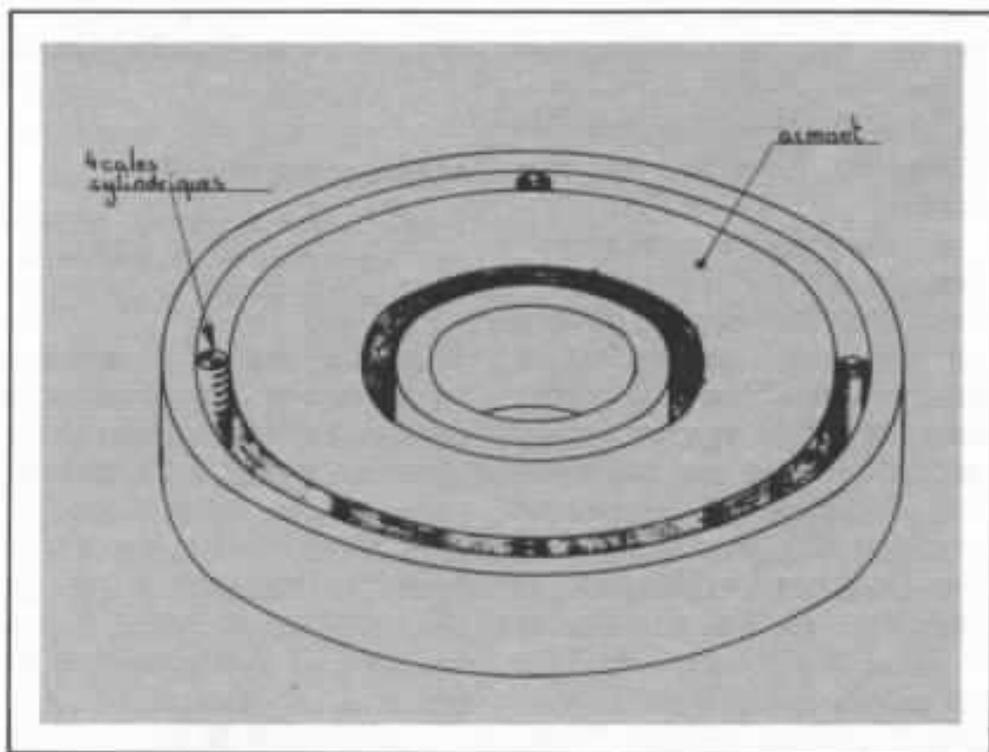


Fig 9 : Calage et centrage de l'aimant pendant la prise de la colle.

tour utilisé. Il en aurait été bien autrement si les pièces avaient été usinées séparément (même avec beaucoup de soin et sur les meilleures machines) et réunies dans une opération finale d'assemblage.

Une telle mise en œuvre relève plus du bricolage solitaire que de l'industrie. L'amateur ne possédant pas l'outillage nécessaire, ne doit pas pour autant désespérer puisque ces lignes ont été écrites pour lui permettre de convaincre un atelier artisanal d'entreprendre le travail d'usinage du plateau sans tatonnement et avec toutes chances de succès.

L'axe de centrage des disques qui se place à frottement gras dans l'alésage du plateau ne présente aucune difficulté de réalisation. Il faut cependant savoir qu'il est intéressant d'en fabriquer plusieurs avec des diamètres différents pour pouvoir s'accommoder au mieux des variations existant dans le diamètre du trou central des disques commerciaux. Pratiquement, un jeu de 3 pièces peut convenir à tous les besoins, avec les diamètres suivants :

7, 12 — 7, 15 — 7, 17 mm tolérance h 7 ( + 0 — 15 micro mètre).

Le plateau obtenu par le procédé décrit, constitue probablement ce qu'il est possible de faire de plus parfait actuellement en matière d'équilibre et de précision ; il est de surcroît totalement inerte et ne rend aucun son à la percussion. Cela dispense de l'utilisation d'un couvre plateau amortisseur. En exploitation, le disque sera placé directement sur le métal du plateau et assuré par un palet presseur. Cette disposition s'approche de l'idéal théorique qui voudrait que le disque

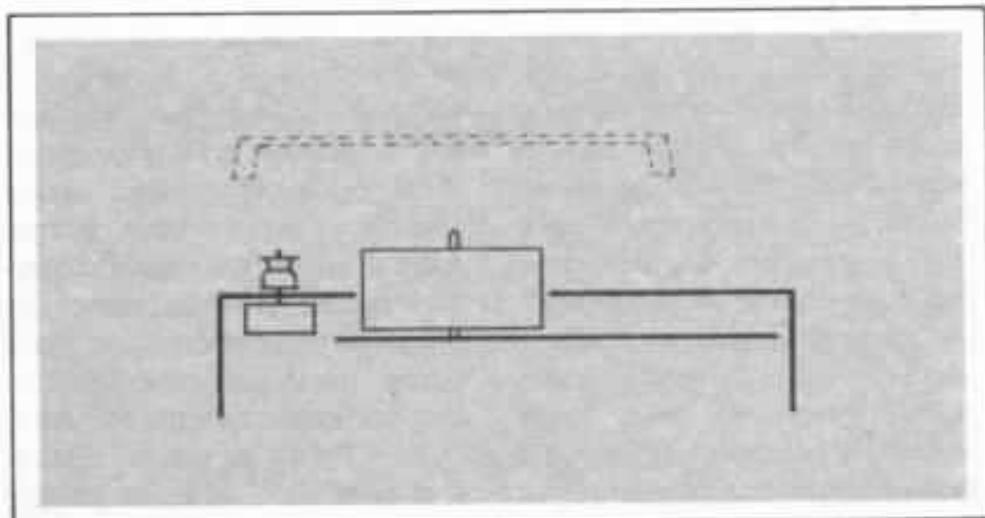


Fig 10 : On utilisera un tourne disque sans son grand plateau pour le tri des courroies.

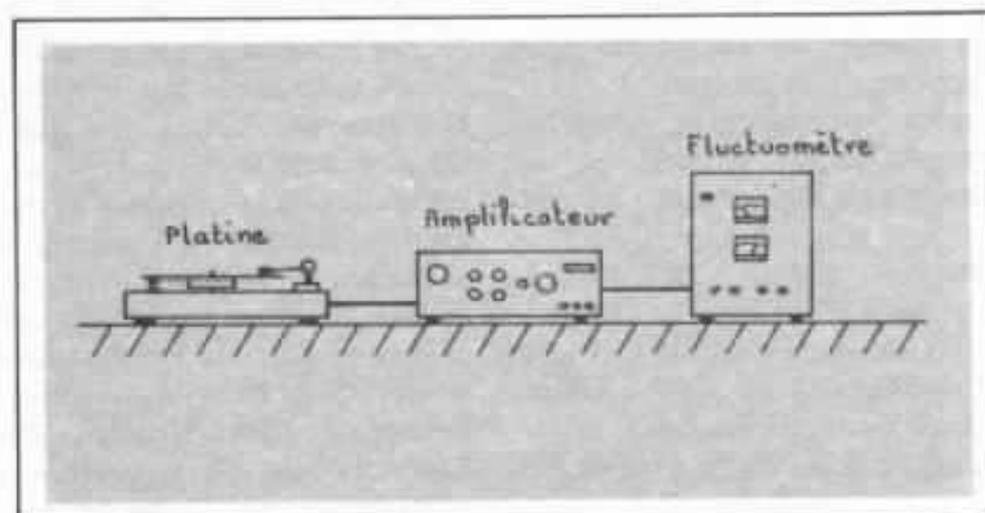


Fig 11 : Branchement à réaliser pour le tri des courroies au fluctuomètre.

soit partie intégrante du plateau.

### Montage des aimants

Les bagues de ferrite devront être aimantées avant leur montage dans le circuit magnétique.

En fait il est possible de se procurer les ferrites directement dans cet état. La manipulation de ces aimants n'est pas sans problèmes car quelles que soient les précautions prises, il se trouvera toujours des limailles de fer qui choisiront de s'y coller. L'attitude la plus sage consiste à ne pas trop se soucier à ce sujet, l'essentiel étant de bien nettoyer les aimants quand le montage est

terminé. La figure 8 indique comment procéder ; une aiguille d'acier plongée dans le champ de fuite de l'aimant, concentre le flux magnétique à son extrémité et l'induction y devenant plus importante qu'à la surface de la ferrite, les limailles sont attirées par l'extrémité de l'aiguille et facilement éliminées. Les aimants seront collés à l'araldite dans leurs logements. La seule difficulté est de les centrer correctement. A cet effet on fabriquera quatre cales cylindriques en aluminium d'un diamètre égal à la demi différence entre le diamètre extérieur de l'aimant et le diamètre intérieur du circuit magnétique (voir figure 9).

## La courroie

La fabrication des courroies de tourne disque est d'une extrême difficulté et nécessite un outillage approprié que l'on ne rencontre que chez peu de spécialistes de l'usinage du caoutchouc. Par ailleurs la mise en œuvre nécessaire pour obtenir une seule courroie, porterait celle-ci à un prix de revient nettement prohibitif. La description de la fabrication des courroies ne sera donc pas abordée dans cet article. Il est bien plus commode d'acheter chez un importateur de tourne disque, un lot de courroies d'un modèle convenant à la réalisation en cours et d'opérer un tri pour utiliser les meilleures pièces. Pour effectuer ce tri, il est commode de disposer d'un tourne disque dont le plateau se compose de deux parties (fig. 10) tel un Barthe, un Thorens etc. Les comparaisons entre les courroies se feront en posant le disque de mesure sur le petit plateau, ou poulie centrale. Dans ces conditions, l'effet régulateur du grand plateau étant absent la différence de qualité entre les courroies sera plus facile à apprécier. L'idéal est de disposer d'un fluctuomètre pour effectuer ces mesures (figure 11). En mesure non pondérée, une courroie donnant une fluctuation totale de 0,1 % peut être considérée comme une perfection rarissime, 0,2 % est très bon et 0,3 % tout à fait acceptable. Bien entendu, en utilisation réelle, l'inertie du plateau « améliore » grandement ces résultats plutôt médiocres en première analyse. Sans fluctuomètre le tri des courroies sera plus complexe et plus subjectif mais parfaitement réalisable puisque les taux de fluctuation évoqués plus haut sont à la limite de ce que l'on

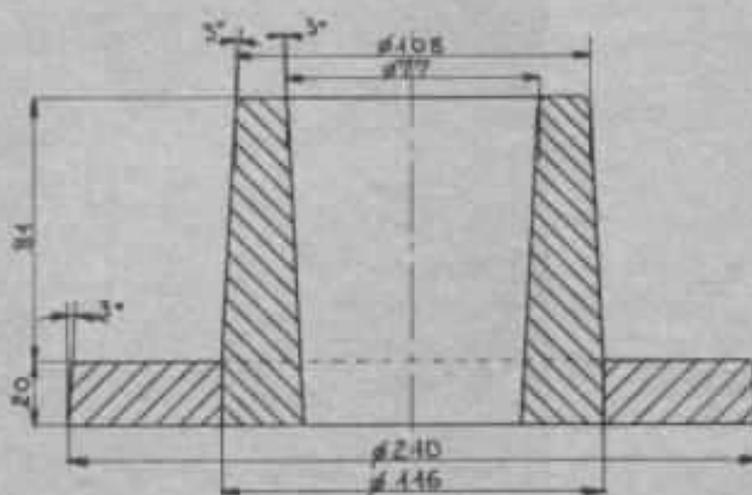


Fig 12 : Modèle en bois pour la fabrication du support moteur en fonte d'acier moulée au sable.

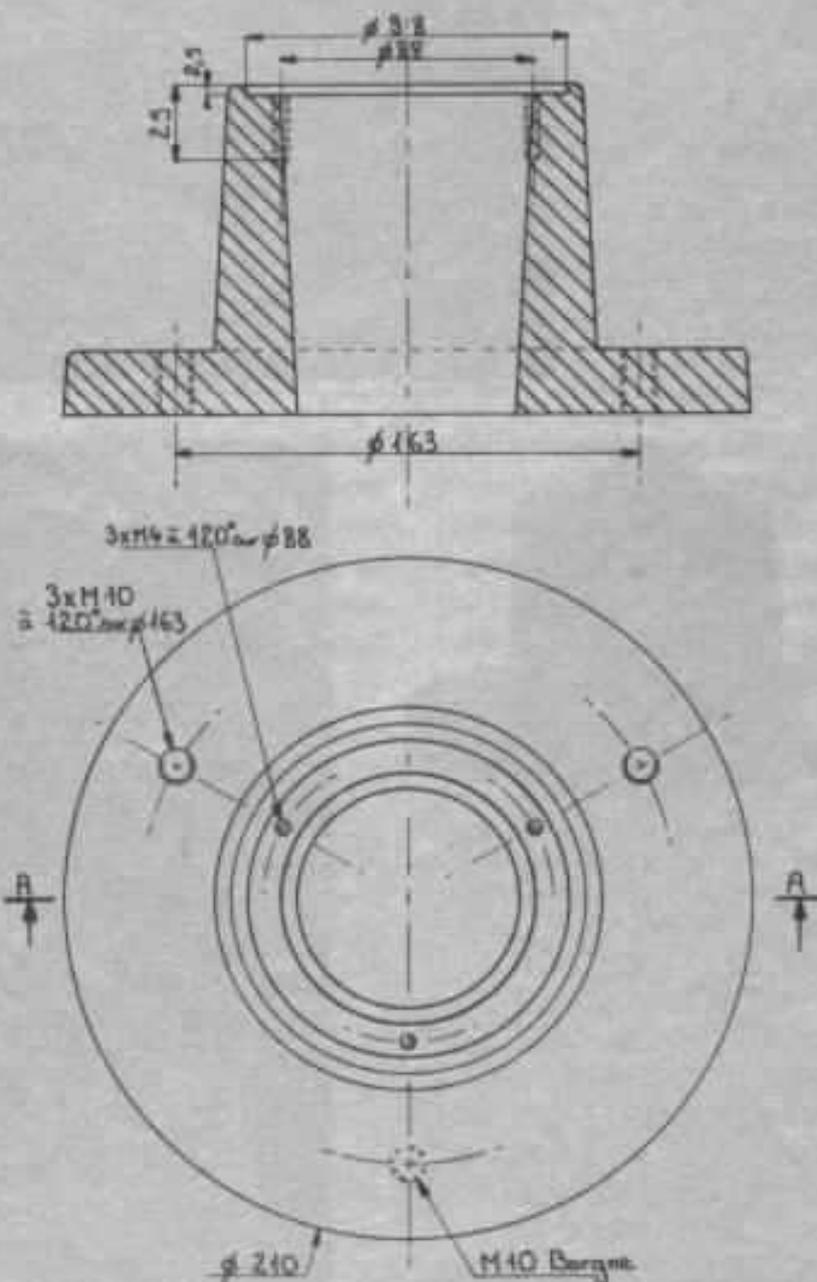
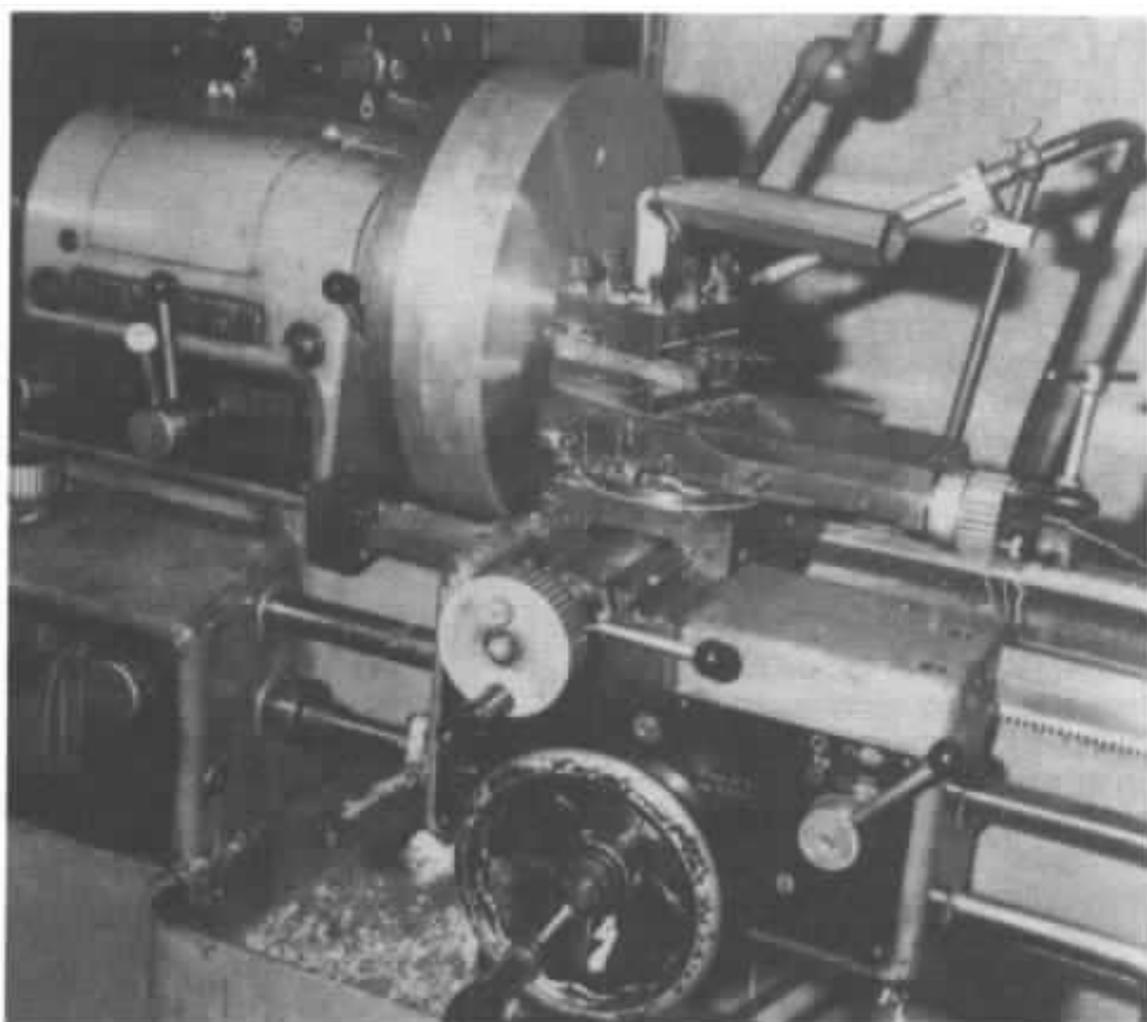


Fig 13 : Usinage du support moteur.



*Le tour pendant l'usinage du plateau, on distingue côte à côte la pièce en cours d'usinage et le plateau du tour, surface de référence évoquée dans l'article.*



*Le nouveau support du moteur en fonte d'acier, d'un poids de 8 Kg annule complètement les vibrations du moteur.*



*Comptage des raies du stroboscope défilant pendant une minute en vue de la correction du diamètre des gorges de la poulie du moteur.*

peut percevoir à l'oreille sur un signal sinusoïdal continu.

### Le moteur et son support

Dans mon précédent article consacré à l'aspect théorique de la définition du tourne disque, j'avais signalé que le moteur choisi, un RTC 27111 émettait encore des vibrations malgré un support en acier d'un poids de 3 kg. De nouveaux essais ont conduit à une augmentation assez considérable de cette masse. Le support actuel donne entière satisfaction, son poids est de 8 kg. Sa forme dicte son mode de fabrication : il faut recourir à la fonderie au sable. Dans ce but, les figures 12 et 13 donnent les plans du modèle bois et de la pièce telle qu'elle devra être usinée. Afin de pouvoir régler l'horizontalité du moteur, le socle est pourvu de pieds réglables constitués par des vis à tête moletées.

### La poulie du moteur

La figure 14 donne les plans d'exécution de la poulie. Les gorges de la poulie sont bien évidemment prévues pour obtenir les vitesses de 33 tours 1/3 et de 45 tours/minute. Ces gorges sont bombées avec un rayon de 6 mm. Afin que la courroie puisse se centrer automatiquement, ce bombé est obtenu grâce à un outil en forme de pelle dont les détails sont indiqués sur la figure 15.

L'exécution de la poulie relève des mêmes principes que celle du plateau et en particulier tous les usinages y compris l'alésage à l'outil seront faits sans démontage de la pièce. Le diamètre à fond de gorge est donné à titre indicatif. En effet, le rapport de

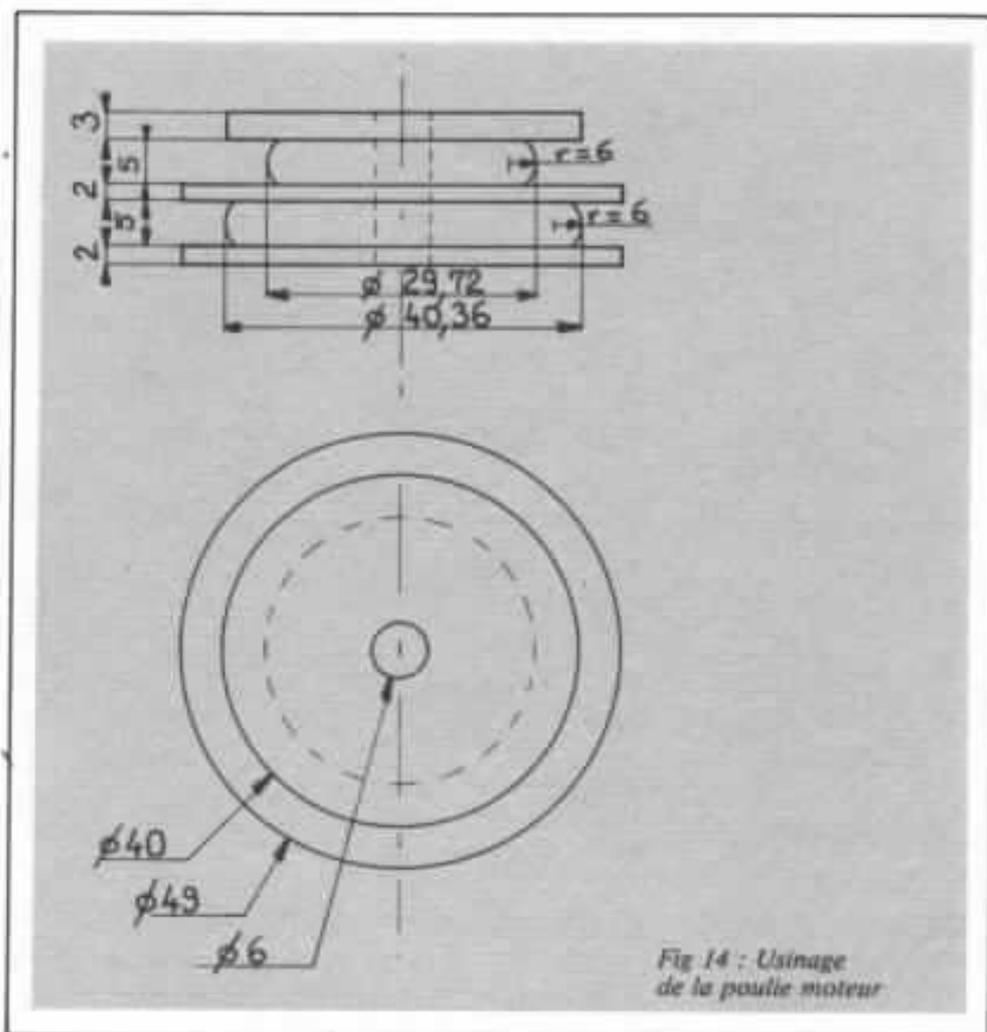


Fig 14 : Usinage de la poulie moteur

démultiplication va être affecté par une infinité de paramètres dont les deux principaux seront le rayon exact du bombé de la poulie et la tension de la courroie utilisée. Il est donc pratiquement certain qu'il faudra réaliser au

moins deux poulies avant d'obtenir la bonne démultiplication. La première poulie permettra de se rendre compte de l'écart par rapport à la vitesse correcte en comptant les raies défilant en une minute sur le stroboscope.

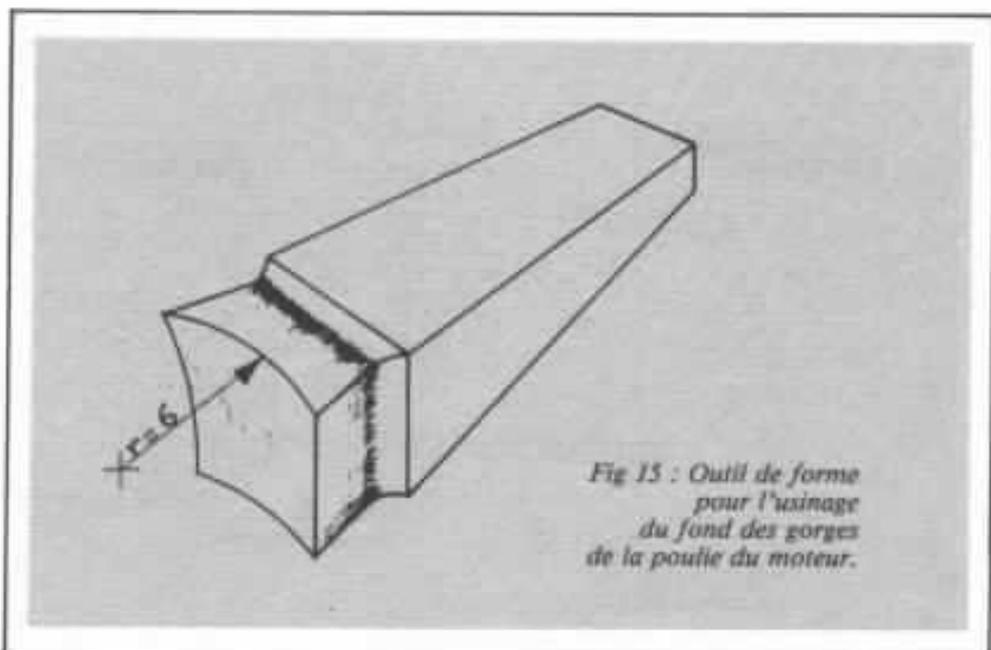


Fig 15 : Outil de forme pour l'usinage du fond des gorges de la poulie du moteur.

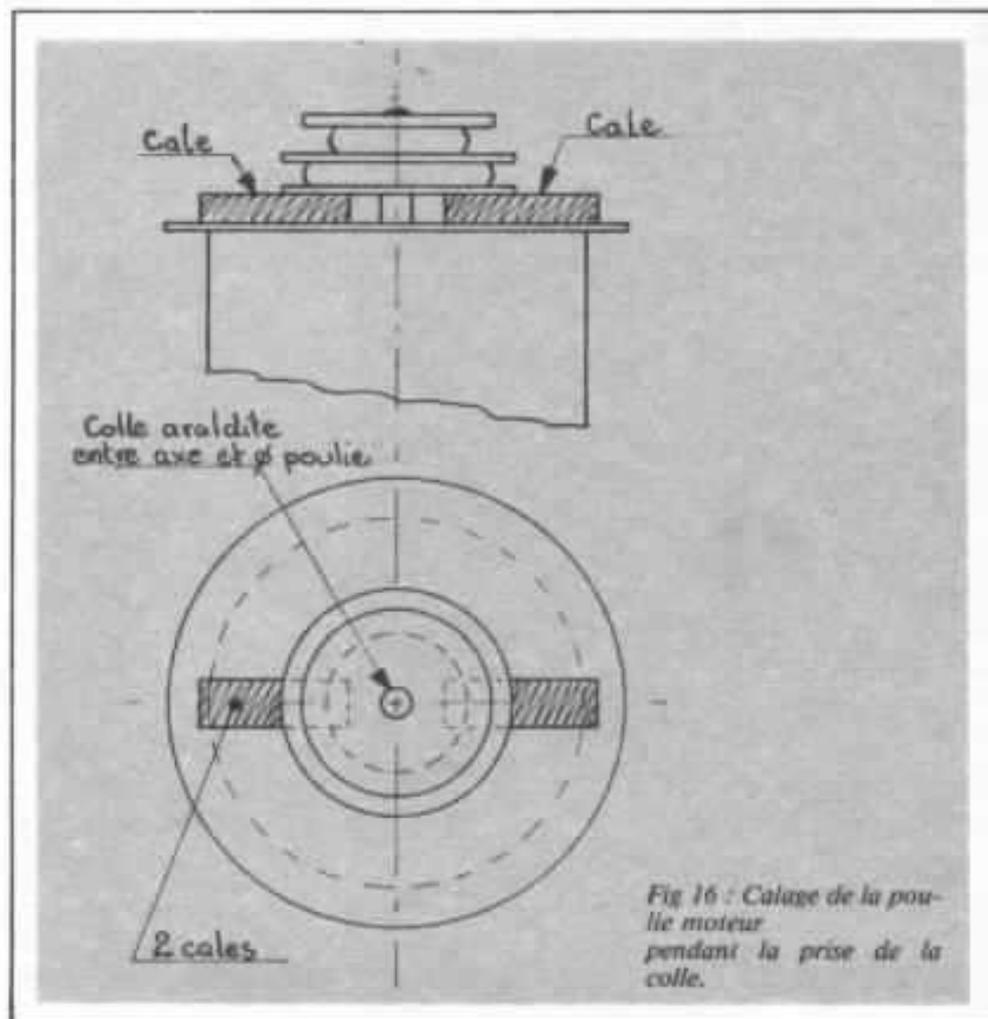


Fig 16 : Cálage de la poulie moteur pendant la prise de la colle.

Une sage précaution consiste à faire tourner le moteur durant la prise de la colle en disposant deux cales d'épaisseur égale entre la poulie et le moteur (fig. 16). Cette étrange disposition permet en effet à la poulie de se centrer parfaitement sur l'axe, la colle comblant d'une manière égale le jeu existant entre l'axe du moteur et la poulie.

**La contre platine et la suspension**

La contre platine utilisée actuellement est un assemblage de 2 planches en dural de 20 mm d'épaisseur, reliées par 2 colonnettes de 30 mm de diamètre. Malgré cette débauche de matière première la rigidité de l'ensemble n'est pas suffisante (quoique très au-dessus de la moyenne). Pour cette raison, les pièces constituant cette contre platine ne seront pas décrites. La contre platine actuellement en cours de construction sera beaucoup plus épaisse et intégrera dans sa masse les éléments de suspension et d'amortissement. La figure 17 donne une idée du principe retenu et de la configuration générale d'un élément.

Le stroboscope pour 33 tours 1/3 comportant 180 raies, l'écart de vitesse en tours par minute sera égal au nombre des raies défilant en une minute sur le stroboscope divisé par 180. Connaissant l'écart de vitesse, on

appliquera la règle proportionnelle sur le diamètre de la poulie moteur pour apporter la correction nécessaire.

Le montage définitif de la poulie sur l'axe du moteur est obtenu par collage à l'araldite.

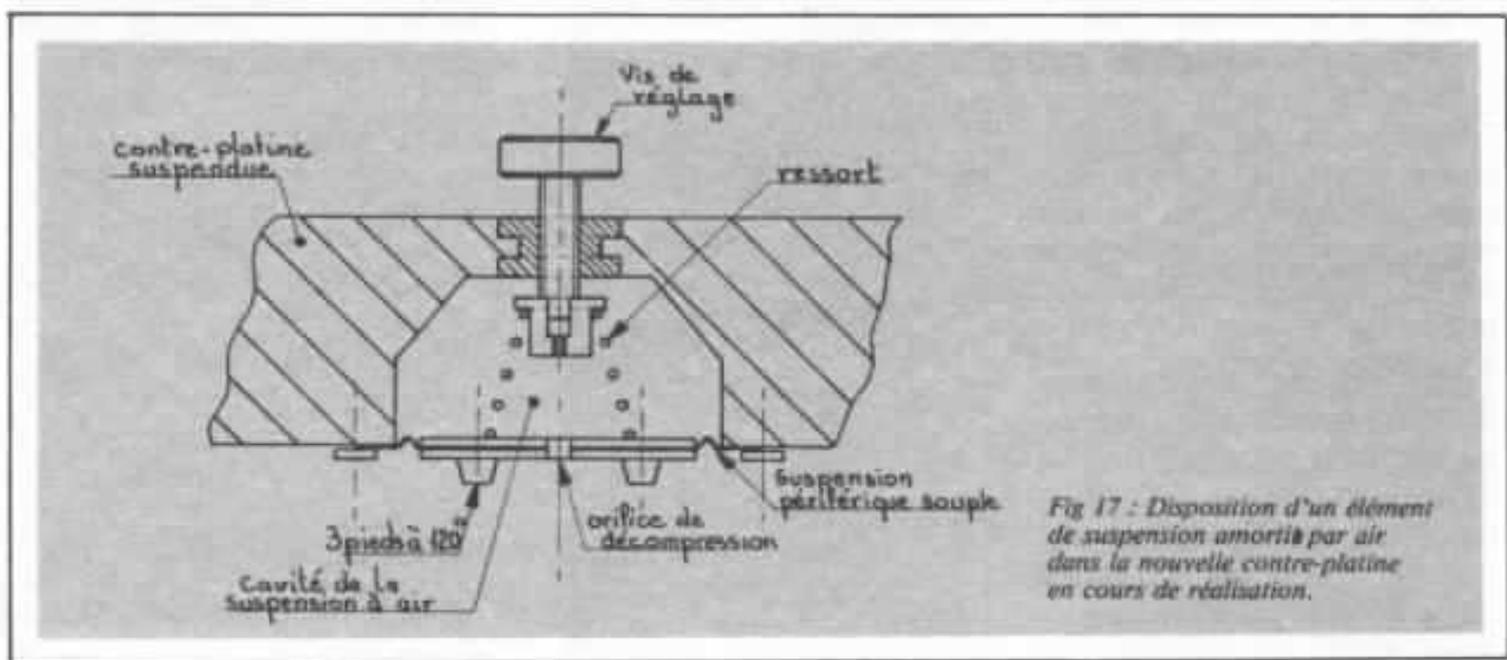
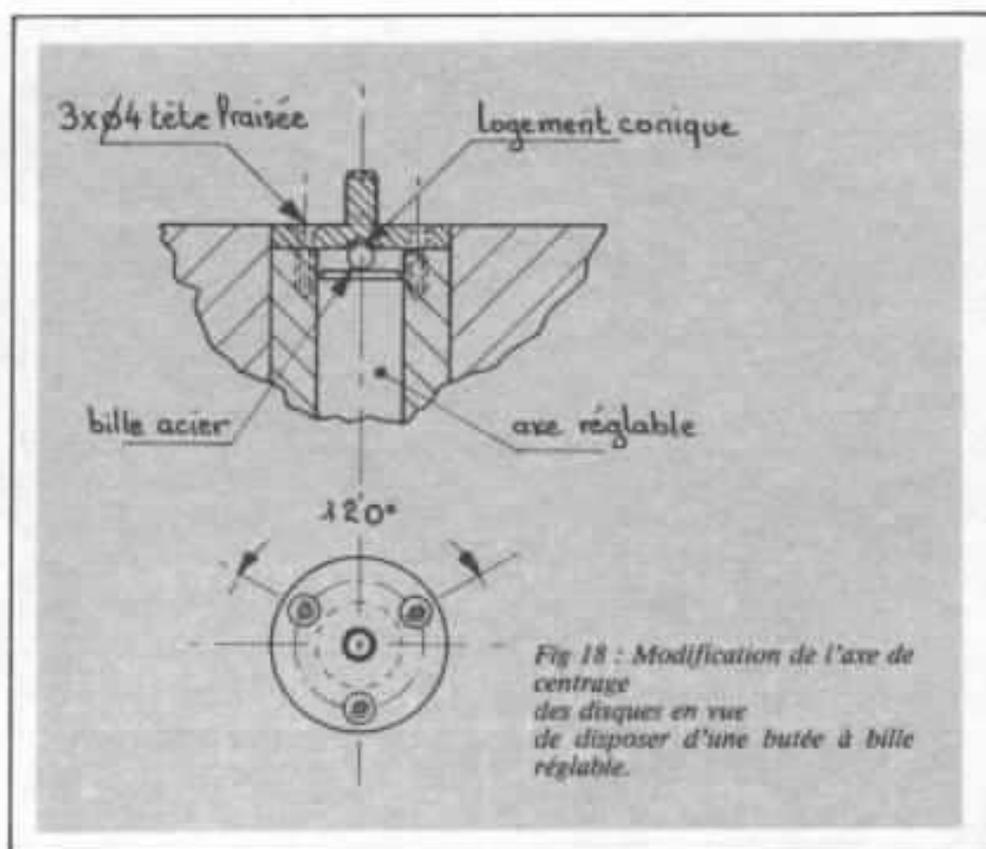


Fig 17 : Disposition d'un élément de suspension amorti par air dans la nouvelle contre-platine en cours de réalisation.

## Amélioration

Tel que décrit dans ces lignes, le plateau est entièrement soutenu par la force de répulsion provoquée par les aimants. Le plateau occupe donc une position d'équilibre autour de laquelle il peut osciller. Indiscutablement cette particularité introduit un paramètre nouveau qu'il est souhaitable de pouvoir supprimer ou introduire à volonté pour effectuer des comparaisons. A cet effet, une modification très simple a été apportée. Elle consiste à fixer la pièce comportant l'axe de centrage des disques par trois vis à tête fraisée (figure 18) et à aménager dans sa partie inférieure un logement conique pour positionner une bille d'acier reposant par ailleurs au sommet de l'axe. Cet axe étant réglable en hauteur, il est possible de faire varier la pres-



sion sur la bille comme on le désire.

La contre platine entièrement

revue fera l'objet d'une étude détaillée dans un prochain numéro de l'Audiophile.

**Page non  
disponible**

# Lutte contre les vibrations de la platine

*Charles Henry Delaleu*

*Dans le numéro 13 nous avons étudié les vibrations parasites dans l'ensemble bras-cellule, la suite logique de ces recherches était d'observer le comportement de la platine tourne-disque. Il est maintenant admis que le son des platines existe, mais que les mesures courantes ne permettent pas de juger des qualités de ces appareils. En effet deux platines de technologie semblable et de caractéristiques techniques proches peuvent à l'écoute sembler différentes. Il fut donc entrepris d'analyser le comportement des tables de lecture, et d'essayer d'améliorer leur performance.*

Les essais furent réalisés en deux étapes. Dans un premier temps les études portèrent sur les différentes pièces qui constituent le tourne-disque, puis le comportement de la table de lecture dans son environnement.

## L'ENTRAÎNEMENT DIRECT

La première platine utilisée était du type à entraînement direct qui semblait être très sensible à la nature de son socle. Le moteur qui équipait l'ensemble était d'origine japonaise. Le socle en bois aggloméré fut

démonté pour être remplacé par une réalisation en béton.

Nous fûmes enthousiasmés dès la première écoute réalisée après cette modification. En effet le son paraissait plus défini, plus dynamique. Malheureusement n'ayant pas d'appareil de mesure à cette époque, il fut impossible de quantifier les résultats obtenus. Ce tourne-disque n'est plus en notre possession, nous nous bornerons donc à en faire un bref descriptif.

Les améliorations facilement réalisables sur ce genre d'appareil sont peu nombreuses, elles

concernent le socle et le plateau. Pour le plateau la marche à suivre sera décrite dans les pages suivantes.

Réaliser un socle en béton demande au préalable la confection d'un moule. Le plus simple semble être un ensemble en bois possédant les empreintes de l'appareil considéré. Il ne restera plus ensuite qu'à couler le béton.

Cette platine en « kit » coûte environ 800 F, le bloc moteur ainsi que le plateau se trouvent facilement chez la plupart des revendeurs en composants électroniques bien achalandés.

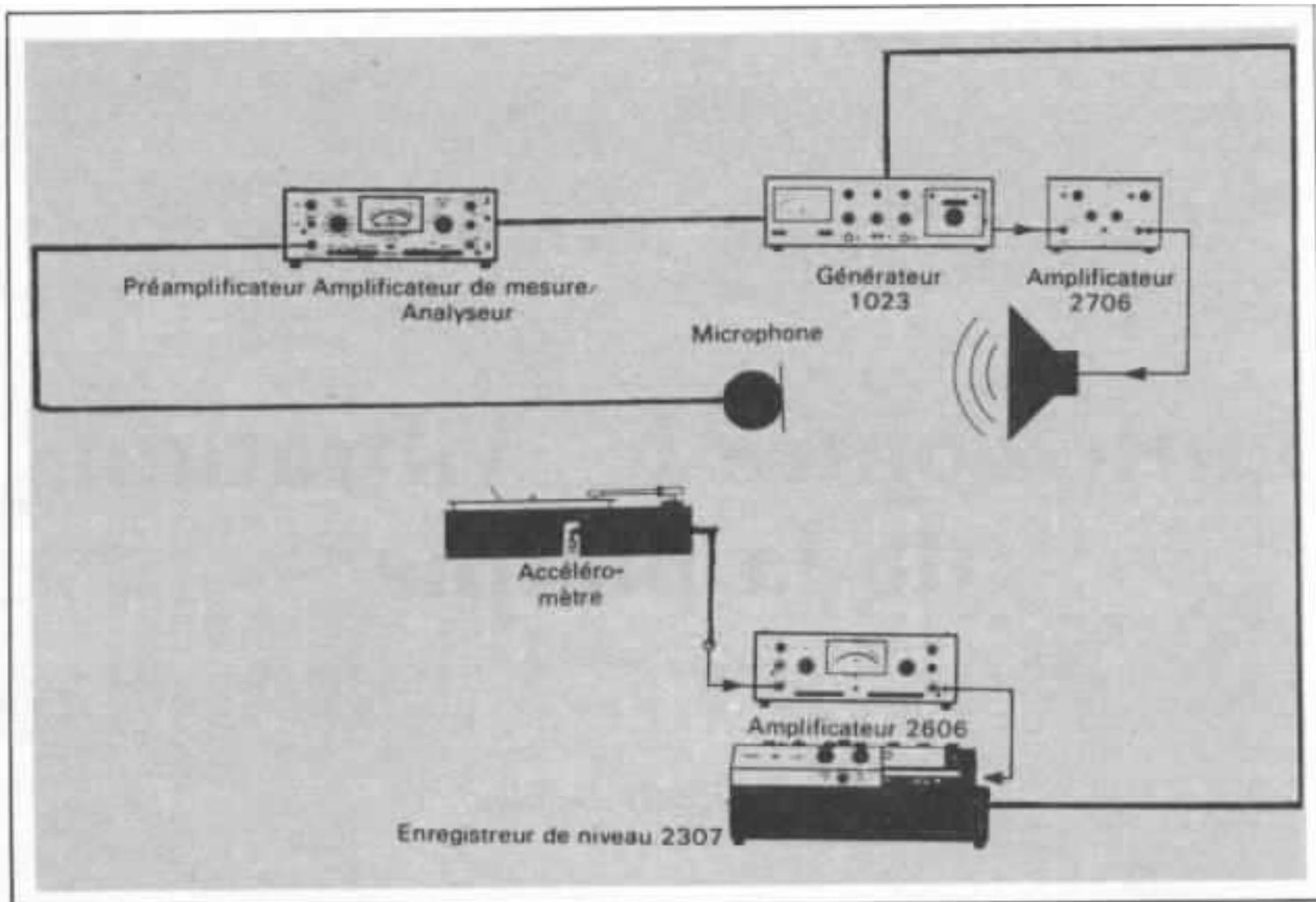


Fig 1: Un signal acoustique est dirigé vers la platine tourne-disque. Un micro capte ce signal pour être injecté à l'entrée compresseur du générateur, le haut-parleur est alors asservi : l'émission acoustique est constante. Les vibrations de la platine sont recueillies par l'accéléromètre pour être amplifiées par le 2606 et enregistrées par le 2307, le 2307 est synchronisé avec le générateur 1023.

Le socle pesait 30 kg et n'a demandé que peu de temps à être réalisé. Sous ce socle furent disposés quatre tampons de feutre de 2 mm d'épaisseur.

La seule raison qui nous a poussés à décrire cette réalisation était que le son délivré par cette platine était supérieur à celui d'un grand nombre de tourne-disques de commerce, pour un prix très inférieur.

## L'ENTRAÎNEMENT PAR COURROIE.

L'expérience nous a prouvé qu'à prix égal mieux valait acheter une platine à entraînement par courroie que son homologue à entraînement direct. Il existe actuellement sur le marché quel-

ques modèles dont les prix varient de 1 500 F à 5 000 F sans bras, qui sont remarquables.

Pour des raisons de fabrication et de coût de revient, ces platines, pourtant déjà plus musicales, ne sont pas ce que l'on pourrait attendre de mieux. En effet elles possèdent de nombreuses vibrations parasites qu'il est possible d'atténuer dans de fortes proportions.

## Mise en évidence des vibrations de la platine

Pour nos essais nous avons utilisé un banc Bruel et Kjaer dont le montage est donné figure 1. Une enceinte acoustique qui est asservie dans le grave par le compresseur du banc de

mesure excite une platine tourne-disque posée sur un meuble. Il s'agit de mesurer l'accrochage mécano-acoustique qui existe entre une platine et les enceintes qui composent en partie la chaîne de reproduction. Le niveau acoustique moyen émis par l'enceinte est de 90 dB (mesure effectuée à l'emplacement du tourne-disque).

Un excitateur est placé sur le socle entre le bras et le plateau, un premier relevé de courbes est effectué. La platine est ensuite changée pour être remplacée par un modèle de marque et de référence identiques mais dont les structures ont été rigidifiées et amorties.

Dans un second temps l'essai

est répété mais en positionnant l'accéléromètre sur la face avant du socle.

Nous pouvons observer sur la figure 2 que l'accrochage se produit sur toute la gamme audible. Sur la courbe A (platine d'origine) le niveau est supérieur d'environ 10 décibels dans la gamme 200 Hz à 8 kHz.

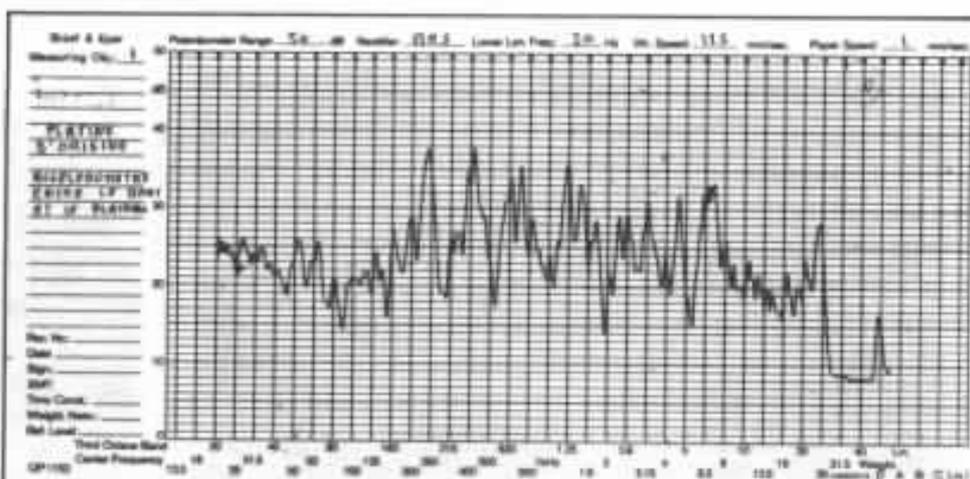
Sur la courbe B (platine modifiée) nous observons dans la bande 20 Hz à 200 Hz une amélioration de 5 décibels, dans la bande 200 Hz à 8 KHz, 10 décibels (excepté à 400 Hz : 3 dB), puis de 8 KHz à 20 KHz, 4 décibels.

Nous pouvons affirmer que la platine B est beaucoup moins sensible à l'effet Larsen.

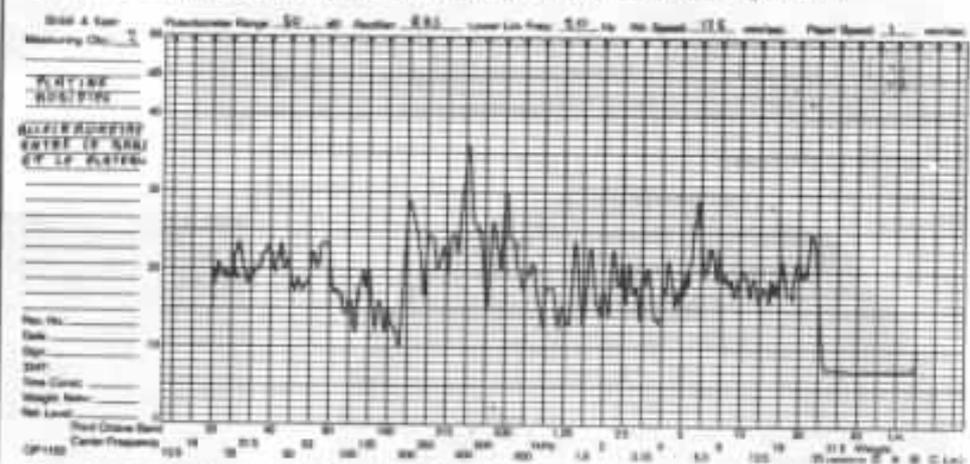
Dans la seconde mesure l'accéléromètre est placé sur l'avant du socle, les résultats sont plus démonstratifs. Dans la bande 300 Hz à 3 KHz qui est la gamme de fréquences où l'oreille humaine est de loin la plus sensible, les différences de niveaux atteignent 20 décibels entre la platine A et la B ce qui est énorme !

Nous pouvons observer dans la figure 3 la courbe de réponses de l'enceinte acoustique excitatrice. Le micro est placé à l'endroit même où se trouve la platine lors du relevé des vibrations parasites avec l'accéléromètre.

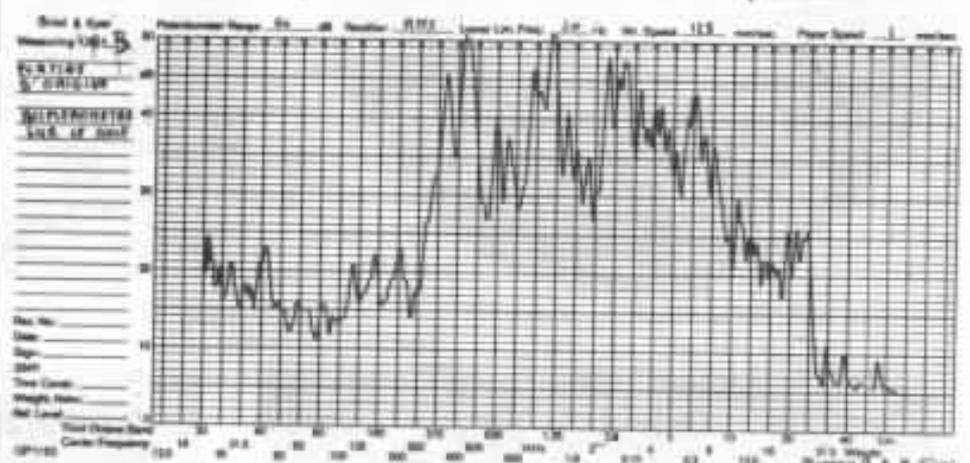
Dans la figure 4 nous pouvons observer le relevé de deux courbes. Dans le premier tracé la platine est posée sur un meuble de 300 kg, dans le second la table est positionnée sur un meuble de 30 kg. Les deux courbes sont effectuées dans les mêmes conditions, niveau sonore, position de l'enceinte, position de l'accéléromètre. La différence de niveau existant entre les deux courbes



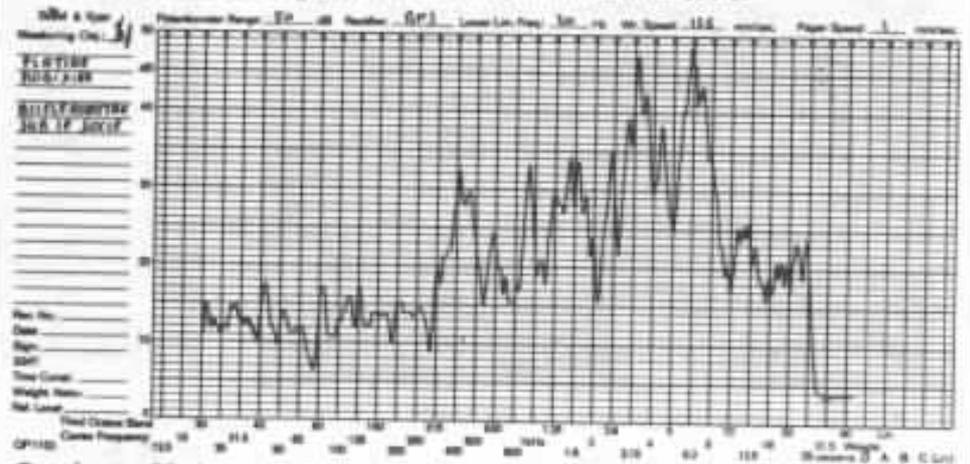
Courbe 1 : Platine d'origine. Accéléromètre entre le bras et le plateau.



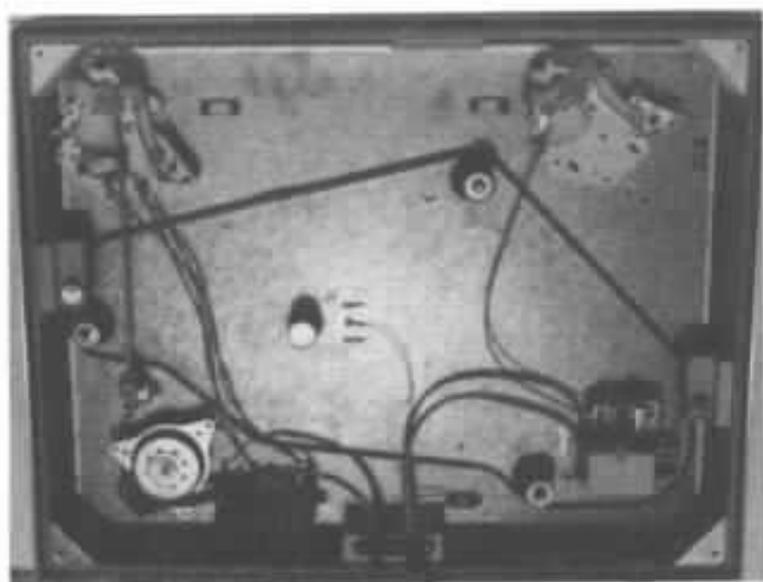
Courbe 2 : Platine modifiée. Accéléromètre entre le bras et le plateau.



Courbe 3 : Platine d'origine. Accéléromètre à l'avant du socle.



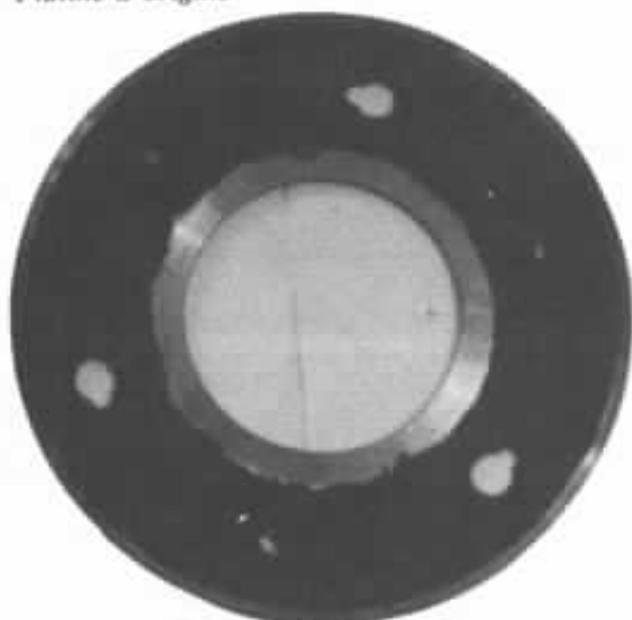
Courbe 4 : Platine modifiée. Accéléromètre à l'avant du socle.



*Platine d'origine*



*Plateau d'origine.*



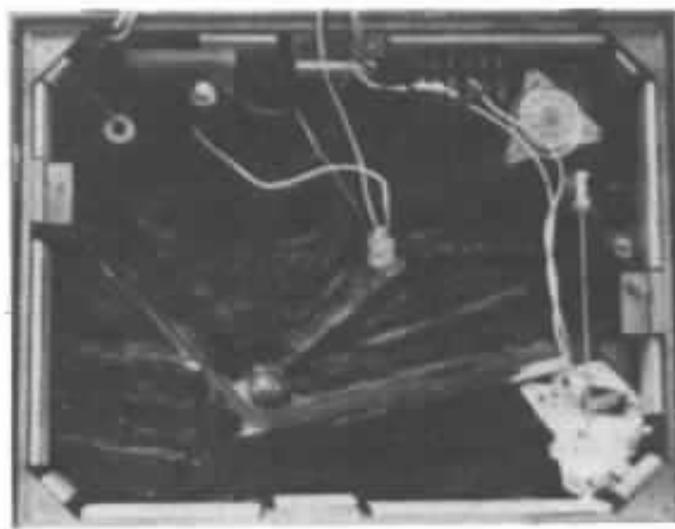
*Plateau modifié à l'aide de Blackson.*



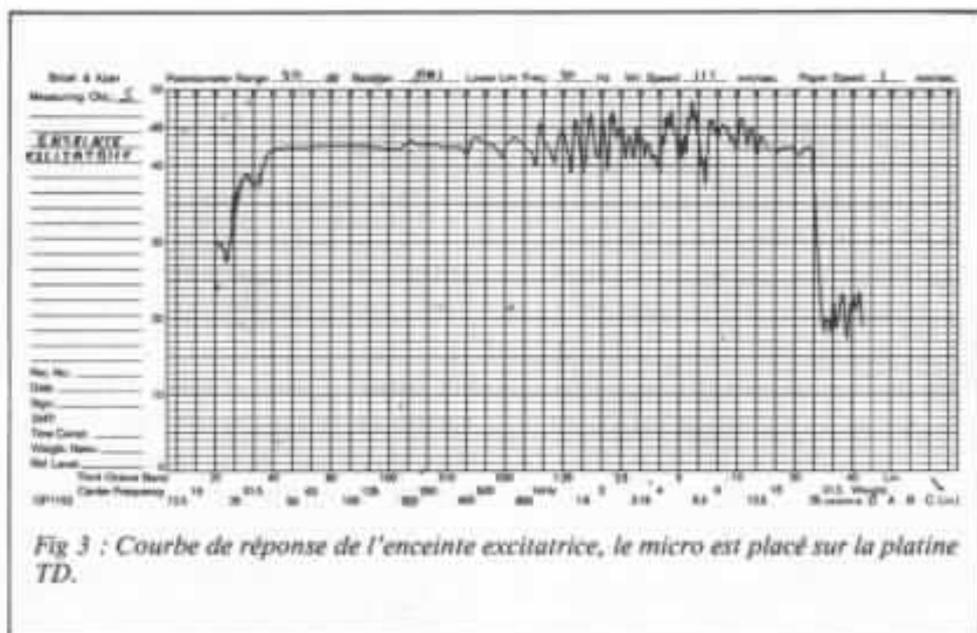
*Noter la position des cubes de bois durs*



*Gros plan sur les modifications du socle.*



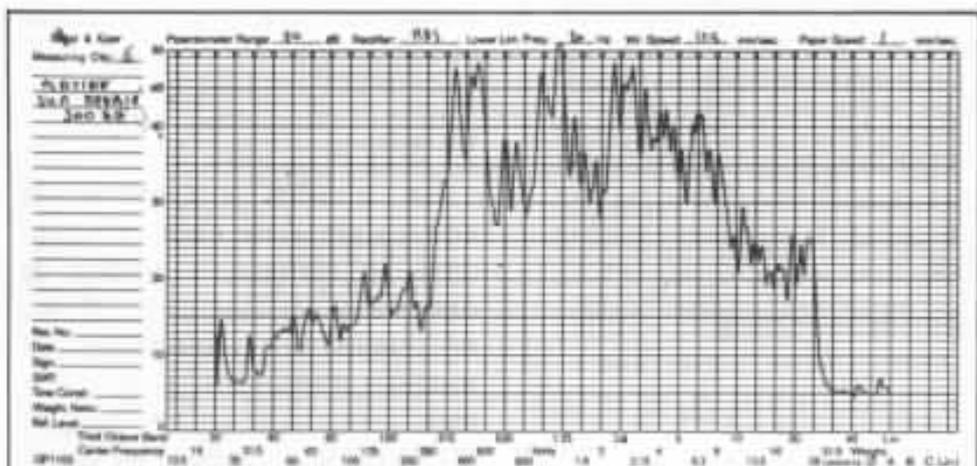
*Platine modifiée à l'aide de barres d'acier, de plomb et de Blackson*



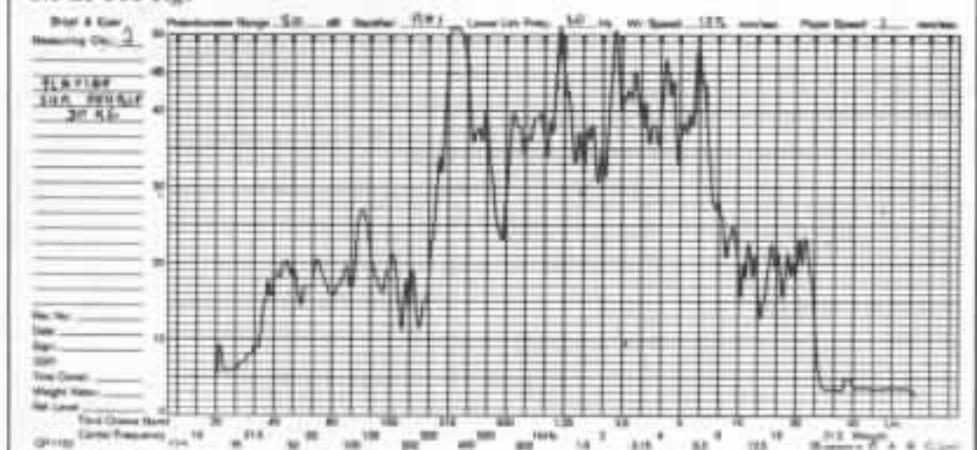
varie entre 3 et 12 décibels en faveur de la platine posée sur le meuble de 300 kg.

On veillera donc lors de l'installation d'une chaîne électro-

acoustique à placer la platine tourne-disque le plus loin des enceintes, et sur le support le plus stable et le moins sujet aux vibrations mécanico-acoustique



Courbe 1: L'accéléromètre est placé à l'avant du socle. La platine est sur un meuble de 300 Kg.



Courbe 2: Mêmes conditions de mesure : position de l'accéléromètre, niveau acoustique, position de l'enceinte, le tourne-disque est placé sur un meuble de 30 Kg.

Fig. 4

## Réalisation des modifications

Sur les photographies de la figure 5 sont représentées différentes versions d'une même platine. Les modifications d'un tourne-disque peuvent être très réduites, ou aller jusqu'à refaire entièrement la platine.

Si le lecteur se contente de légères modifications ; il veillera à ne pas aller trop loin car il pourrait perturber le comportement cinétique de sa platine. Pour le socle beaucoup de choses peuvent être permises. Par contre, pour le plateau et la contre-platine qui sont très sensibles, une exagération peut vite devenir une catastrophe.

## Le socle

L'une des solutions des plus

BUIE de Hollande	1,32
COEUR de Chêne (60 ans)	1,17
EBENE	1,12 à 1,18
GAIAC	1,339

Fig 6 : Densité des bois les plus denses

simples et des plus efficaces consiste à doubler le socle déjà existant de barres d'acier que l'on collera à l'araldite (voir figure 5).

Pour les personnes qui trouveront l'opération délicate, elles pourront se contenter de placer des cubes de bois très durs entre les côtes du socle et le dessus du socle.

La face supérieure du socle sera elle aussi rigidifiée par des barres d'acier. Entre ces barres, on pourra placer du plomb en feuilles et ensuite enduire le tout de Blackson. Il est important de choisir différents matériaux afin d'engendrer des vitesses de propagation différentes.

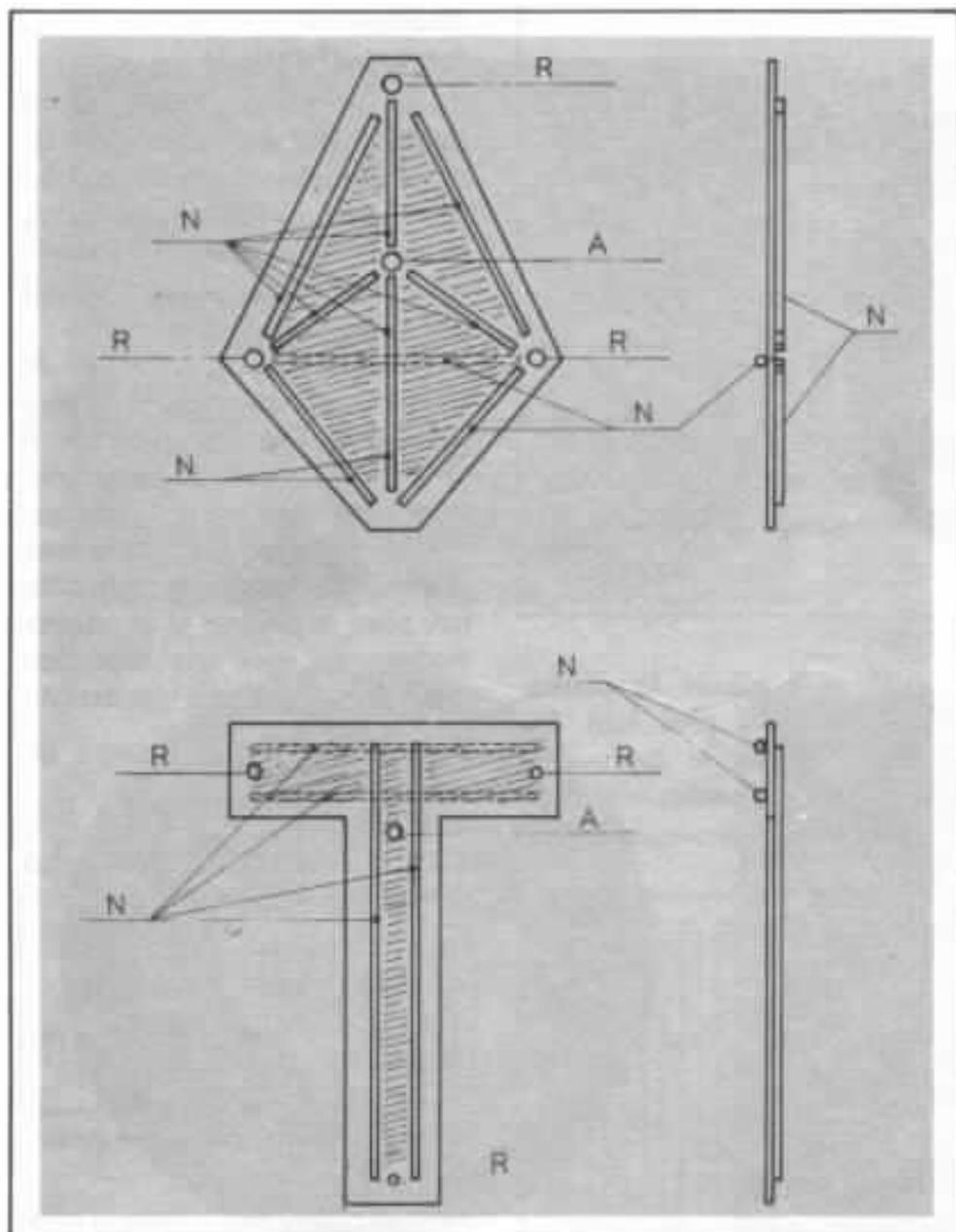


Fig 7 : Formes habituelles de contre-platines : schéma de principe des modifications.

R : Position de la suspension  
 A : Position de l'axe du plateau  
 N : Nervures  
 P : Plomb

En figure 6 le lecteur pourra trouver des bois de densité importante s'il a l'intention de refaire le socle en bois de sa platine.

### La contre-platine

Une bonne contre-platine doit être très rigide et peu sensible aux vibrations parasites. Pour cela il convient de lui adjoindre suivant ses lignes de forces des

ACIER	5000
ALUMINIUM	5105
CHENE	3381
FONTE	3214
HETRE	3340
PLOMB	1230

Fig 8 : Vitesse du son m/s

nervures (voir figure 7). La forme et la nature de ces nervures devront être choisies en tenant compte des propriétés mécaniques de celles-ci. On pourra s'inspirer des données des figures 8, 9, 10 et 11.

Entre ces nervures, on placera une feuille de plomb d'une épaisseur de 0,5 mm et l'on enduira le tout de Blackson, les ressorts de la contre-platine devront être resserrés. Attention, la masse ajoutée lors de cette opération devra être la moins importante possible.

### Le plateau

La qualité des différents couvre-plateaux qui existent dans le commerce oppose de nombreux audiophiles. Il est nécessaire avant d'adopter un modèle, d'essayer tous les systèmes possibles, car si certains d'entre-eux possèdent des qualités d'absorption, ils ont une fâcheuse tendance à devenir de véritables filtres-contours. Une

	Traction	Compression	Cisaillement	Densité
ACIER	42	42	33	7,8
ALLUMINIUM	5	5	4	2,6
BRONZE	2	2,5	1,5	8,8
CHENE	2	1,4	0,1	0,61
DURALUMIN	7,5	7,5	6	2,9
FER	10	10	7	7,2
FONTE	5	10	4	7,1
HETRE	1,2	0,66	0,06	0,8
PIN	0,7	0,44	0,04	0,7
PLOMB	1,3	5		11,37

Fig 9 : Limite élastique des matériaux

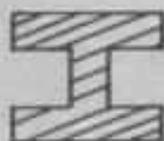
## FLEXION DE LA FONTE



$$R_F = 1,7 RT$$



$$R_F = 2,05 RT$$



$$R_F = 1,45 RT$$

## TORSION DE LA FONTE



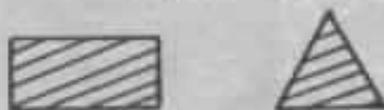
$$R_S = R_T$$



$$R_S = 0,8 R_T \text{ à } R_T$$



$$R_S = 1,4 R_T$$



$$R_S = 1,4 \text{ à } 1,6 R_T$$



$$R_S = 1 \text{ à } 1,25 R_T$$

Fig 10 : Propriétés de la fonte en fonction de sa forme

### Travail de Torsion

V = volume de la barre en mm<sup>3</sup>

t = fatigue maximum de torsion en kg/mm<sup>2</sup>

G = module de cisaillement en kg/mm<sup>2</sup>

T = travail de torsion en kg/mm

Section circulaire

$$T = \frac{t^3 V}{4 G}$$

Section annulaire

$$T = \frac{t^3 V}{4 G} \times \frac{D^3 + d^3}{D^2}$$

Section elliptique

$$T = \frac{t^3 V}{8 G} \times \frac{a^3 + b^3}{a^2} \quad a > b$$

Section rectangulaire

$$T = \frac{4 t^3 V}{45 G} \times \frac{a^3 + b^3}{a^2} \quad a > b$$

Section carrée

$$T = \frac{8 t^3 V}{45 G}$$

### Résistances composées

Fatigue maxima en kg/mm<sup>2</sup>

T<sub>r</sub> = Traction

T<sub>c</sub> = Compression

T<sub>c</sub> = Cisaillement

T<sub>r</sub> = Flexion

T<sub>s</sub> = Torsion

T = Totale

Charges pratiques en kg/mm<sup>2</sup>

R<sub>r</sub> = Traction

R<sub>c</sub> = Compression

R<sub>c</sub> = Cisaillement

R<sub>r</sub> = Flexion

R<sub>s</sub> = Torsion

1) traction et flexion

$$T = T_r + T_r$$

2) compression et flexion

$$T = T_c + T_r$$

3) traction et torsion

$$= 0,35 T_r + 0,65 \sqrt{T_r^2 + 4 a^2 T_s^2} \quad a = \frac{R_r}{1,3 R_s} \quad \leq R_r$$

4) compression et torsion

$$= 0,35 T_c + 0,65 \sqrt{T_c^2 + 4 b^2 T_s^2} \quad b = \frac{R_c}{1,3 R_s} \quad \leq R_r$$

5) traction et cisaillement

$$= 0,35 T_r + 0,65 \sqrt{T_r^2 + 4 c^2 T_s^2} \quad c = \frac{R_r}{1,3 R_c} \quad T \leq R_r$$

6) compression et cisaillement

$$= 0,35 T_c + 0,65 \sqrt{T_c^2 + 4 d^2 T_s^2} \quad d = \frac{R_c}{1,3 R_c} \quad T \leq R_r$$

7) flexion et cisaillement

$$= 0,35 T_r + 0,65 \sqrt{T_r^2 + 4 e^2 T_s^2} \quad e = R_r \quad T < R_r$$

8) flexion et torsion

$$= 0,35 T_r + 0,65 \sqrt{T_r^2 + 4 h^2 T_s^2} \quad h = \frac{R_r}{1,3 R_s} \quad T \leq R_r$$

Fig 11 : Calcul des qualités mécaniques des nervures.

solution simple pour atténuer les vibrations d'un plateau est d'appliquer une couche de Blackson sous le plateau (voir figure 5), on pourra aussi découper une couronne de caoutchouc d'un demi millimètre d'épaisseur à fixer à la colle néoprène que l'on appliquera sous le plateau. Attention à ne pas altérer l'équilibre du plateau.

### Conclusion

Après la lutte contre les vibrations dans l'ensemble bras-

cellule, celle des platines devrait permettre d'améliorer très sensiblement votre système lecture. Les vibrations parasites dans le système de lecture sont responsables de profondes perturbations. Perturbations d'autant plus critiques qu'elles se superposent au signal à un niveau inférieur, ce qui fait que ces vibrations se trouvent masquées lors des mesures traditionnelles. Cependant à l'écoute le son paraît plus aéré, beaucoup plus dynamique et le grave bien plus ferme.

**Page non  
disponible**

# Une vue d'ensemble du système de lecture

## 2ème partie

*John Bicht*

*Traduction Gérard Chrétien*

*Voici le second volet de l'étude de John Bicht sur le système de lecture. Le problème de la platine est analysé sous un angle peu commun, celui des vibrations de structure. Les mesures mises en œuvre révèlent clairement des influences restées quelque peu « mystérieuses », telles que celles des couvre-plateaux. Cette démarche est très intéressante car elle aboutit à l'objectivation d'appréciations subjectives*

### LES PLATINES

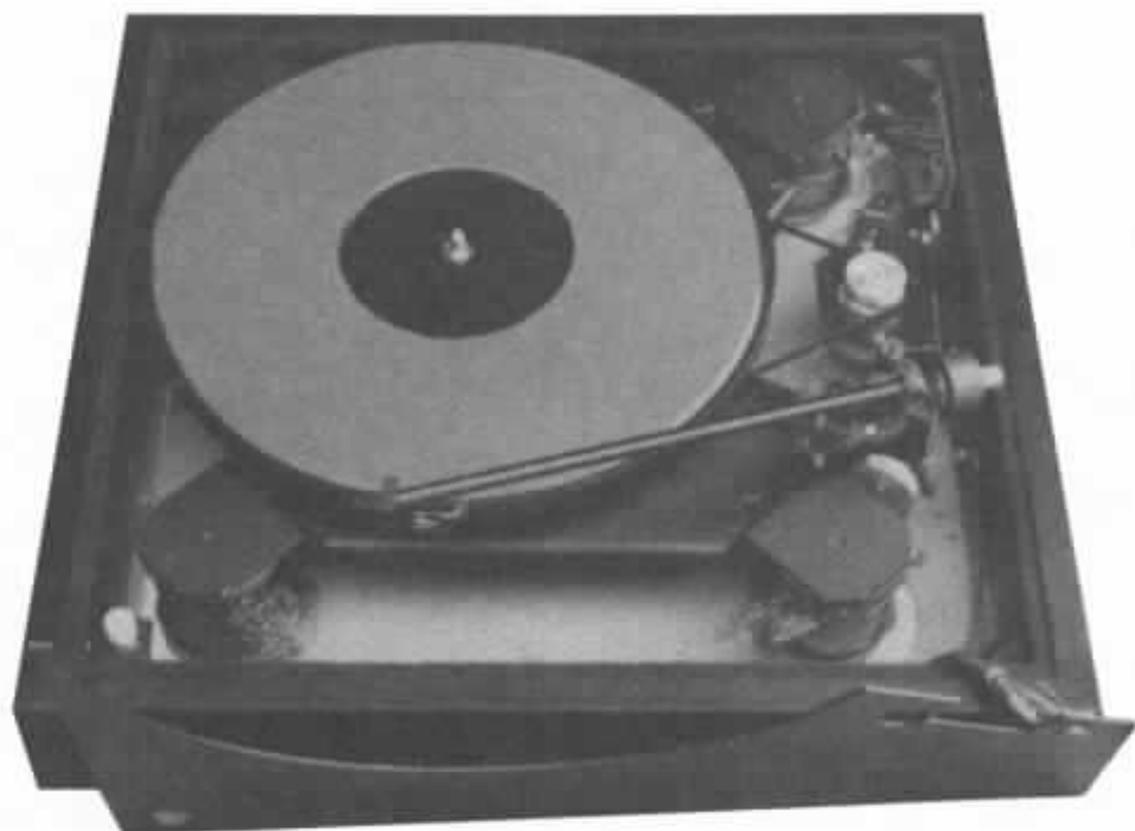
Les vibrations parasites générées par la cellule sollicitent en priorité le bras de lecture. Ce sont ces perturbations qui sont les plus audibles. Il est vrai que la platine, dans sa conception, n'est pas soumise à des restrictions aussi draconiennes que ne l'est le bras de lecture en matière de réduction de masse en particulier. Aussi, les meilleures platines actuelles sont-elles plus près de la perfection.

Néanmoins, malgré la grande variété des platines rencontrées il y a des défauts bien spécifiques qui reviennent fréquemment. C'est ce que nous allons voir.

### Le plateau

L'utilisation d'un couvre plateau est une preuve évidente de l'imperfection des platines. Les différentes appréciations subjectives faites sur les couvre-plateaux ne sont en réalité qu'une évaluation de la platine elle-même. Le seul rôle effectif du couvre-plateau n'est en fait que de masquer les défauts de la platine. Dans l'absolu, nous pensons que le disque devrait reposer sur une substance à élasticité infinie. Il est évident que cela est impossible à atteindre en pratique, cependant le résultat est d'autant meilleur que l'on se rapproche de ce concept. Un

couvre-plateau réalisé dans une substance plus molle que le disque ne peut être satisfaisant. Il est nécessaire de réduire, voire d'annuler, toutes les résonances parasites du système, et de maintenir le disque en contact intime avec le plateau. La méthode la plus efficace de réduction des vibrations de structure est celle procurée par l'amortissement par couche intermédiaire (sandwich), dont le principe est simple. L'élément original, dans notre cas le plateau, est appairé avec un élément de structure identique par l'intermédiaire d'une pellicule d'un polymère à très haute hystérésis placée entre



*Le prototype de la platine utilisée pour les essais. On remarquera la forme particulière de la contre-platine suspendue en quatre points. La « paille » métallique placée dans les ressorts sert à l'amortissement.*

les deux. Le résultat est que tout mouvement en dehors du plan du plateau crée une contrainte opposée par cisaillement. Un tel procédé, s'il est bien réalisé permet de réduire le  $Q$  du système d'une valeur de 200 à une valeur de 2.

Il y a cependant des audiophiles qui pensent qu'une valeur de  $Q$  élevée est préférable, ce n'est pas notre avis et nous allons en montrer les désavantages.

Quiconque a pu observer des signaux musicaux sur un analyseur de spectre de type FFT, sait que la plus large part du message, est contenu dans le bas du spectre.

Aussi on peut penser que tous les signaux composant le message ont une faible probabilité d'exciter la résonance d'un système à  $Q$  élevé, car dans un tel cas l'énergie à fournir au système est plus élevée. En pratique, cependant, cela ne semble pas être le cas. Nous pensons qu'en

fait, l'enveloppe de toutes les fréquences rentrant en jeu dans la résonance d'un système tel que le nôtre, est assez étendue et que, par ailleurs, c'est la nature même d'un oscillateur que de débiter sur sa propre fréquence avant de s'accorder sur la fréquence d'excitation.

Les effets d'un système à  $Q$  très élevé seraient désastreux dans tous les cas.

A 100 Hz une valeur de  $Q$  de 100 implique une durée de 1 seconde pour une atténuation de 30 dB après l'extinction de l'excitation ; à 1 KHz, il faut encore 110 ms pour toujours 30 dB d'atténuation.

Une valeur de  $Q = 2$  cependant procure déjà une amplitude inférieure de 34 dB à la résonance et ne prend que 4 s à 100 Hz et 0,4 ms à 1 KHz pour une atténuation totale, de plus l'accentuation initiale n'est que de 6 dB.

### **Le pivot**

Pour la platine comme pour le bras de lecture, un des problèmes les plus délicats réside dans la conception du pivot. La pratique courante dans les réalisations de qualité est d'utiliser un axe en acier rectifié, reposant en un point sur une surface en métal pressé. Bien que ce soit une excellente solution, le support vertical est habituellement une gaine en plastique avec un léger jeu sur le pourtour de l'axe. Le bain d'huile contenu dans le pivot est supposé former un film hydrodynamique venant compenser ce jeu. Malheureusement la pression et la vitesse de rotation sont toutes deux insuffisantes pour satisfaire cette condition. Cela est mis en évidence par le fait que l'accroissement de la viscosité améliore le rendu sonore du système.

Pour une réalisation sans compromis cette solution est inadaptée. Il est possible d'adopter le

même type de roulement que celui utilisé pour le bras, c'est-à-dire avec une compensation de jeu intégrée. Il doit être de dimension beaucoup plus conséquente et soulève nombre de difficultés. Néanmoins les performances qu'un tel type de roulement permet d'atteindre en valent la peine.

Nous avons maintenant établi la chaîne de connexions complète depuis le disque, la cellule jusqu'à notre terre miniature. (cf 1ère partie). L'utilisation d'un support en métal plein suffisamment rigide permet de refermer le « circuit » du pivot jusqu'au bras.

Les masses relatives mises en jeu dans le système affectent les performances. Nous discuterons de ce point un peu plus loin lorsque les données de mesures auront été introduites.

### Isolation mécanique

Le rôle de la suspension est d'atténuer les vibrations externes dans les deux directions et d'offrir une réponse qui approche d'aussi près que possible



*John Bicht et Gérard Chrétien*

celle d'un système à un seul degré de liberté.

Compte tenu des très basses fréquences d'excitation d'une part et de la fréquence de résonance de l'ensemble bras-cellule d'autre part, nous devons tendre vers une fréquence de résonance de la suspension aussi basse que possible. De plus la valeur du Q

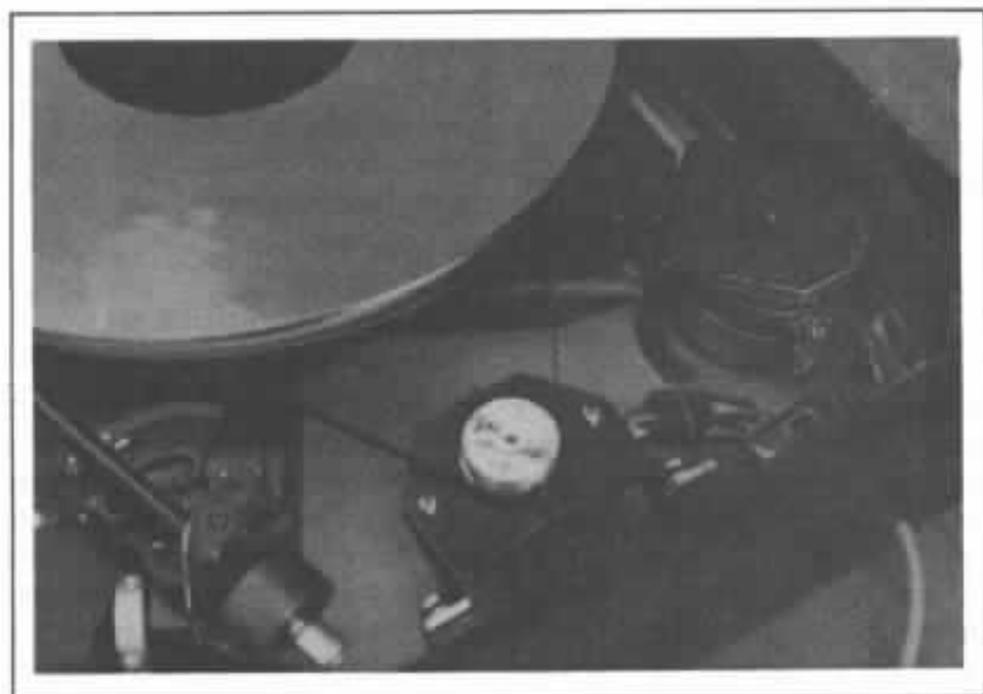
du système gagnera à être très élevée pour offrir les meilleures performances. Cependant, c'est inévitable, il y a des limitations pratiques à ces critères théoriques.

Les déflexions statiques de la suspension augmentent exponentiellement lorsque la fréquence baisse. Les dimensions des ressorts utilisés doivent être choisies en conséquence. Pour obtenir un système stable à 2,5 Hz avec quatre ressorts, ceux-ci doivent avoir un diamètre de 50 mm et 92 mm de longueur au repos dont 42 mm servent à la déflexion statique. De telles dimensions rentrent dans les limites acceptables.

Les différences de performance d'une suspension à plusieurs degrés de liberté en comparaison avec un système à un seul degré de liberté sont mises en évidence par l'examen du tracé du comportement physique. Un système tridimensionnel implique six directions possibles. Tout déséquilibre de la structure provoque des couplages qui s'accompagnent de déplacements dans des directions privilégiées. Par exemple un mouvement dans un plan qui correspond à l'excitation, sera suivi d'un mouvement dans un autre plan par couplage. De plus les fréquences naturelles d'oscillation de chacun des différents modes sont plus délicates à contrôler et peuvent être plus de cinq fois supérieures à ce qu'il pouvait être escompté. Cela se traduit, sur le spectre du comportement vibratoire, par toute une série d'harmoniques qui font que le système se comporte comme si la fréquence à laquelle il a été conçu était plus élevée.

Les exigences théoriques sont aisées à définir.

— Le centre de gravité de



*Détail de l'entraînement et d'un point de suspension.*

l'ensemble doit, dans l'idéal, être à la même hauteur que le centre des ressorts, soit dans leur plan médian.

— Les ressorts doivent être aussi éloignés que possible, en étant équidistants, du centre de gravité.

— La raideur horizontale des ressorts doit être au moins aussi élevée que la raideur verticale. Le calcul permet de déterminer aisément les autres paramètres tels que la fréquence d'oscillation naturelle dans le sens vertical, la masse et les dimensions de l'ensemble. Les règles de l'art résident dans la détermination des éléments de base autour desquels s'effectuera le design de l'ensemble.

Les matériaux élastiques, utilisés dans des applications d'isolation mécanique, sont nombreux. Cependant les limitations inhérentes, à la plupart de ces matériaux restreignent notre choix, compte tenu de la plage de fréquences impartie à un système métal-air. Le principe du coussin d'air offre des avantages théoriques évidents, néanmoins sa mise en application à notre niveau implique des développements beaucoup trop coûteux.

Il est pratiquement possible d'atteindre l'idéal avec des ressorts hélicoïdaux, aussi les « systèmes à air » ne méritent peut-être pas à notre avis tout l'intérêt qu'on leur porte.

La plupart des constructeurs actuels équipent leur platine d'un système d'amortissement, certains sont tout à fait inefficaces. Le pire exemple est donné par les pieds amortisseurs réalisés dans un polymère très amorti. Les très faibles débattements autorisés entraînent une fréquence de résonance trop élevée - un débattement de 1 mm correspond approximativement

à une résonance de 15,7 Hz. L'isolation aux fréquences plus élevées est limitée. De plus, un fort amortissement est indispensable pour prévenir tout accrochage dans la bande de résonance de l'ensemble bras-cellule. Certaines approximations suffisamment proches de la théorie sont envisageables, avec toutefois des limitations quant à leur efficacité. La méthode la plus courante consiste à utiliser trois ressorts dans les platines utilisant une contre-platine suspendue. Elle permet un ajustement vertical pour s'adapter à la masse du bras utilisé ainsi qu'un centrage de la contre-platine suspendue. La fonction réelle de ce dernier réglage est en réalité de faire tendre les lignes de force effectives vers le centre de gravité, procurant ainsi l'effet d'un positionnement de ressort meilleur qu'il n'est en réalité.

Malheureusement cela limite la plage de fonctionnement car chacun des ressorts travaille sous des déflexions et des angles différents.

La meilleure méthode pour s'affranchir des différents poids de bras de lecture est de prévoir des masses additives de sorte à ce que le centre de gravité et la répartition des masses restent inchangés.

### **Le socle**

Une solution économique pour limiter l'accrochage acoustique est d'avoir recours à un socle de masse élevée. Cette idée, simple, repose sur le fait qu'en augmentant la masse à mettre en mouvement, les chances d'apparition de perturbation sont diminuées d'autant. Bien que cela soit vrai en théorie, il faut voir que la platine repose sur un support, le plancher via une table en

général. Et, qu'en comparaison avec la masse de celui-ci, la masse propre de la platine est presque insignifiante.

L'expérience montre que pour améliorer les performances dans un rapport deux, il est nécessaire de doubler la masse de l'ensemble platine, support, plancher !

Ce qui se passe fréquemment est, que lorsque la platine repose sur une table relativement légère, cette dernière est plus facilement influencée par le poids de la platine si bien que les vibrations inhérentes à la table sont moins sensibles.

### **Positionnement du bras**

Il y a plusieurs autres petits raffinements possibles autour du schéma proposé. Le bras entre autre est soumis à des forces inertielles lorsque des vibrations le traversent, aussi doit-il être positionné de la manière la plus avantageuse qui soit. Il n'y a rien à faire en ce qui concerne les moments d'excitation verticale. Cependant dans le plan horizontal il est possible de déplacer le point d'attache du bras de lecture sur la contre-platine. Il s'avère que les excitations parasites sont prédominantes dans l'axe avant-arrière de la platine. Cela nous a conduit à positionner le bras de sorte que l'axe du tube soit dans le plan des mouvements au milieu du rayon du disque (cf photo). Le bras se trouve ainsi beaucoup moins sollicité dans le plan latéral.

La masse propre du ressort est un point qui n'a pas été abordé dans notre discussion. Le centre de gravité d'un ressort se trouve placé à mi-distance, suivant qu'il travaille en compression ou en extension.

Aussi le ressort ne se

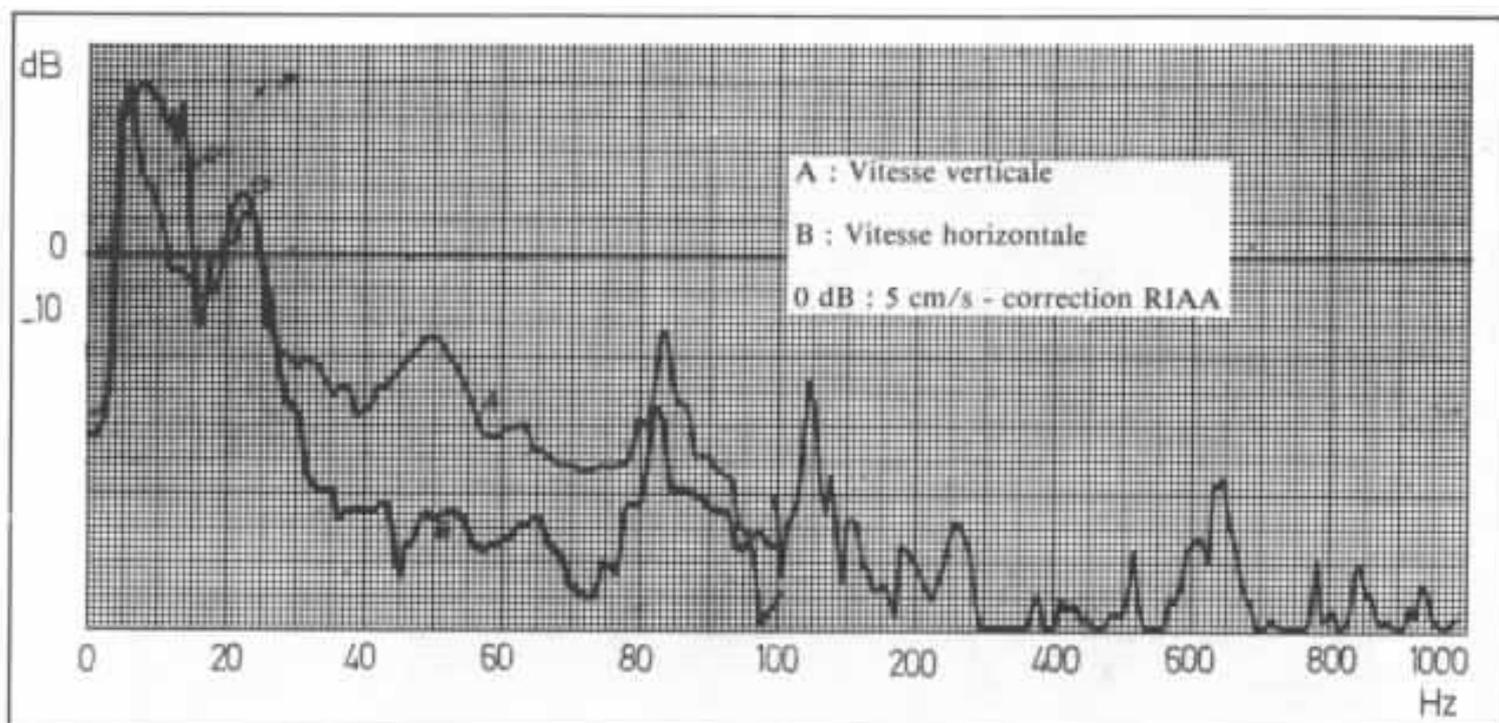


Fig 10 : Excitation par le support. La platine repose sur une table dans une pièce où sont installés deux haut-parleurs. Un micro est placé sur le plateau face aux enceintes acoustiques. Un accéléromètre repose sur le dessus de la table, un autre sur la tranche. La pièce est excitée par un balayage lent en fréquence sinusoïdale, le niveau atteint 100 dB SPL en crête.

Le signal de sortie du micro est envoyé sur le canal 1 de l'analyseur, il constitue la référence, offrant une tension d'entrée simulée constante par rapport à la vitesse de vibration obtenue après intégration du signal délivré par l'accéléromètre.

comporte-t-il pas, comme dans l'idéal, en isolateur sans masse. Dans la réalité il rentrera lui-même en oscillation. Le comportement est lié au rapport existant entre la masse du ressort et la masse suspendue. Dans notre cas, en ayant recours aux ressorts les plus légers possibles, les résonances prennent naissance entre 100 et 200 Hz. Celles-ci peuvent être amorties, car les perturbations qu'elles introduisent posent un problème. Cependant il faut prendre garde à éviter d'amortir le système complet. Il est fréquent que des compensations locales, placées en série ou en parallèle dans le but d'une correction agissent dans un sens qui n'était pas escompté au niveau du comportement global de l'ensemble.

L'excitation par voie aérienne de l'ensemble de lecture est un problème moins grave. Heureusement d'ailleurs, car il n'y a pas

de remède simple. Elle ne se manifeste que pour des niveaux élevés et des zones de fréquences étroites. De plus ce type d'excitation n'est pas propagé par un oscillateur tel qu'un plancher pour la propagation par voie solide.

Les solutions efficaces à ce problème coûtent en fait plus chères à fabriquer qu'une suspension. La meilleure méthode consiste en un boîtier étanche de masse élevée ayant des résonances propres réduites. La notion d'étanchéité est très importante car la transmission par voie aérienne est très influencée par les fuites d'air avec les dispersions qu'elles entraînent. Les joints souples ne sont cependant pas recommandés à cause de la masse élevée qu'ils auraient à supporter. Certains ont pu avancer que le fait de placer le système de lecture dans un boîtier étanche aurait des consé-

quences fâcheuses sur son amortissement. Cependant, ce qui va à l'encontre de la mise en œuvre d'un tel procédé est principalement son prix de revient compte tenu de la très faible amélioration procurée.

Quant aux capots en plexiglass, fournis habituellement avec la platine, sans joint de fixation, nous dirons qu'il vaut mieux s'en passer car ils résonnent beaucoup trop et que les résultats sont meilleurs sans leur utilisation.

## Mesures

### Excitation de la platine

La figure 10 est un tracé des vitesses de vibrations recueillies dans le sens vertical (A) et le sens horizontal (B) sur un support de platine tel qu'il est commun d'en rencontrer.

Dans ce cas, le niveau 0 dB correspond à une vitesse de 5 cm/s :

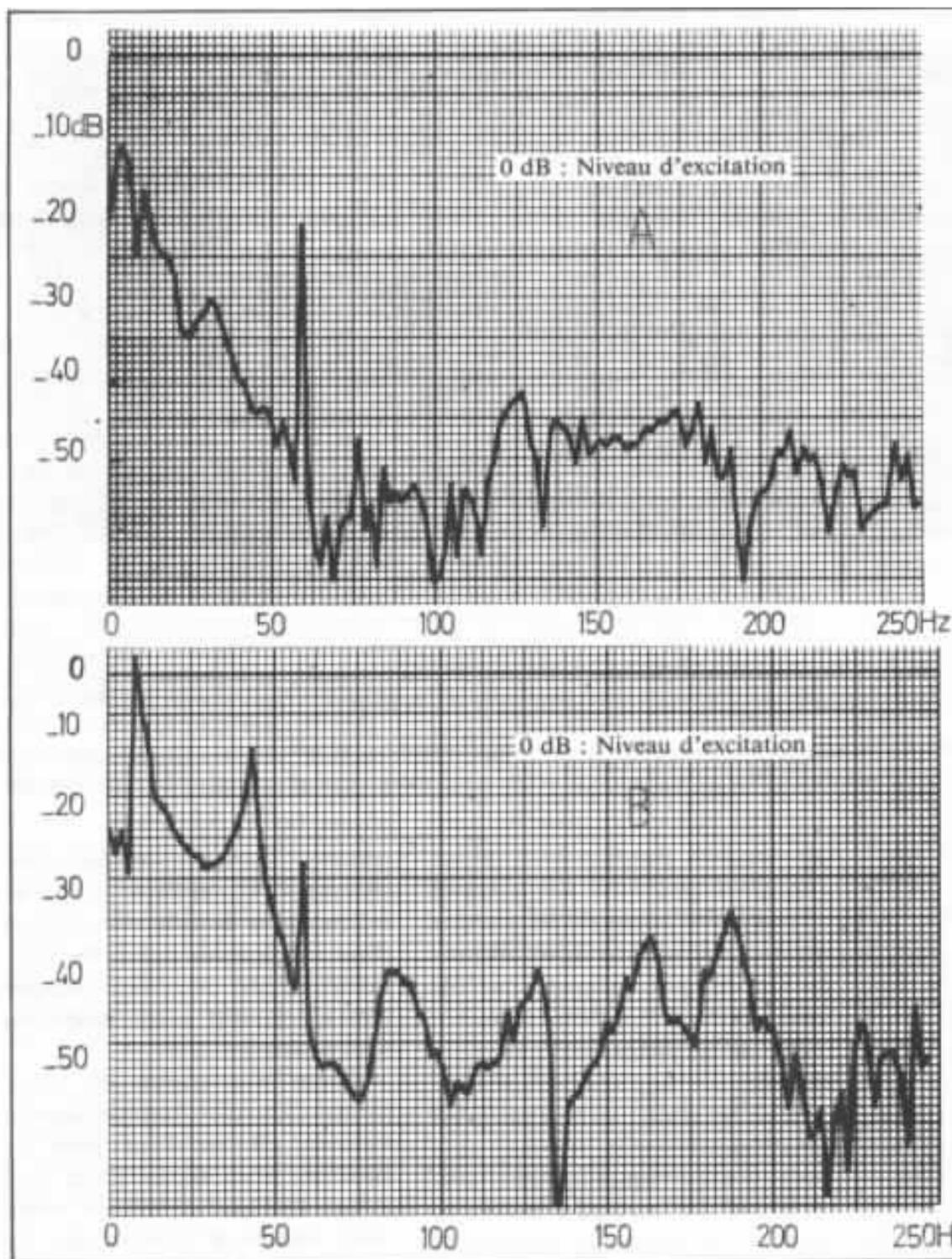


Fig 11 et 12 : Efficacité de la suspension pour la platine A et B. Les deux platines sont posées sur un support horizontal en bois lequel est excité sur la paroi inférieure.

Un accéléromètre est fixé sur la surface en bois, le signal qu'il délivre correspond à l'excitation reçue par la platine (canal 1), l'autre accéléromètre est placé sur la trajectoire du diamant. La courbe donne la différence entre les deux signaux fournis par les accéléromètres.

Le signal étant corrigé suivant l'égalisation RIAA par l'étage préamplificateur, les fréquences basses suivent donc cette compensation. Les niveaux de vibrations recueillis sont proportionnels à la pression acoustique qui dans le cas présent était de 100 dB SPL.

Au delà de 100 Hz, la vitesse de vibration horizontale se trouve à - 55 dB, aussi, pour la clarté du tracé, elle n'est pas

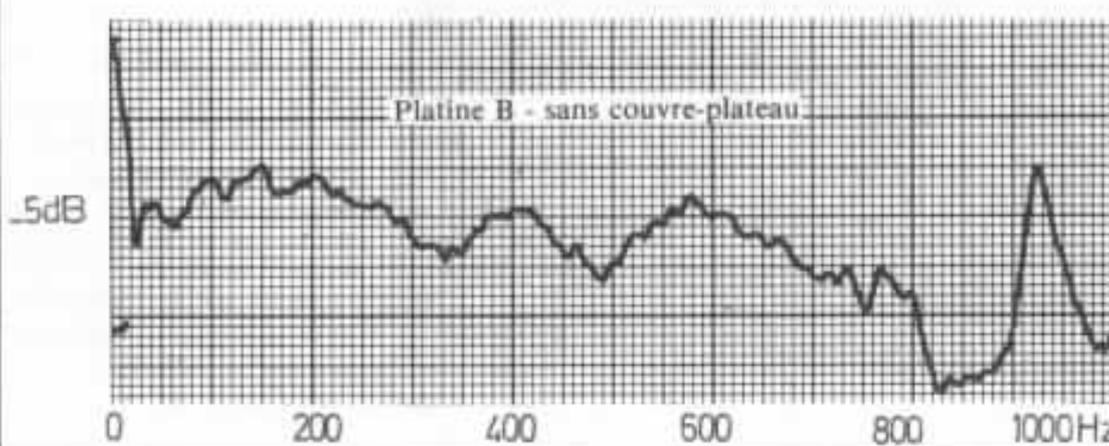
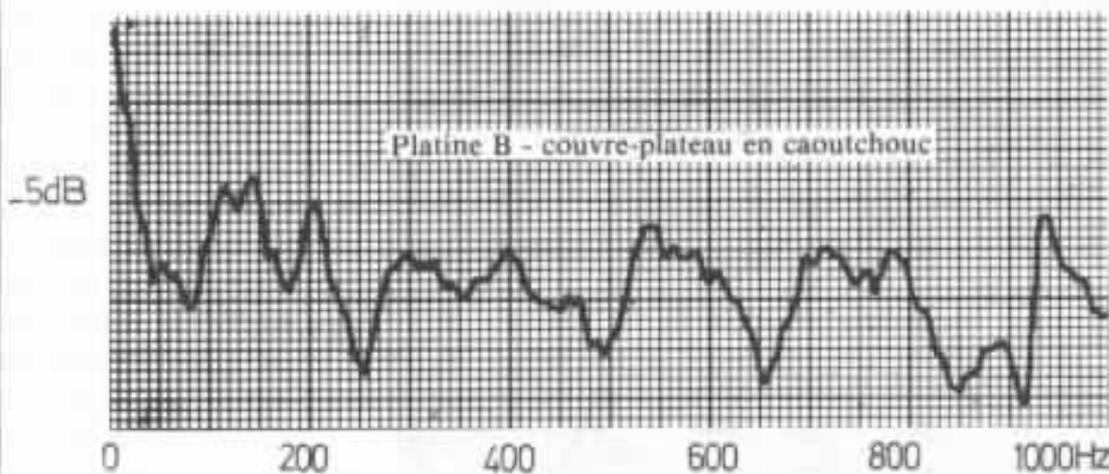
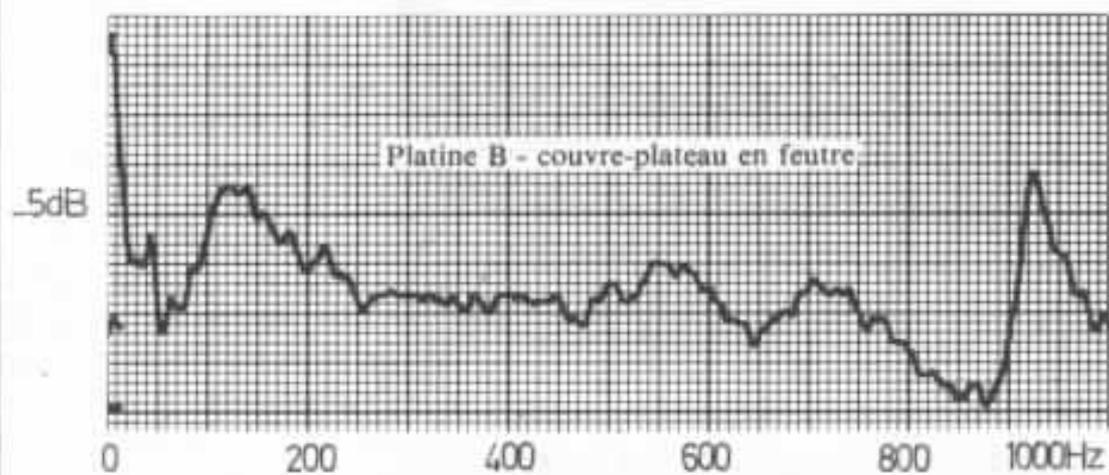
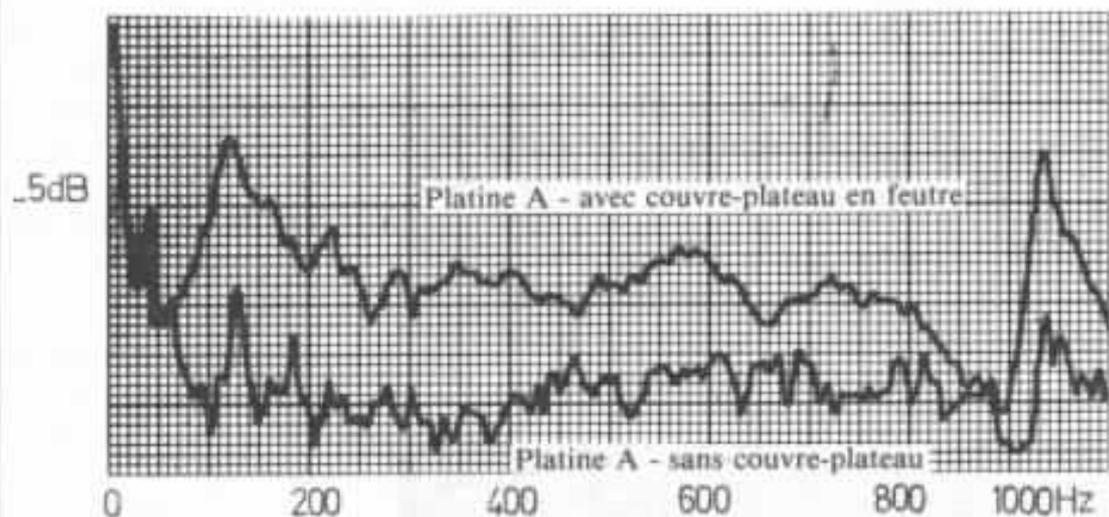
représentée. Les résultats en dessous de 20 Hz ne doivent pas être pris en compte, car notre système d'excitation dans cette zone n'était pas correct et notre équipement de mesure donnait un bruit de fond supérieur au signal d'excitation.

Les enseignements que l'on peut tirer de cette mesure sont nombreux. Elle révèle tout d'abord la nécessité d'une suspension très élaborée, que beau-

coup considèrent à tort comme un luxe. L'amplitude des niveaux recueillis est, en réalité, très importante.

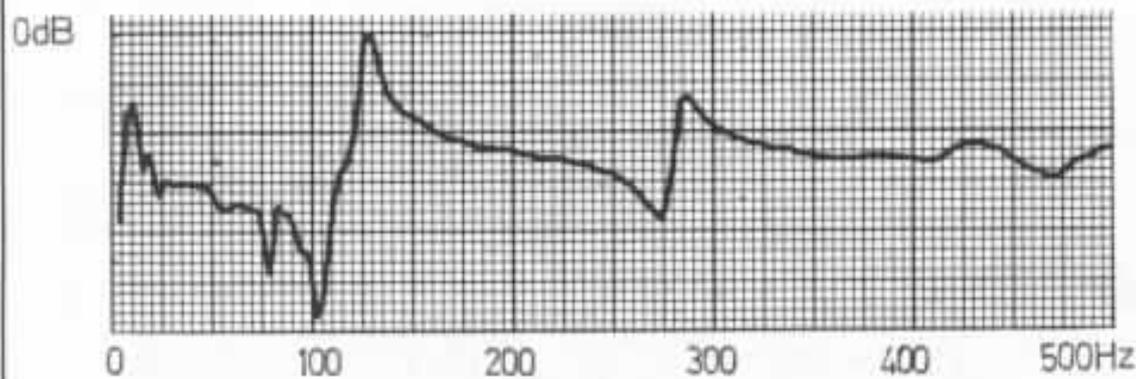
Les pics observés ont plusieurs causes. Nous pensons qu'à 20 Hz il s'agit d'une résonance du plancher dont la résonance fondamentale se situe sans aucun doute beaucoup plus bas.

La bosse observée à 50 Hz sur la courbe A de l'excitation verticale revient vraisemblablement à

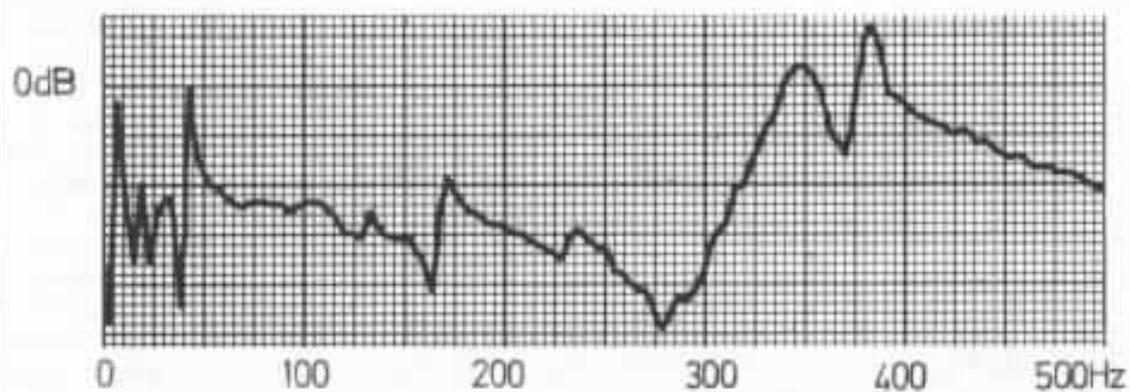
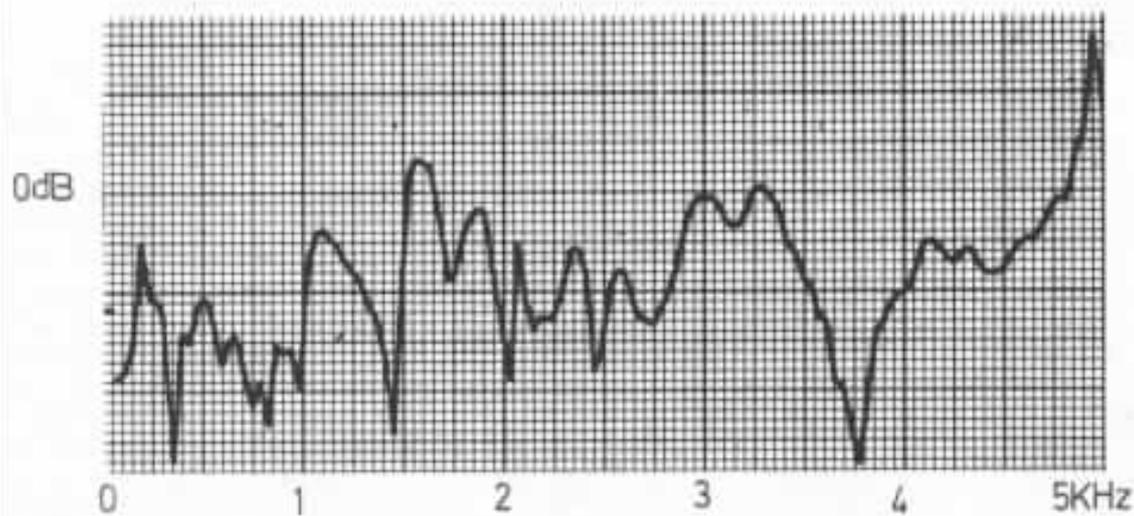


Réf. : 5 cm/s -  
pas de correction RIAA

Fig 13, 14, 15 et 16 : Excitation en situation de lecture par le diamant. Pour cela plusieurs disques furent joués de sorte à exciter les résonances de l'ensemble de la platine via le plateau. Le signal recueilli sur le disque par un accéléromètre (en mode vitesse) a été mémorisé. Ce signal alimente un exciteur très léger placé sur le disque à l'arrêt de sorte à produire le même niveau de vibration de l'ensemble de lecture. Un accéléromètre placé 58 mm de l'exciteur délivre le signal enregistré sur un seul des canaux de l'analyseur. En théorie on pourrait penser que le capteur doit être placé aussi près que possible de l'exciteur pour se rapprocher des conditions réelles d'utilisation, où la cellule joue le double rôle de capteur et d'exciteur. Pourtant, dans le cas présent le poids de l'exciteur est tel qu'il crée une pression artificielle sur le disque. C'est la raison pour laquelle l'accéléromètre a été dégagé de 58 mm. De plus, de par sa masse, l'exciteur est relativement isolé des vibrations, le signal qu'il fournit est uniforme en amplitude si bien qu'un seul canal de l'analyseur a été suffisant, il n'était pas nécessaire d'effectuer une différenciation dans ce cas.



Platine A



Platine B

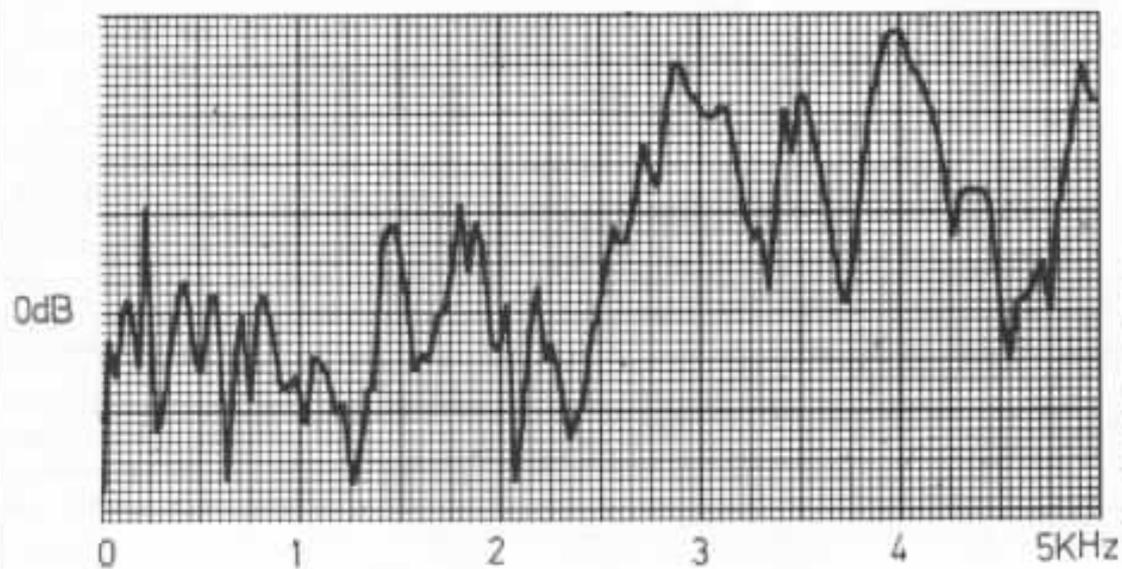


Fig 17 et 18 : Résultats mettant en évidence l'évolution de l'impédance mécanique pour les deux platines A et B, dans les bandes 0-500 Hz et 0-5 kHz. Pour les conditions expérimentales se référer au texte.

la partie supérieure de notre support.

Quant au pic situé à 83 Hz, il ne peut s'agir que de suppositions. A notre avis, il provient d'un mode de vibration de rang plus élevé de la structure du plancher.

#### *Réponse de la platine aux sollicitations externes.*

Les figures 11 et 12 mettent en évidence le comportement de deux bonnes platines. La figure 11 donne les résultats obtenus avec notre prototype de platine (A), en figure 12 il s'agit de la platine (B) dont nous avons parlé lors de la 1ère partie (fig 1 et 2). L'excitation employée était différente de celle recueillie sur le support dans le cas de la figure 10, de sorte à pouvoir analyser le comportement réel de la suspension. Dans le cas présent, c'est le support qui était excité directement dans le sens vertical. Le signal recueilli à mi-rayon sur le plateau est référencé au signal d'excitation.

Les pics observés à 60 Hz ne doivent pas être pris en compte, ils proviennent d'une anomalie de notre système de test due à une perturbation du secteur. Il faut noter également que notre appareillage de test ne procure des résultats significatifs que jusqu'à 8 Hz.

Les deux platines, répétons-le, sont des réalisations de très haute qualité. Les différences manifestes qui apparaissent n'ont cependant rien de commun avec les écarts que l'on aurait obtenu avec des platines plus standard.

Chacune des deux platines révèle dans la bande 100-200 Hz, des perturbations introduites par les ressorts de la platine.

La platine A est cependant

amortie. La différence majeure apparaît dans la zone la plus critique des très basses fréquences.

La platine B présente deux pics de résonance très marqués, hormis le pic à 60 Hz.

La résonance à 8 Hz peut provenir tout simplement de la fréquence de résonance plus élevée de la suspension de cette platine. Nous avons effectué divers réglages sur cette suspension, qui le permet, sans que les résultats soient beaucoup plus convaincants.

Quoiqu'il en soit si l'on examine ces graphes en corrélation avec ceux de la figure 10 qui représente, rappelons le, l'excitation à laquelle est soumise une platine dans des conditions réelles d'utilisation, il est évident que la meilleure des suspensions laisse encore à désirer !

#### *Mise en évidence de l'influence du couvre-plateau*

Les figures suivantes illustrent les relations masse-rigidité que l'on rencontre dans les divers éléments constitutifs d'un système de lecture. Pour obtenir les figures 13, 14, 15 et 16 nous avons procédé de la façon suivante. Tout d'abord nous avons enregistré le niveau de vibrations reçu par le disque lorsqu'il est lu. Ensuite il était possible d'utiliser ce stimulus pour exciter le disque posé sur le plateau immobile, et ainsi, de pouvoir effectuer des mesures qui puissent être comparatives, telles que celles de l'effet des couvre-plateaux.

Les résultats-recueillis dans ce cas ne sont pas corrigés suivant la norme RIAA. Cela, naturellement, signifie que dans la réalité le niveau du signal en basse fréquence est plus important qu'il n'y paraît sur les courbes.

En figure 13, nous avons uti-

lisé la platine A successivement avec un fin couvre-plateau de feutre, courbe supérieure, et sans couvre-plateau, courbe inférieure. Bien que le disque ne soit pas en contact intime en tous points du plateau, à cause d'un léger voile, le plateau nu donne de meilleurs résultats à toutes les fréquences.

Les courbes corrélient l'impression subjective d'un son plus chaud, voire plus agréable mais indéniablement moins détaillé et dynamique, dans le cas de l'utilisation du couvre-plateau en feutre.

La platine B a été employée pour les trois autres figures 14, 15 et 16 successivement avec un couvre-plateau en feutre, un couvre-plateau en caoutchouc et sans couvre-plateau. Compte tenu des différences observées entre les deux couvre-plateaux et des variations de la courbe de réponse rencontrées d'une pièce d'écoute à une autre, il est facile de comprendre que le couvre-plateau en feutre soit préféré pour l'équilibre qu'il procure. Les résultats varient aussi d'un disque à l'autre suivant son épaisseur, sa planéité et son contenu musical...

Toutefois l'allure générale de la courbe reste la même.

La figure 16 montre clairement qu'il est préférable d'utiliser un couvre-plateau avec une platine conçue pour fonctionner dans ces conditions.

#### *Impédance mécanique de la platine*

En dessous du plateau, l'amplitude des vibrations est déterminée par d'autres combinaisons masse-rigidité. Nous continuerons de nous référer à l'impédance, c'est un terme plus familier. Il faut cependant bien voir que les tracés de la réponse

découlent d'un paramètre inverse, la mobilité.

Pour ce qui est du plateau, dans notre cas il se comporte en masse suspendue avec une impédance décroissante depuis 0 Hz jusqu'à la fréquence de résonance, à partir de laquelle la masse totale devient dominante avec une impédance croissante avec la fréquence. Croissance qui continue jusqu'à ce que la rigidité du roulement intervienne, c'est-à-dire qu'il ne se comporte plus comme une « terre ». Alors le pivot devient le facteur limitatif, provoquant une chute d'impédance jusqu'à ce que l'impédance de masse du plateau redevienne dominante.

L'impédance continue donc à croître jusqu'à ce que la poulie et la courroie découpent. A ce stade le plateau n'intervient plus, du moins directement, car un peu plus haut en fréquence, ses modes de résonances parasites apparaissent. La fréquence fondamentale de résonance est d'autant plus élevée que le plateau est rigide. L'impédance avant l'apparition des premiers modes de résonance est d'autant plus élevée que la masse du plateau est élevée...

Il ressort que deux facteurs sont dominants : la rigidité de l'axe de pivotement et la masse pratique utilisable.

Les figures 17 et 18 mettent cela en évidence pour les deux platines. Elles ont été obtenues de la même manière que les courbes 13 à 16, si ce n'est que l'excitateur était placé sur le plateau nu, et un des capteurs très près de celui-ci. Un autre capteur était placé sur la masse en mouvement de l'excitateur de sorte à avoir une référence précise, l'analyseur étant utilisé dans ce cas sur ces deux canaux pour délivrer le signal de différence.

Le niveau 0 dB correspond à la vitesse d'excitation et la courbe à la vitesse relevée sur le plateau.

Alors que l'impédance croît, la courbe décroît et inversement.

De 0 à 500 Hz pour la platine A, les phénomènes escomptés apparaissent clairement. A l'exception, toutefois, des limitations inhérentes à l'excitation masquant la résonance de la suspension qui se manifeste à 2,6 Hz.

A 100 Hz, la masse totale cesse d'être l'élément dominant pour la rigidité de l'axe de roulement.

A 130 Hz, la masse du plateau prend le « relais » jusqu'à 275 Hz, fréquence à partir de laquelle la poulie et la courroie découpent.

Le processus n'est pas aussi évident en figure 18, sur la platine B. En se reportant à la conception de celle-ci, certaines hypothèses permettent d'avancer des explications. Le pic à 8 Hz comme on a pu le voir précédemment est lié à une résonance de suspension trop élevée. Aux alentours de 40 Hz, la masse totale de la platine, bien inférieure au modèle A, cesse d'intervenir pour la rigidité de l'élément de roulement. Nous pensons que le premier mode du plateau se manifeste à 360 Hz.

Sur les tracés, dans la bande 0-5 kHz, la différence de construction entre les deux plateaux devient très apparente. Sur la courbe relative à la platine B on distingue immédiatement l'importance capitale du couvre-plateau, le niveau recueilli devient supérieur de 20 à 25 dB sur l'excitation à 3, 3,5, 4 et 5 kHz.

Dans tous ces tests, un grand soin a été pris pour prévenir tout accrochage entre accéléromètre câbles et préamplificateurs, ainsi

que toute cause perturbatrice. Les résultats doivent être considérés comme tenant dans la fourchette 1 dB, - 3 dB suivant les tests et la procédure utilisée. Les expériences utilisant des cellules posèrent de gros problèmes quant à leur répétitivité ; à ce sujet, les cellules semblent avoir des caractéristiques qui varient considérablement en fonction de la température, de la durée durant laquelle elles sont soumises aux vibrations. L'effet doit provenir d'une élévation de la température interne.

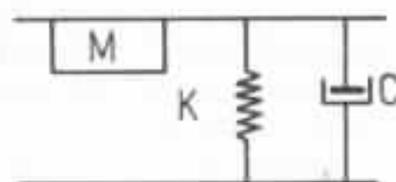
Ainsi se termine le tour d'horizon de John Bicht sur le système de lecture. Le lecteur encore sceptique quant à l'influence audible de la table de lecture aura trouvé dans ces lignes sujets à réflexion. Nous insistons encore sur le fait que les résultats comparatifs obtenus déjà suffisamment édifiants, sont issus de tests sur deux platines dont l'une était notre prototype et l'autre, répétons-le, l'une des meilleures (si ce n'est la meilleure) platines du marché. Les écarts auraient été beaucoup plus marqués encore avec des platines plus conventionnelles.

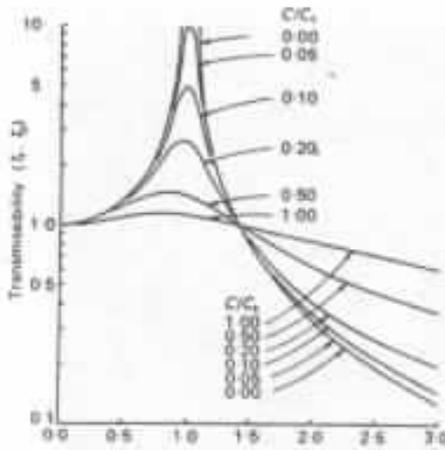
## ANNEXE

Voici quelques notions sur les systèmes résonnants qui aideront le lecteur à mieux comprendre la démarche théorique.

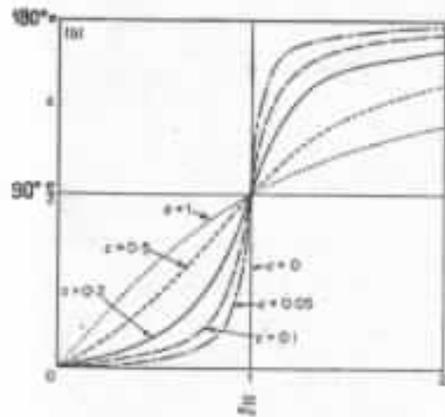
### A - Système à un seul degré de liberté

Un système masse-ressort avec amortissement n'autorisant des mouvements que dans une seule direction.





Variation de l'amplitude à la résonance pour divers amortissements. Système un seul degré de liberté.



Variation de la phase pour divers amortissements.

Les graphes montrent la transmission depuis la base jusqu'à la masse, en amplitude et en phase pour diverses valeurs d'amortissement.

$C_C$  : amortissement critique  
 $C$  : amortissement du système

$$\frac{C}{C_C} = \frac{1}{Q}, \text{ un } Q \text{ de } 10 = 0,05 \frac{C}{C_C}$$

La fréquence de résonance propre est donnée par :

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad K : \text{rigidité} \quad M : \text{masse}$$

$$\text{ou } F = 15,77 \sqrt{\frac{1}{D}}$$

$D$  : déflexion statique

### B - Cas de n oscillateurs couplés

Une barre d'un matériau uniforme se comporte comme si elle

était composée d'un nombre infini d'oscillateurs. Ces vibrations caractéristiques sont déterminées par les conditions aux extrémités (fixées, libres ou pivotantes), la masse par unité de longueur, le module d'Young (caractéristique de la rigidité du matériau) et le module de section (la rigidité est liée à la forme). Les fréquences de résonances sont référencées au numéro de mode de vibration. Chaque mode est défini par le nombre de nœuds et de ventres de vibration, (points de vibration nulle et maximum sur la barre).

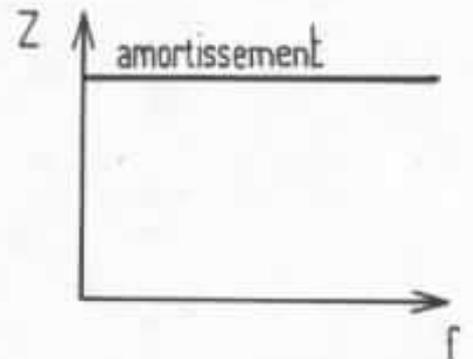
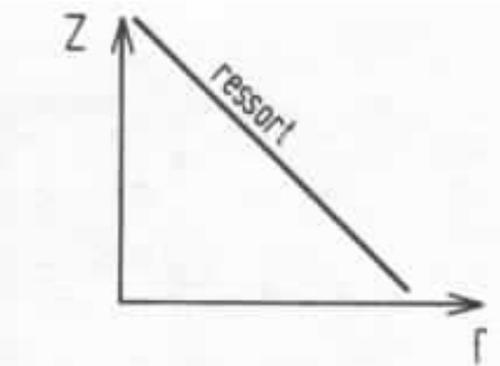
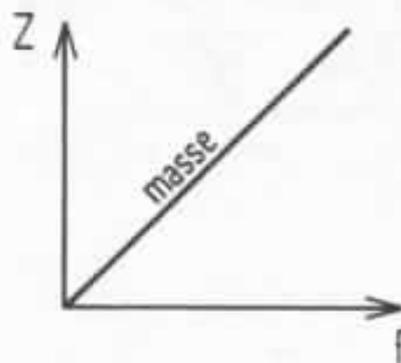
La transmission au sein de la barre n'est pas affectée si ce n'est aux fréquences de résonances où la forme de chacun des modes placera les extrémités dans des conditions différentes.

Les cas A et B peuvent naturellement se combiner. Par exemple, un système comportant une masse à une extrémité libre d'une tige combinera les caractéristiques d'un système simple et de n oscillateurs couplés.

### C - Impédance mécanique

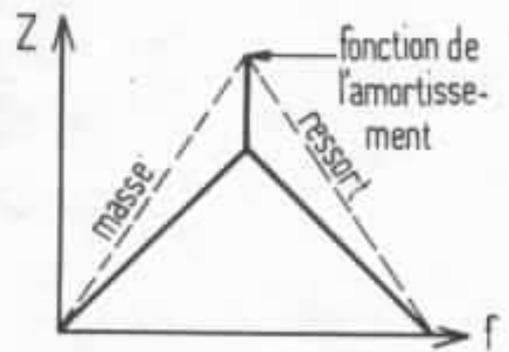
$$Z \text{ impédance} = \frac{\text{Force}}{\text{Vitesse}}$$

$$M \text{ mobilité} = \frac{\text{Vitesse}}{\text{Force}}$$



Le comportement dynamique est essentiel en audio. L'amplitude des mouvements de vibration sont liés à la rigidité (inverse de l'élasticité) du ressort, à la valeur de la masse et de l'amortissement. Plus chacun de ces facteurs est élevé et plus l'amplitude du mouvement est réduite.

La résonance prend naissance à l'intersection de chacune des courbes d'impédance masse-ressort. L'amplitude à la résonance dépend de l'amortissement. Pour un système du 1<sup>er</sup> degré les pentes sont de 6 dB/octave.



**Page non  
disponible**

# Optimalisation d'un bass-reflex sur calculatrice HP 97

Michel Alard

Jacques Mahul a montré dans le précédent numéro comment Snyder avait résolu de manière particulièrement élégante le problème de la détermination théorique de la courbe de réponse d'un bass-reflex. Les calculatrices programmables rendent désormais possible le calcul direct de ces courbes et permettent d'envisager une réelle optimalisation de l'enceinte.

A.N. Thiele a été le premier à poser le problème du bass-reflex dans sa réelle dimension et à appliquer les méthodes de synthèse de filtres au domaine de l'acoustique. Avant lui, le réglage d'un bass-reflex était fait de manière extrêmement empirique : on se contentait généralement d'accorder la fréquence de résonance de l'évent sur celle du haut-parleur. Depuis, Small, Keele et Snyder ont largement ouvert le champ de ces investigations. Cependant, on retrouve à la base de leurs travaux un dénominateur commun : la modélisation du bass-reflex sous forme de circuit acoustique, sujet auquel nous consacrons la 1<sup>re</sup> partie de cet article.

## MODELISATION DU BASS-REFLEX

### Impédances électriques et mécaniques

Le classique réseau RLC va nous permettre d'illustrer ces différentes notions. Dans le cas de la Figure 1, on peut écrire :

$$(1) \quad E = \frac{L di}{dt} + Ri + \int \frac{Idt}{C}$$

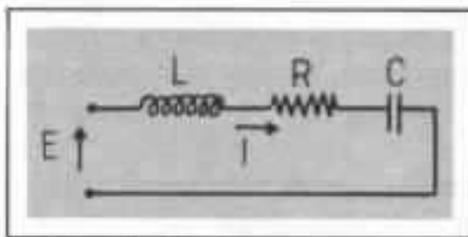


Fig 1 : Circuit RLC

Considérons maintenant un haut-parleur dont la membrane a

pour masse  $M_{ms}$ , dont la suspension a pour compliance  $C_{ms}$  (l'inverse de la raideur) et pour résistance mécanique  $R_{ms}$  (amortissement du type visqueux). Ce système est régi par l'équation (2) :

$$(2) \quad F = M_{ms} \gamma + R_{ms} v + \frac{x}{C_{ms}}$$

où  $F$  est la force appliquée à la membrane,  $x$  son déplacement,  $v$  sa vitesse et  $\gamma$  son accélération. L'équation (2) peut aussi s'écrire :

$$(3) \quad F = M_{ms} \frac{dv}{dt} + R_{ms} v + \int \frac{vdt}{C_{ms}}$$

Sous cette forme, la similitude entre (1) et (3) devient évidente, et justifie le fait que l'on puisse

représenter le haut-parleur comme un circuit mécanique où force et vitesse sont les équivalents de la tension et du courant dans un circuit électrique (Fig.2).

Naturellement l'analogie va beaucoup plus loin que ce simple exemple. En particulier, la puissance  $P$  s'exprime dans le cas du continu :

$$P = E \cdot I \quad \text{et} \quad P = F \cdot v$$

Si l'on s'intéresse à des excitations sinusoïdales du type  $E = E_0 e^{j\omega t}$  ou  $F = F_0 e^{j\omega t}$  (notées sous forme complexe), on peut définir les impédances complexes électrique et mécanique :

$$(4) \quad Z_e = \frac{E}{I} \quad \text{et} \quad Z_m = \frac{F}{v}$$

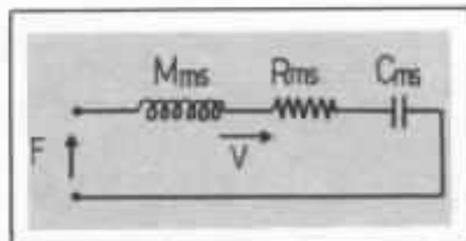


Fig 2 : Analogie électrique du haut-parleur

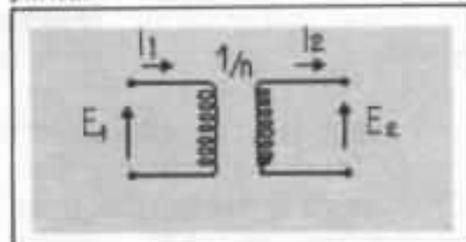


Fig3 : Représentation du transformateur

On sait en particulier que l'impédance d'une self  $L$  est  $Z_e = jL\omega$ , celle d'une capacité  $C$  :  $Z_e = 1/jC\omega$ . De même l'impédance mécanique d'une masse  $M_{ms}$  est  $Z_m = jM_{ms}\omega$  et celle d'une compliance  $C_{ms}$  :  $Z_m = 1/jC_{ms}\omega$ .

### Impédance acoustique

Si la mécanique fait appel à la notion de force, on utilise plutôt en acoustique la notion de pression. Il est donc intéressant de construire un système où les grandeurs de base ne soient plus

force et vitesse ( $F$  et  $v$ ), mais leurs équivalents acoustiques pression et vélocité volumique ( $p$  et  $u$ ) définis par :

$$(5) \quad \begin{cases} p = F/S \\ u = v \times S \end{cases}$$

Ces équations ne sont pas sans rappeler celles d'un transformateur (fig.3) :

$$\begin{cases} E_2 = n E_1 \\ I_2 = I_1/n \end{cases}$$

Cette représentation nous permet de passer facilement du circuit mécanique au circuit acoustique (Fig.4). Une impédance  $Z_m$  dans le circuit mécanique sera vue dans le circuit acoustique comme une impédance  $Z_a$  définie par :

$$(6) \quad Z_a = \frac{p}{u} = \frac{1}{S^2} \frac{F}{v} = \frac{Z_m}{S^2}$$

Ainsi les notions de masse, de résistance et de compliance acoustique sont définies par :

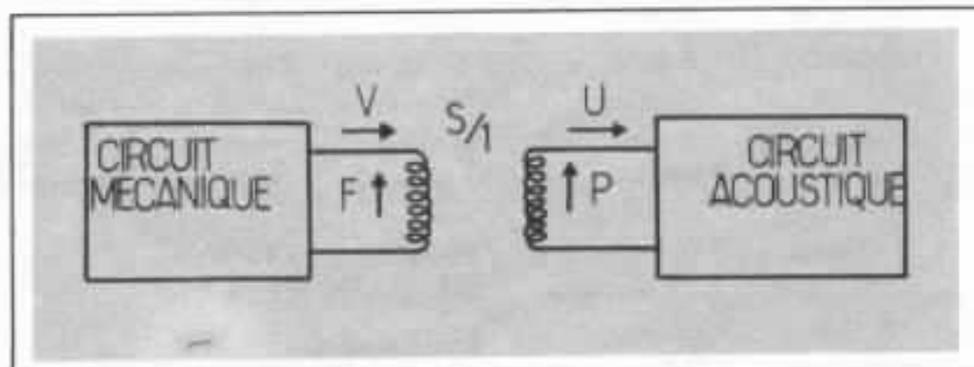


Fig 4 : Transformation mécanique-acoustique

$$(7) \quad \begin{cases} M_{as} = M_{ms}/Sd^2 \\ R_{as} = R_{ms}/Sd^2 \\ C_{as} = C_{ms} \times Sd^2 \end{cases}$$

$Sd$  étant la surface rayonnante utile de la membrane ( $d$  pour « diaphragm »). Cependant, les impédances acoustiques ne dérivent pas toutes d'impédances mécaniques.

### Impédance de rayonnement d'un haut-parleur

Le haut-parleur est un système vibrant qui rayonne de l'énergie sous forme acoustique. On peut

calculer son « impédance de rayonnement » en l'assimilant à un piston plan dans un baffle infini. Ce calcul fait intervenir les fonctions de Bessel. La figure 5 montre la partie réelle  $R_{ar}$  et la partie imaginaire  $X_{ar}$  de l'impédance de rayonnement. On remarque que lorsque la longueur d'onde est grande par rapport au périmètre  $a$  du piston (ce qui sera le cas aux basses fréquences), on a :

$$(8) \quad R_{ar} = 2 \pi f^2 \rho_0 / C$$

Connaissant cette résistance, on déduit la puissance acoustique rayonnée (9)  $P_{ar} = R_{ar} U^2$ , formule qui équivaut en électricité à la relation  $P = R I^2$ .

### Compliance acoustique d'un volume d'air

Il est bien connu que le volume d'air emprisonné dans une

enceinte close se comporte aux basses fréquences comme un « ressort » et joue un rôle tout à fait comparable à celui de la suspension du haut-parleur. On calcule aisément la compliance acoustique de l'enceinte  $C_{ab}$  ( $b$  pour « box » en considérant que la compression de l'air est adiabatique. On trouve :

$$(10) \quad C_{ab} = \frac{V_b}{\rho_0 C^2}$$

$V_b$  étant le volume de l'enceinte,  $\rho_0$  la masse volumique de l'air et  $c$  la célérité du son dans l'air.

## Masse acoustique d'un event

Un event de surface  $S_v$  ( $v$  pour « vent ») et de longueur  $l_v$  représente une masse d'air  $M_{mv} = \rho_0 l_v S_v$ . On en déduit d'après (7) la masse acoustique correspondante :

$$(11) \quad M_{av} = \frac{\rho_0 l_v}{S_v}$$

## La charge bass-reflex

Ces deux derniers exemples nous permettent de modéliser de façon simple une charge du type bass-reflex (Cf fig.6). En effet la vitesse volumique  $U_c$  ( $c$  pour « cone ») due au mouvement du haut-parleur se répartit de la façon suivante. Une partie de l'air déplacé reste dans le volume de l'enceinte et se trouve comprimé par la membrane, l'autre partie  $U_p$  ( $p$  pour « port ») étant chassée par l'évent et mettant en mouvement la masse d'air contenue dans ce dernier. On peut d'ailleurs calculer d'après ce modèle la puissance acoustique rayonnée par le bass-reflex. La vitesse volumique totale est égale à la différence  $U_p - U_c$  ( $U_p$  résultant de l'onde arrière du haut-parleur). Finalement, la puissance acoustique rayonnée  $P_{ar}$  vaut (cf (9)) :

$$(12) \quad P_{ar} = R_{ar} |U_c - U_p|^2$$

Ce même modèle permet de calculer la fréquence d'accord d'un bass-reflex : de même que la fréquence de résonance d'un circuit LC est  $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ , celle du bass-reflex :

$$f_b = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_{av} C_{ab}}}$$

soit, en remplaçant  $M_{av}$  et  $C_{ab}$  par leur valeur (10 et 11)

$$(13) \quad f_b = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_v}{l_v V_b}}$$

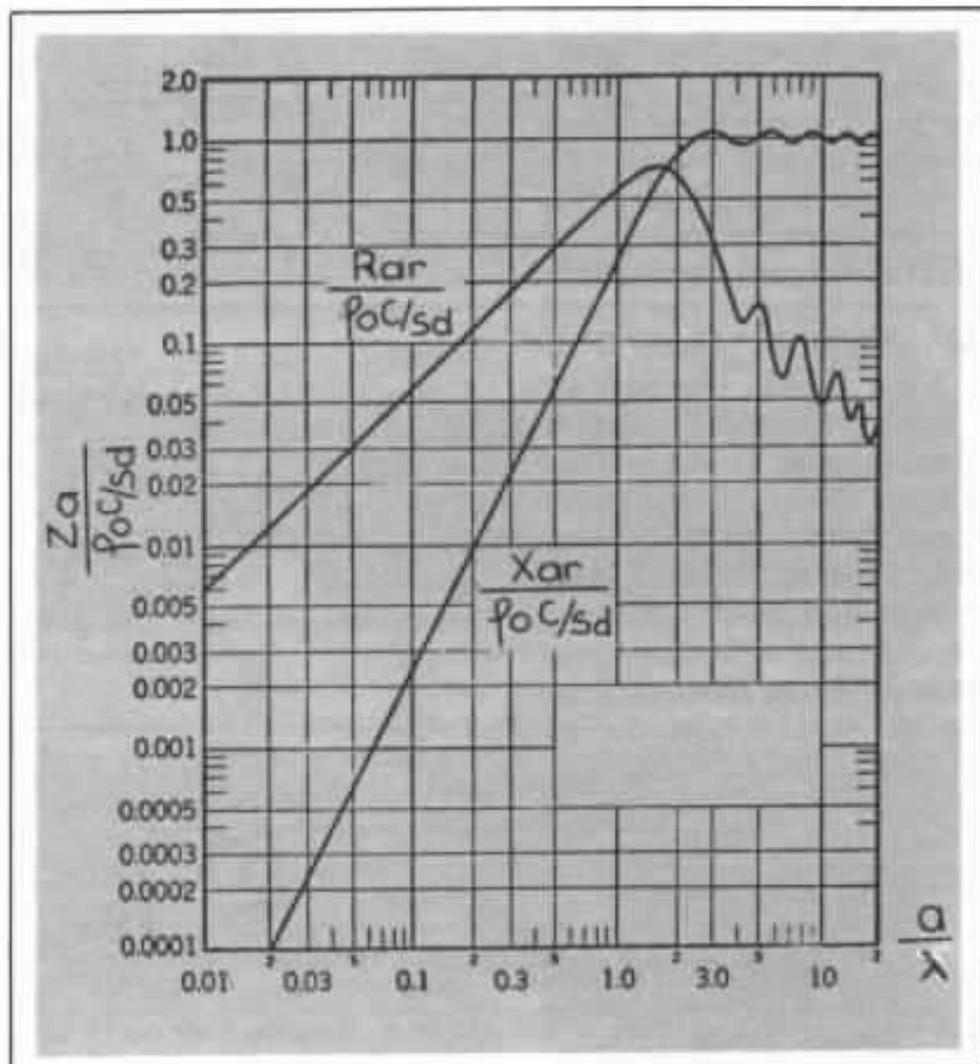


Fig 5 : Parties réelle et imaginaire de l'impédance de rayonnement.

## Modélisation du haut-parleur

Le fonctionnement d'un haut-parleur est régi par les équations :

$$(14) \quad \begin{cases} F = BLI \\ E = BLv \end{cases}$$

$F$  étant la force exercée lorsque la bobine est traversée par un courant  $I$ ,  $E$  étant la force contre

électromotrice due au déplacement de la membrane à une vitesse  $v$  et  $BL$  étant le facteur de force du haut-parleur.

Ces deux équations (qui sont celles d'un gyrateur, élément classique de la théorie des réseaux) montrent qu'il est aisé de passer du circuit électrique (où l'on considère les grandeurs  $E$  et  $I$ ) au circuit mécanique ( $F$  et

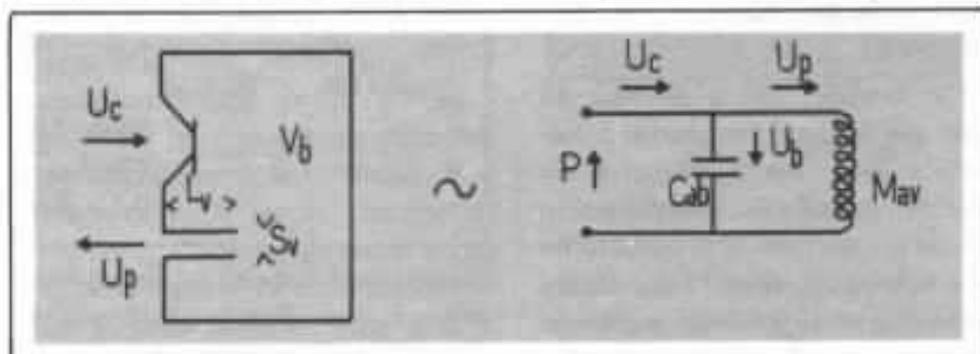


Fig 6 : La charge bass-reflex

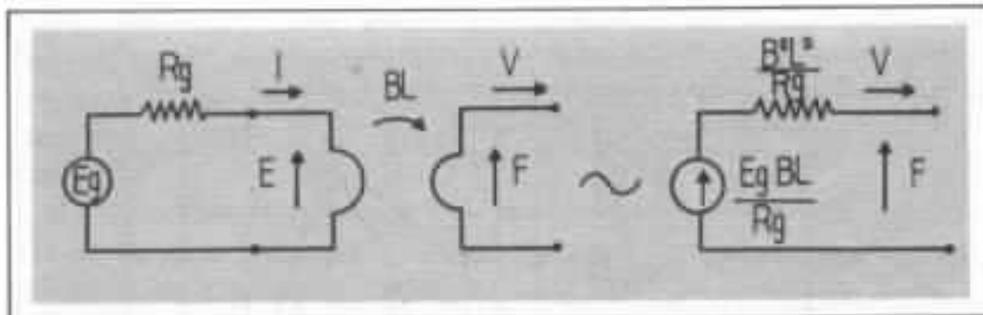


Fig 7 : Modélisation du haut-parleur

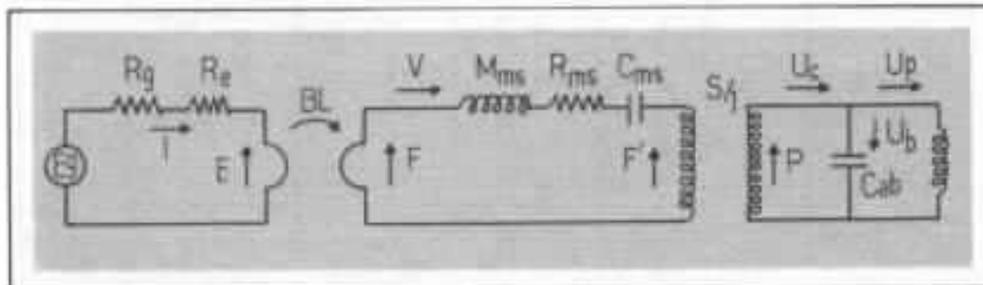


Fig 8 : Modèle de Thiele

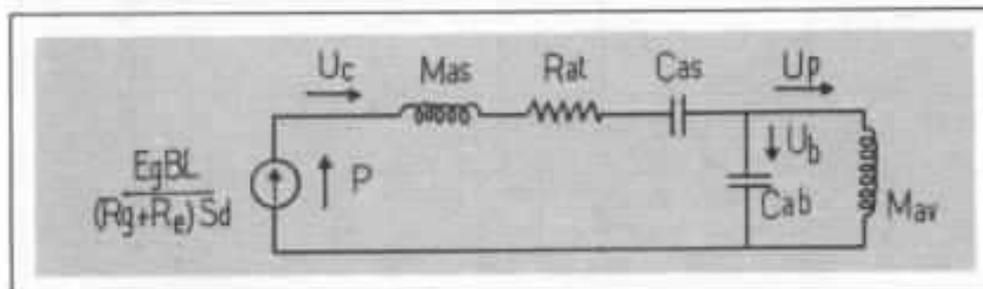


Fig 9 : Modèle simplifié

v) (voir fig.7). En particulier, on peut représenter un générateur de force électromotrice  $E_g$  et de résistance interne  $R_g$  par un générateur de force  $E_g BL/R_g$  et de résistance mécanique interne  $B^2 L^2 / R_g$  dans le circuit mécanique, ou encore par un générateur de pression  $E_g BL/R_g S_d$  et de résistance acoustique interne  $B^2 L^2 / R_g S_d^2$  dans le circuit acoustique.

### Le modèle de Thiele (Figure 8)

Ce modèle, qui n'est rien de plus que la juxtaposition des éléments que nous venons de décrire, appelle un certain nombre de remarques. Il n'est valable que si le haut-parleur fonctionne en piston et si les dimensions de l'enceinte sont faibles par rapport à la longueur d'onde. Ce

qui nous fixe une fréquence limite supérieure d'environ 200 Hz. D'autre part, il peut paraître surprenant que les résistances de rayonnement du haut-parleur et de l'évent n'interviennent pas, puisqu'elles sont à l'origine de la puissance acoustique rayonnée. Cependant, ces résistances sont faibles et peuvent être négligées dans le calcul des vitesses volumiques. Ceci explique au passage que le rendement d'un système à radiation

$$\text{et (18) } E_{(p)} = \frac{p^2 M_{as} M_{av} C_{as} C_{ab}}{p^4 M_{as} M_{av} C_{as} C_{ab} + p^3 M_{av} C_{as} C_{ab} R_{at} + p^2 (M_{as} C_{as} + M_{av} C_{as} + M_{av} C_{ab}) + p C_{as} R_{at} + 1}$$

directe (par opposition aux systèmes à pavillon) ne dépasse jamais quelques pourcents.

Les éléments électriques et

mécaniques de ce circuit peuvent être représentés par leur équivalent acoustique, ce qui nous mène à la représentation simplifiée de la figure 9. Les résistances en série  $R_g$  et  $R_e$  (résistance en continu du haut-parleur) sont remplacées par  $R_{ae} = B^2 L^2 / (R_g + R_e) S_d^2$ . On posera  $R_{at} = R_{ae} + R_{as}$ .

Connaissant  $U_c$  et  $U_p$ , on peut calculer la puissance acoustique rayonnée d'après (12). Il convient de préciser que Thiele a considéré que l'impédance de rayonnement du haut-parleur était celle d'un piston au bout d'un tube infini. Le haut-parleur rayonnant dans  $4\pi$  stéradians au lieu de  $2\pi$ , cette impédance est la moitié de celle qui est donnée par la relation (8).

La puissance électrique reçue peut être estimée en assimilant l'impédance nominale du haut-parleur à sa résistance en continu :

$$(15) \quad P_e = E_g^2 R_e / (R_g + R_e)^2$$

Le rendement global du système (qui est fonction de la fréquence) sera le rapport  $P_{ar} / P_e$  avec :

$$(16) \quad \eta = \eta_0 |E_{(p)}|^2$$

$\eta_0$  étant le rendement et  $E_{(p)}$  une fonction de la variable complexe  $p = j\omega$ . On trouve :

$$(17) \quad \eta_0 = \frac{\rho_0}{2\pi c} \frac{B^2 L^2 S_d^2}{R_e M_{ms}^2}$$

Ces expressions peuvent être allégées en utilisant les paramètres du haut-parleur et de l'enceinte :

$$\begin{aligned}
 f_s &= 1/2\pi\sqrt{M_{as}C_{as}} & V_b &= C_{ab}q_0C^2 & Q_m &= \frac{1}{R_{as}}\sqrt{\frac{M_{as}}{C_{as}}} \\
 f_b &= 1/2\pi\sqrt{M_{av}C_{ab}} & V_{as} &= C_{as}q_0C^2 & Q_e &= \frac{1}{R_{ae}}\sqrt{\frac{M_{as}}{C_{as}}} \\
 h &= f_b/f_s & \alpha &= \frac{V_{as}}{V_b} & Q_t &= \frac{1}{R_{at}}\sqrt{\frac{M_{as}}{C_{as}}}
 \end{aligned}$$

On trouve finalement :

$$(19) \quad \eta_0 = \frac{4\pi^2}{C^3} \frac{f_s^3 V_{as}}{Q_{es}}$$

$Q_{es}$  étant la valeur de  $Q_e$  lorsque l'impédance de sortie de l'amplificateur est nulle. La constante  $4\pi^2/C^3$  vaut  $9,64 \cdot 10^{-7}$ .

La réponse du système exprimée en dB devient :

$$(20) \quad E(Z) = -10 \log. [1 + A_1 Z + A_2 Z^2 + A_3 Z^3 + Z^4]$$

avec  $Z = fbfs/f$ :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= a_1^2 - 2a_2 \\
 A_2 &= a_2^2 + 2 - 2a_1 a_3 \\
 A_3 &= a_3^2 - 2a_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{et } a_1 &= 1/\sqrt{h} Q_t \\
 a_2 &= h + (1 + \alpha) / h \\
 a_3 &= \sqrt{h}/Q_t
 \end{aligned}$$

## LE PROGRAMME SUR HP 97

Le modèle que nous avons choisi est un peu plus complexe que celui de Thiele, puisqu'il tient compte des pertes dans l'enceinte : matériaux absorbants, amortissement de l'évent, défauts d'étanchéité. Small a démontré que ces pertes avaient des effets sensiblement comparables sur la courbe de réponse. On peut donc les assimiler à des pertes d'étanchéité, celles-ci étant généralement prépondérantes. Cette dernière remarque peut surprendre, les enceintes actuelles étant bien conçues sur ce point. En fait, les défauts d'étanchéité proviennent du haut-

parleur lui-même (fixation, porosité de la membrane et du cache noyau...). Nous avons fait comme Snyder l'hypothèse  $Q_b = 7$ . L'expression de la réponse du bass-reflex reste valable (20), mais les paramètres  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$  diffèrent légèrement :

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{1}{\sqrt{h}Q_t} + \frac{\sqrt{h}}{Q_b} \\
 (21) \quad a_2 &= h + \frac{1 + \alpha}{h} + \frac{1}{Q_b Q_t} \\
 a_3 &= \frac{\sqrt{h}}{Q_t} + \frac{1}{\sqrt{h}Q_b}
 \end{aligned}$$

Le programme comporte 2 cartes magnétiques. Signalons qu'il est parfaitement possible d'utiliser ces cartes sur la HP 67 ou sur la nouvelle HP 41 C. Pour cette dernière, cependant, il serait préférable d'écrire un programme spécifique plus performant.

## Ondulations de la courbe de réponse

Le calcul point par point par la formule (20) est naturellement possible mais d'un intérêt limité : il faut en effet tracer la réponse complète pour pouvoir apprécier sa linéarité. Nous avons mis au point un programme permettant de déterminer rapidement les « bosses » et les « creux » de la courbe de réponse. Ce programme n'a pas la prétention d'être le plus simple ou le plus rapide, mais il a le mérite de pouvoir résoudre les cas les plus critiques. Nous

n'avons pour notre part jamais réussi à le prendre en défaut. Le principe de son fonctionnement est le suivant : il apparaît dans l'expression (20) un polynôme  $p(Z)$  du 4<sup>e</sup> degré. Le programme calcule les racines réelles positives de l'équation  $p'(Z) = 0$  et en déduit les différents extremums de la courbe de réponse. Leur nombre peut aller de 0 à 3. Le calculateur donne pour chaque extremum la fréquence (à 0,1 Hz) et le niveau (à 0,01 dB près). Cette précision est naturellement illusoire mais elle facilite les comparaisons entre deux alignements. Les résultats sont imprimés mais restent également en mémoire à la fin du programme (registres  $R_4$ - $R_5$ ,  $R_6$ - $R_7$ ,  $R_8$ - $R_9$ ).

## — Utilisation du programme

- charger la première carte dans le calculateur.
- charger les registres :

$f_b$	→	RA
$f_s$	→	RB
$Q_t$	→	RC
$V_b$	→	RD
$V_{as}$	→	RE

- appuyer sur la touche  $\boxed{A}$  : déroulement du programme et impression des résultats.
- le chiffre 9 apparaît à l'affichage : le programme est terminé.

— Remarque :  $V_b$  et  $V_{as}$  en  $m^3$ .

## Fréquence de coupure

Le calcul de la fréquence de la coupure à 3 dB  $f_3$  est la principale fonction de la deuxième carte. Cette partie du programme uti-

lise des données stockées en mémoire après utilisation de la 1<sup>ère</sup> carte. Il ne faut donc pas modifier le contenu des registres mémoires entre la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> carte.

S'il existe plusieurs fréquences à 3 dB (ce qui peut arriver pour des réponses très accidentées) le calculateur choisit la plus élevée.

— Utilisation du programme

- charger la 2<sup>e</sup> carte dans le calculateur.
- appuyer sur la touche  $\square$  : déroulement du programme et impression du résultat.
- la fréquence de coupure affichée : le programme est terminé.

Tracé de la courbe de réponse

Si le résultat obtenu donne satisfaction, cette deuxième carte permet de tracer point par point la courbe de réponse.

— Utilisation du programme

- Incrire une fréquence  $f$  (en Hz) à l'affichage.
- Appuyer sur la touche  $\square$
- La réponse du bass-reflex (en dB) à cette fréquence apparaît à l'affichage. Le programme est terminé.

Alors le programme peut être utilisé de la façon suivante :

- Incrire une fréquence (en Hz) à l'affichage.
- appuyer sur la touche  $\square$
- le débattement crête à crête (en mm) apparaît à l'affichage. Le programme est terminé.

- calculer  $a_1, a_2$  et  $a_3$  (cf (21) et stocker dans les registres  $R_1, R_2$  et  $R_3$ .
- stocker  $1/h$  en  $R_4$  et  $1/Q_b \sqrt{h}$  en  $R_5$  (on prendra  $Q_b = 7$ ).
- calculer : 
$$x = \frac{3}{S_d} \sqrt{\frac{P_e V_{as}}{f_s Q_e}}$$
- calculer  $f_{bfs}$  et stocker en  $R_7$ .

001	HLB3	21	11	007	ST-2	20-45	00	113	*	-20	169	SHD	16	24			
002	RCL2	36	23	008	*	-00	00	114	RCL2	36	02	170	SHD3	-63	02		
003	RCLD	26	14	009	ST04	20	04	115	*	2	02	171	SHD7	16	42		
004	*	-24	00	010	ST05	20	05	116	*	-20	02	172	ST04	22	04		
005	*	01	00	011	ST06	20	06	117	*	-20	02	173	RCL1	26	45		
006	*	-20	00	012	ST07	20	07	118	RCL8	36	00	174	SHD7	23	07		
007	RCL8	36	11	013	ST08	20	08	119	*	-20	02	175	ST01	20	45		
008	RCL8	36	11	014	ST09	20	09	120	RCL1	36	01	176	RCL8	26	00		
009	*	-24	00	015	RCL7	36	07	121	*	-20	02	177	RCL8	26	11		
010	ST01	20	46	016	ST	0	53	122	STH	24	17	178	RCL8	26	12		
011	*	-24	00	017	*	0	00	123	HLB2	21	02	179	*	-20	02		
012	RCL1	36	46	018	RCL2	36	02	124	*	2	02	180	*	-24	02		
013	*	-20	00	019	ST07	20	07	125	ST01	20	46	181	L/X	52	02		
014	ST08	20	08	020	*	-24	00	126	HLB3	21	02	182	*/	54	02		
015	RCL1	36	46	021	ST07	20	07	127	CP8	16	22	00	183	SHD1	-63	01	
016	*/	54	02	022	*	-45	00	128	RCL1	36	46	184	PRD1	-14	02		
017	RCL2	36	13	023	XBP7	16-45	00	129	*	09	00	185	SHD2	-63	02		
018	*	-20	00	024	ST08	22	00	130	ST07	16-23	00	186	SHD2	16	25	46	
019	L/X	52	02	025	ST07	20	07	131	STH	24	17	187	ST01	20	45		
020	ST07	20	07	026	ST07	20	07	132	SHD1	16	26	46	188	SHD1	16	26	46
021	RCL1	36	46	027	RCL3	36	03	133	RCL1	36	45	189	RCL1	36	45	02	
022	*	-20	00	028	*	-45	00	134	SHD1	23	01	190	PRD1	-14	02		
023	ST09	20	09	029	ST07	20	07	135	XBP7	16-44	00	191	SPC	16	11	02	
024	RCL1	36	46	030	*	-24	00	136	STH	16	21	00	192	ST03	22	03	02
025	*/	54	02	031	XBP7	16-44	00	137	SHD1	16	26	46	193	HLB2	21	02	02
026	*	07	00	032	ST07	20	07	138	RCL1	36	45	194	ST08	20	08	02	
027	*	-24	00	033	RCL8	36	08	139	SHD1	23	01	195	RCL3	36	03	02	
028	ST07	20	07	034	SHD	-22	00	140	*	-20	02	196	*	-20	02	02	
029	RCL1	36	46	035	RCL3	36	03	141	XBP7	16-44	00	197	RCL8	36	08	02	
030	*	-24	00	036	*	-45	00	142	ST08	22	00	198	*	-20	02	02	
031	ST09	20	09	037	*	04	00	143	HLB4	21	04	199	RCL2	36	02	02	
032	RCL2	36	13	038	*	-24	00	144	RCL1	36	45	200	*	-20	02	02	
033	*	07	00	039	XBP7	16-44	00	145	SHD1	16	25	46	201	RCL8	36	08	02
034	*	-20	00	040	ST05	20	05	146	RCL1	36	45	202	*	-20	02	02	
035	L/X	52	02	041	RCL5	36	05	147	*	-20	02	203	RCL1	36	01	02	
036	ST08	20	08	042	ST06	20	06	148	*	02	00	204	*	-20	02	02	
037	RCL7	36	07	043	RCL7	36	07	149	*	-24	00	205	RCL8	36	08	02	
038	ST	0	53	044	ST08	20	08	150	SHD1	23	01	206	*	-20	02	02	
039	ST01	20	46	045	ST09	20	09	151	SHD1	16	23	00	207	*	01	02	
040	RCL8	36	08	046	HLB8	21	00	152	SHD	-22	00	208	*	-20	02	02	
041	ST	0	53	047	RCL9	36	09	153	XBP7	16-44	00	209	LOG	16	32	02	
042	ST02	20	02	048	SHD1	23	01	154	ST05	22	05	210	*	01	02	02	
043	RCL9	36	09	049	XBP7	16-44	00	155	RCL8	36	08	211	*	00	00	02	
044	ST	0	53	050	ST02	22	02	156	ST01	20	45	212	*	-20	02	02	
045	ST03	20	03	051	*	01	01	157	ST06	22	06	213	SHD	-22	02	02	
046	RCL8	36	08	052	ST09	20	09	158	HLB5	21	05	214	STH	24	02	02	
047	*	02	00	053	ST01	20	01	159	SHD1	16	26	46	215	HLB4	21	04	02
048	*	-20	00	054	ST08	22	08	160	RCL8	36	08	216	*	00	00	02	
049	ST-1	20-45	01	055	ST06	20	06	161	ST01	20	45	217	ST01	20	45	02	
050	ST-3	20-45	03	056	*	04	04	162	SHD1	16	25	46	218	SHD1	16	25	46
051	*	02	00	057	RCL3	36	03	163	HLB6	21	06	219	ST01	20	45	02	
052	ST02	20	02	058	RCL3	36	03	164	RCL1	36	45	220	SHD1	16	26	46	
053	RCL7	36	07	059	*	03	03	165	SHD1	16	26	46	221	ST03	22	03	02
054	RCL8	36	08	060	*	-20	00	166	RCL1	36	45	222	ST01	20	45	02	
055	*	-20	00	111	*	-20	00	167	*	-40	00						
056	*	-20	00	112	RCL8	36	08	168	SHD4	-63	04						

Fig 10 : 1<sup>ère</sup> carte magnétique

Programme simplifié sur HP 25

Une simple calculatrice possédant 49 lignes de programme permet, au prix de quelques calculs préliminaires, de tracer les deux courbes précédentes.

— tracé de la courbe de réponse

Stocker 0 dans le registre  $R_6$ . Le tracé point par point se fait alors de la façon suivante :

- inscrire une fréquence à l'affichage.
- lancer le programme.
- le niveau en dB apparaît à l'affichage.

Tracé de la courbe de débattement du H.P.

Pour effectuer ce calcul, il faut connaître la surface rayonnante utile  $S_d$  (en  $m^2$ ), le facteur de qualité électrique  $Q_{es}$  et fixer une puissance électrique  $P_e$  :

- Charger les registres :  $P_e \rightarrow R_7$
- $S_d \rightarrow R_8$
- $Q_{es} \rightarrow R_9$

— tracé de la courbe de débattement du H.P

Stocker x dans le registre R<sub>6</sub>. Le tracé point par point se fait alors de la façon suivante :

- inscrire une fréquence à l'affichage.
- lancer le programme.
- le débattement crête à crête en mm apparaît à l'affichage.

tique imposant et le soin évident apporté à sa réalisation. L'efficacité pour 103 dB pour 1 W/1 m en bruit rose filtré 250 Hz - 2 kHz. Si l'on s'intéresse au domaine de fréquences « utiles », c'est-à-dire jusqu'à 500 Hz, l'efficacité moyenne est de 98 dB pour 1 W/1 m.

Les caractéristiques de ce haut-parleur sont les suivantes :

On en déduit le rendement à l'aide de la relation (19) :

$$\eta_0 = 3,26 \%$$

Optimaliser une enceinte pour un haut-parleur possédant un tel rendement et un Q<sub>ts</sub> aussi faible est un problème particulièrement délicat. Il est prévisible que la fréquence de coupure sera relativement haute si l'on veut une bonne linéarité. Le meilleur compromis est difficile à trouver et justifie pleinement l'utilisation du programme que nous venons de décrire.

— Utilisation en filtrage passif

Le filtre passif introduit une résistance série supplémentaire dont nous devons tenir compte. Nous la supposons égale à 1 Ω, valeur tout à fait réaliste et très proche par exemple de celle du filtre Onken-Mahul. Ceci nous donne de nouvelles valeurs pour Q<sub>e</sub> et Q<sub>t</sub> :

$$Q_e = \frac{5,5 + 1}{5,5} Q_{es} = 0,212$$

$$Q_t = \frac{Q_e Q_{ms}}{Q_e + Q_{ms}} = 0,200$$

Dans toute la suite, nous considérons que ce filtre fait partie de l'enceinte, ce qui nous donne un rendement légèrement plus faible :

$$\eta_0 = 2,77 \%$$

— Optimum absolu

Cet optimum sera défini de la façon suivante : il s'agit de l'alignement donnant la fréquence de coupure la plus basse possible en ne dépassant pas une ondulation de ± 1 dB. Nous avons recalculé le réseau de courbes de Snyder pour Q<sub>t</sub> = 0,2 (cf. fig.12). L'ondulation augmentant avec le volume utilisé, il

Fig 11 : 2ème carte magnétique et programme sur HP 25

OPTIMALISATION

Une enceinte bass-reflex pour le haut-parleur Audax PR 38 S 100

— Description du haut-parleur

Ce nouveau haut-parleur de 38 cm inspire immédiatement confiance par son circuit magné-

$f_s = 24 \text{ Hz}$	$Q_{ts} = 0,17$
$V_{as} = 0,440 \text{ m}^3$	$Q_{es} = 0,18$
$R_e = 5,5 \Omega$	$Q_{ms} = 3,47$
$S_d = 0,0880 \text{ m}^2$	

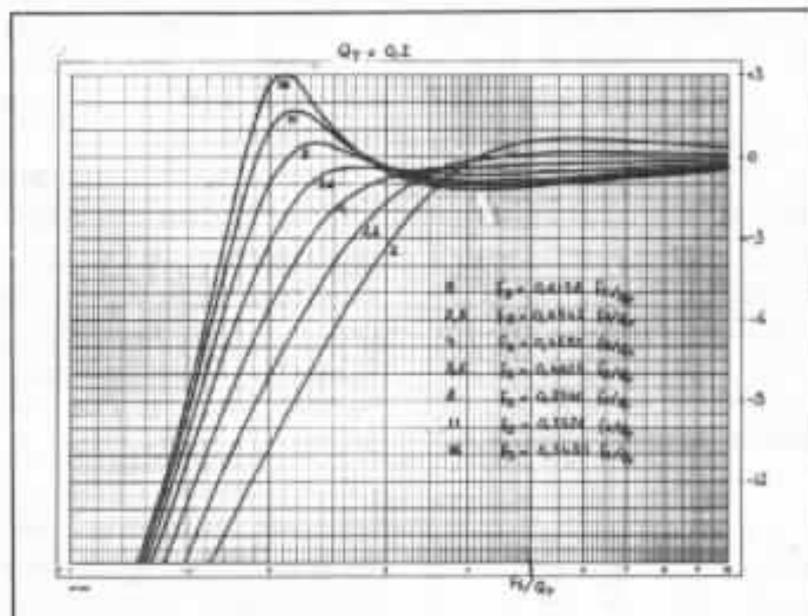


Fig 12 : Réseau de courbes de Snyder

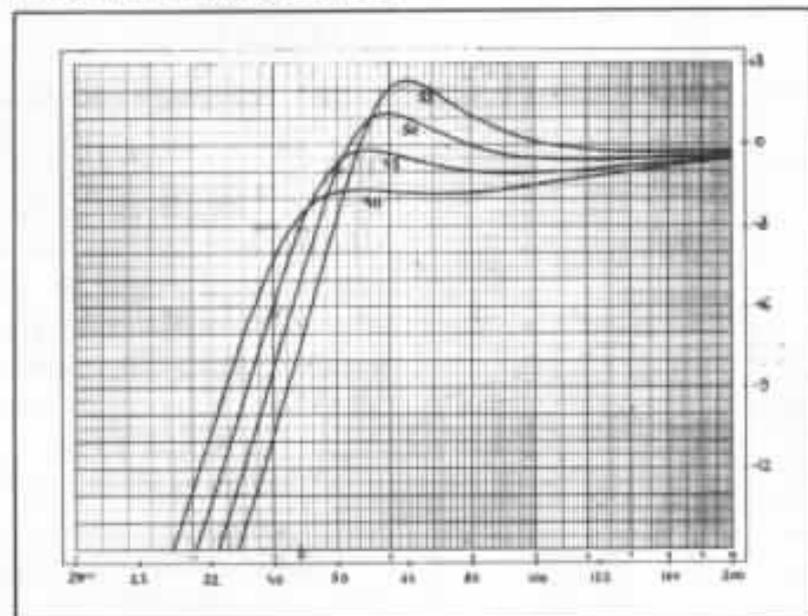


Fig 13 : Réponse du bass-reflex pour  $V_b = 0,132 \text{ m}^3$  et différentes fréquences d'accord  $f_b$ .

existera donc un volume maximal à ne pas dépasser. L'effet de la fréquence d'accord  $f_b$  apparaît sur la figure 13. On remarque que un volume donné, la fréquence de coupure la plus basse sera obtenue pour une fréquence  $f_b$  aussi basse que possible, compte tenu de l'ondulation maximale à ne pas dépasser.

La réponse optimale est une courbe qui tangente les niveaux + 1 dB et - 1 dB (cf. fig. 14). Elle est obtenue pour un volume de 166 litres et une fréquence d'accord de 46,6 Hz. La fréquence de coupure est alors de

43,1 Hz, valeur qu'il est impossible d'améliorer sans dégrader la linéarité de la réponse.

#### — Une solution de compromis

L'examen de la figure 13 montre qu'il est possible, au prix d'un léger sacrifice au niveau de la fréquence de coupure, d'obtenir une meilleure linéarité et un volume sensiblement plus faible. Si nous fixons le volume à 132 l., la réponse optimale sera obtenue pour une courbe tangente au niveau - 1 dB. On trouve  $f_b = 45,4 \text{ Hz}$ , ce qui conduit à une fréquence de coupure

$f_c = 44,3 \text{ Hz}$ , soit 1,2 Hz de plus que l'optimum théorique. Cette fréquence peut paraître élevée au premier abord pour une enceinte de ce volume et pour un haut-parleur de ce diamètre. C'est la contrepartie inévitable de très haut rendement. Cependant, la fréquence 41,25 Hz est reproduite à - 5 dB, c'est-à-dire à un niveau tout à fait réaliste. Si nous portons un intérêt particulier à cette fréquence, c'est qu'elle correspond au mi - 1, la note la plus grave d'une contrebasse !

#### — Le débattement du haut-parleur

Nous aborderons ici un problème important et pourtant bien souvent négligé dans la conception d'enceintes acoustiques.

Réaliser un système à très haut rendement n'aurait aucun sens si ce devrait être au détriment de la puissance admissible. Le problème ne se pose pas sur le plan thermique (le PR 38 est donné par le constructeur pour 200 W). Par contre, la reproduction de basses fréquences à fort niveau peut imposer à la membrane des déplacements trop importants.

La figure 15 montre le débattement crête à crête de la membrane en fonction de la fréquence pour une puissance électrique de 100 W. La zone de fonctionnement linéaire correspond à une excursion totale de 7 mm (hauteur de la bobine mobile moins la hauteur de l'entrefer). Elle s'étend jusqu'à une fréquence inférieure de 38,7 Hz. Il s'agit là d'un test redoutable. En pratique, une telle puissance n'est jamais concentrée sur une fréquence pure.

Ainsi, Harwood a montré que l'écart entre le niveau crête dans une bande d'octave donnée et le niveau crête total d'une modulation n'est jamais inférieur à 4 dB.

Cette tenue en puissance remarquable est due à la grande surface rayonnante de la membrane et surtout au choix de la fréquence  $f_b$ . L'évent prend ainsi le relais du haut-parleur au moment où le débattement atteint une valeur critique.

Pour une fréquence  $f = 41,25$  Hz, l'excursion atteint 5,0 mm pour 100 W électriques, soit une puissance acoustique de 0,855 W (2,77 W moins 5,1 dB).

Un watt acoustique est obtenu avec un débattement de 5,4 mm.

Ce résultat prend toute sa signification lorsqu'on sait que le même haut-parleur utilisé dans un système clos et délivrant la même puissance atteint un débattement de 20,5 mm. Quant au débattement d'un 13 cm, il dépasse de beaucoup le diamètre du haut-parleur ! Pour rester dans une zone linéaire, il faut se contenter de 1 mW acoustique !

#### DEBATTEMENT POUR 1 WATT ACOUSTIQUE à 41,25 Hz

Enceinte	$S_d$ (m <sup>2</sup> )	Excursion crête à crête (mm)
bass reflex PR 38	0,0880	5,4
enceinte close 38 cm	0,0880	20,5
enceinte close 31 cm	0,0530	34
enceinte close 24 cm	0,0301	60
enceinte close 20 cm	0,0221	82
enceinte close 17 cm	0,0145	125
enceinte close 13 cm	0,0089	203

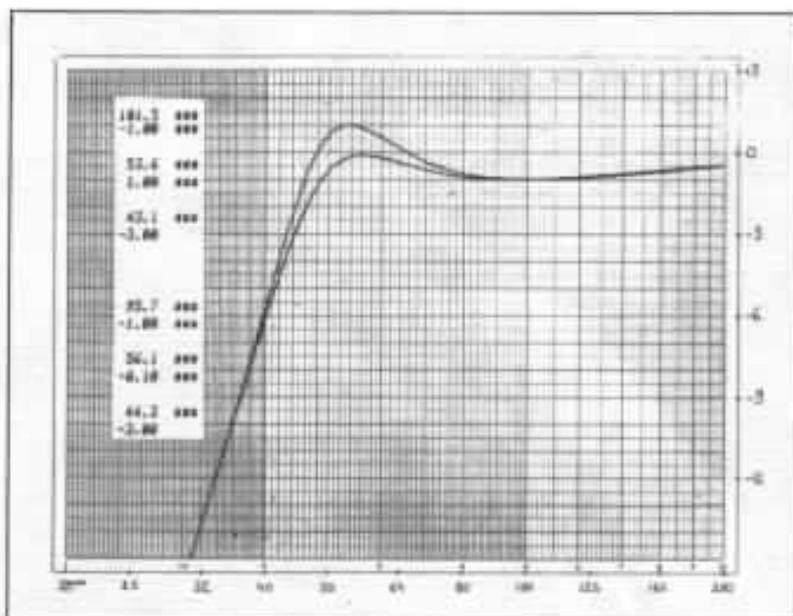


Fig 14 : Réponse optimale et choix final

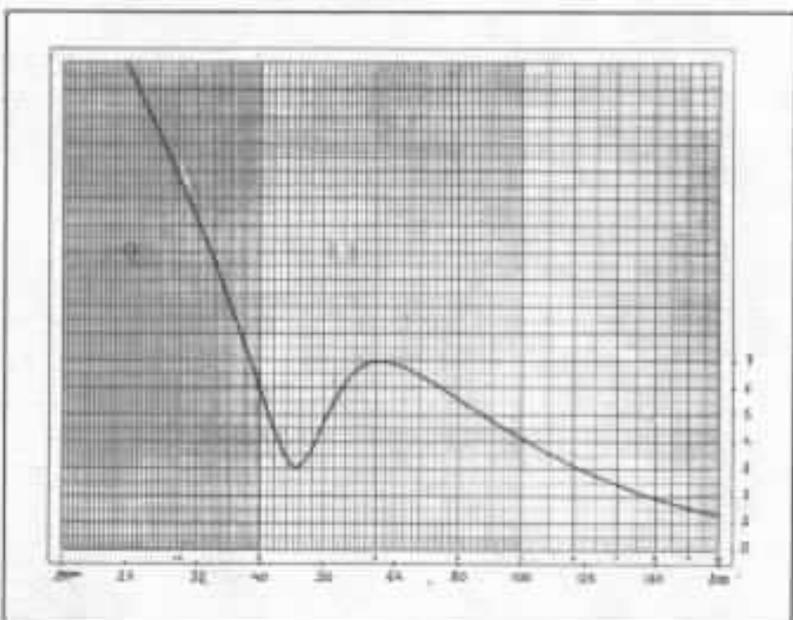


Fig 15 : Débattement crête à crête du haut-parleur (en mm) pour 100 Watts.

#### CONCLUSION

La présente étude est à la base d'une réalisation de haute qualité qui sera décrite dans un prochain article. Nous verrons que les prévisions théoriques et les résultats pratiques concordent parfaitement pourvu que l'on fasse appel à des méthodes de mesure permettant de pallier les défauts de la chambre sourde. De plus, l'excellent comportement en puissance laisse augurer d'une très faible distorsion et d'une intermodulation particulièrement réduite entre les registres grave et bas médium.

**Page non  
disponible**

# Le problème du fractionnement de membrane

Jean Hiraga

*En matière de haut-parleur électro-dynamique on a pu assister ces dernières années à l'apparition de nouvelles technologies, d'améliorations d'idées anciennes, toutes destinées à parfaire au mieux le travail en piston de la membrane.*

*Devenu totalement universel tant il était pratique et simple, ce système proposé par Rice et Kellogg en 1925 a fait pourtant, dès sa naissance, l'objet de profondes études concernant le défaut de fractionnement non contrôlé de la membrane, défaut malheureusement inhérent au système. Bien qu'il n'existe pas de remède capable de supprimer totalement cet inconvénient il serait intéressant de discuter sur ces divers procédés d'amélioration. Comme on le verra il existe heureusement de bons compromis.*

## **Les raisons du fractionnement non contrôlé dans le haut parleur électro-dynamique.**

Le fractionnement non contrôlé, c'est-à-dire une déformation non homogène et indépendante du signal reçu par la bobine mobile est dû à plusieurs facteurs assez évidents :

— Dans le haut-parleur électro-dynamique conventionnel la surface de la membrane est très grande par rapport à la surface

où est appliquée la force motrice. Pour un haut-parleur de 21 cm par exemple le rapport surface mue/surface motrice peut dépasser 1 000, sachant que la surface d'une bobine mobile, vue de dessus, ne représente qu'une fine couronne de l'épaisseur du support de la bobine motrice. En pensant aux problèmes de rigidité, de masse en mouvement, la charge acoustique présentée par l'air sur les deux faces de la membrane mon-

tre que, même pour les meilleurs matériaux existant il ne serait question de prétendre à un travail en piston à l'aide d'une seule membrane et ceci sur tout le spectre sonore.

— En regardant la figure 1 on voit que le vecteur de force de la bobine n'est pas superposé à celui de la membrane puisque celle-ci est un cône, en général très ouvert. Pour obtenir une bonne transmission cet angle

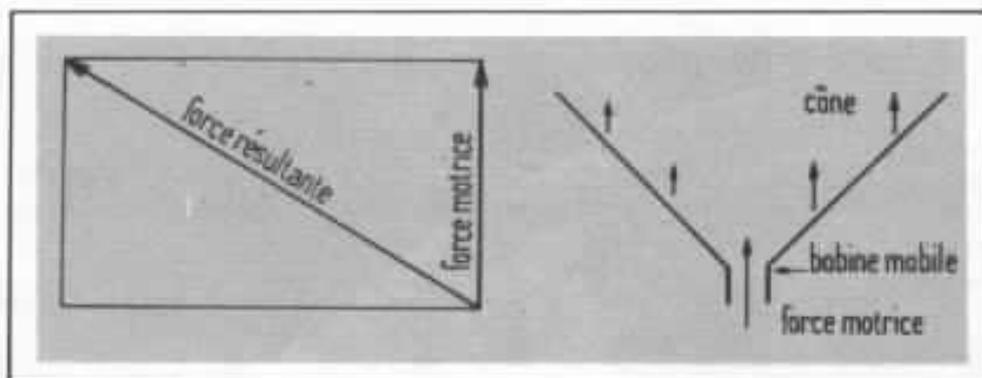


Fig 1 : le vecteur de force de la bobine mobile n'est pas superposé à celui de la membrane.

	module d'Young $N/m^2$	masse spécifique $d$ $kg/m^3$	$E/d^2$
papier	$0,2 \cdot 10^{10}$	$0,5 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$
aluminium	$7 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^3$	$5,1 \cdot 10^3$
titane	$11,0 \cdot 10^{10}$	$4,5 \cdot 10^3$	$49 \cdot 10^3$

Fig 2 : valeurs de densité et de module de Young pour quelques matériaux employés dans la réalisation de membrane.

devrait être aussi fermé que possible, ce qui est aussi en contradiction avec le procédé même. Cet angle très ouvert formé par la membrane défavorise donc le travail en piston. (rigidité dynamique insuffisante).

— Le travail en piston de la membrane va dépendre de l'épaisseur de la membrane, sa forme, le matériau utilisé pour réaliser celle-ci, la technologie de fabrication de cette membrane, la vitesse de propagation des vibrations dans ce matériau, le module de Young (module d'élasticité) du matériau, la masse spécifique ainsi que le rapport  $E/d^2$ ,  $E$  étant le module de Young,  $d$  la masse spécifique, vu que la déformation du cône sous l'action des contraintes exercées par la bobine mobile est inversement proportionnelle à  $E/d^2$ .

Comme on le voit tous ces problèmes d'inertie, de masse en mouvement, de forme du cône, de rigidité de membrane, de rapport force motrice/surface mue montrent qu'il ne peut pas exister pour ce principe de méthode annulant totalement les déformations non contrôlées de la membrane.

Le tableau de la figure 2 montre quelques valeurs de densité, et de module de Young pour quelques matériaux utilisés pour les membranes. Comme le montre ce tableau les matériaux comme l'aluminium et le polystyrène expansé semblent très intéressants.

Le polystyrène expansé, le plus intéressant du point de vue prix de revient peut donner des résultats intéressants s'il est bien utilisé. Mais pour cela il faut qu'il soit mu en tous ses points

par la même force. Il peut conduire lorsqu'il est utilisé en tant que cône dans un haut-parleur électro-dynamique une courbe de réponse en niveau linéaire pour une zone donnée suivie malheureusement d'une « cassure » brutale du travail en piston se traduisant par de nombreux pics et creux associée à une baisse de niveau. Ce défaut semble provenir de la structure des « bulles » formant le polystyrène expansé, bulles qui, comme on peut le voir déjà à l'oeil nu, ne sont pas parfaitement scellées les unes aux autres ; ainsi que de l'élasticité du matériau dont la rigidité baisse brutalement aux fréquences élevées (élasticité, état spongieux du matériau). Pour ceux qui n'aiment pas le polystyrène expansé utilisé pour les membranes, les reproches semblent concerner surtout le son « propre » à ce matériau : un son à la fois amorti mais résonnant malgré tout à certaines fréquences avec un son « fêlé » que l'on pourrait peut-être attribuer en effet à la liaison mécanique imparfaite des cellules entre-elles.

Ce son « fêlé » c'est celui reconnu aussitôt par un connaisseur en porcelaine lorsque celui-ci frappe de l'index le bord d'une tasse de mauvaise qualité, pouvant malgré tout ne présenter aucune apparence extérieure de « fêlure ». Mais ces propriétés de grande rigidité alliées à une légèreté exceptionnelle ont malgré tout intéressé bien des techniciens du haut-parleur. Dès 1960 on a pu voir des publicités, démonstrations publiques de personnes exerçant le poids de tout leur corps sur une membrane en polystyrène expansé pour tenter de démontrer la rigidité exceptionnelle. Rigidité malheureusement « statique » car le

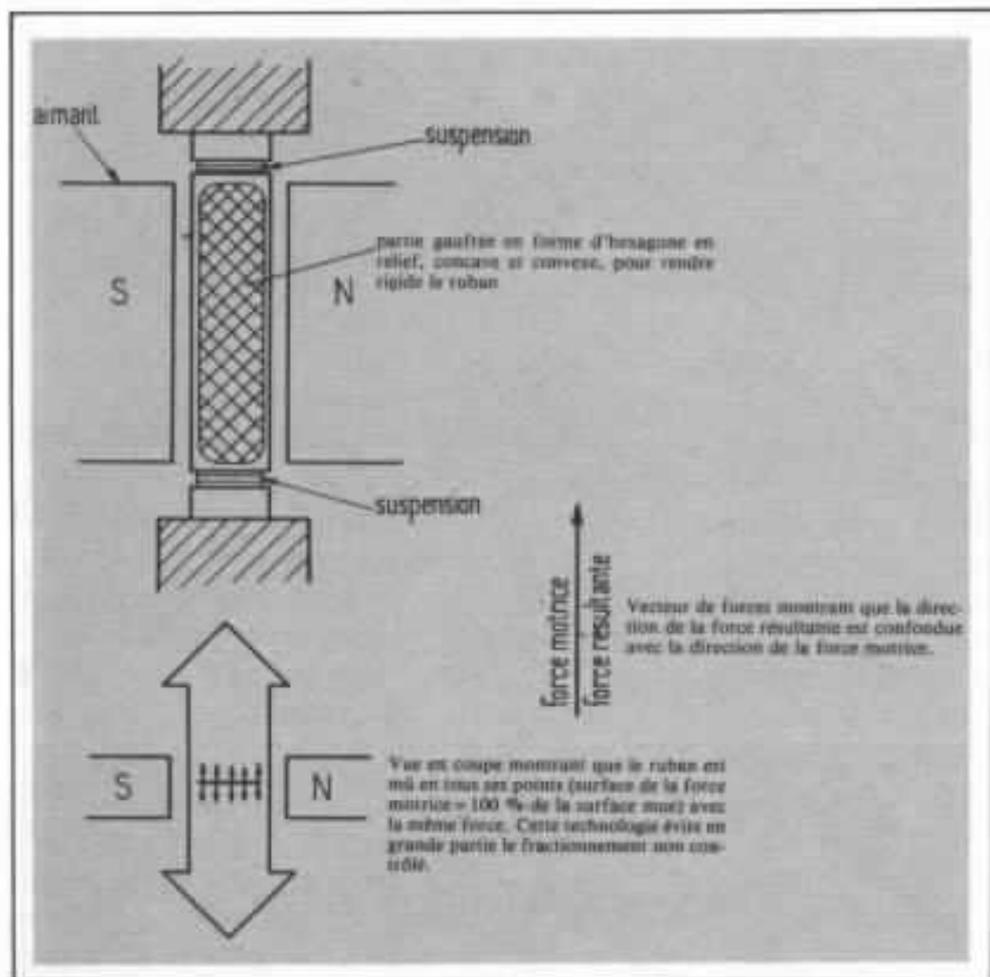


Fig 3 : principe de fonctionnement du haut-parleur à ruban dans sa conception la plus moderne.

module de Young de  $35 \cdot 10^6$  remarquable, et le rapport exceptionnel de  $E/d^2$  ne sont malheureusement pas valables pour toutes les fréquences et toutes les accélérations, accélérations qui peuvent atteindre un rythme de 40 000 par seconde. Ici la notion de rapport vecteur de force/angle d'ouverture du cône/surface motrice est très importante. En effet sur des constructions de diaphragme plan mû en tous ses points ou presque, le travail en piston s'améliore nettement comme c'était le cas des fameux Orthophases de la firme Gégé en France.

Mais dans tous les cas, la coloration propre de la membrane, le son caractéristique du papier, du mylar, du polystyrène expansé vient toujours des torsions mécaniques internes du matériau sous

l'action du signal. Et c'est pour-quoi l'idée d'utiliser un diaphragme mû en tous ses points, travaillant comme un vrai piston, ne s'aidant pas de la rigidité du diaphragme pour tenter de provoquer une vibration homogène à partir d'un seul point moteur, remonte dès l'époque 1930.

Le ruban par exemple, haut-parleur utilisé, en raison de sa surface émissive trop réduite, uniquement pour la reproduction des aigus, possède cet avantage incontestable d'être mû (du moins dans sa conception la plus moderne de la figure 3) en tous ses points par la même force et de travailler en vrai piston. Ainsi dans le cas du ruban, même léger et de rigidité relative, le travail en piston d'une part et la surface motrice égale à 100 % à la surface émissive d'autre part fait que cette « coloration de fractionnement » n'apparaît pratiquement plus.

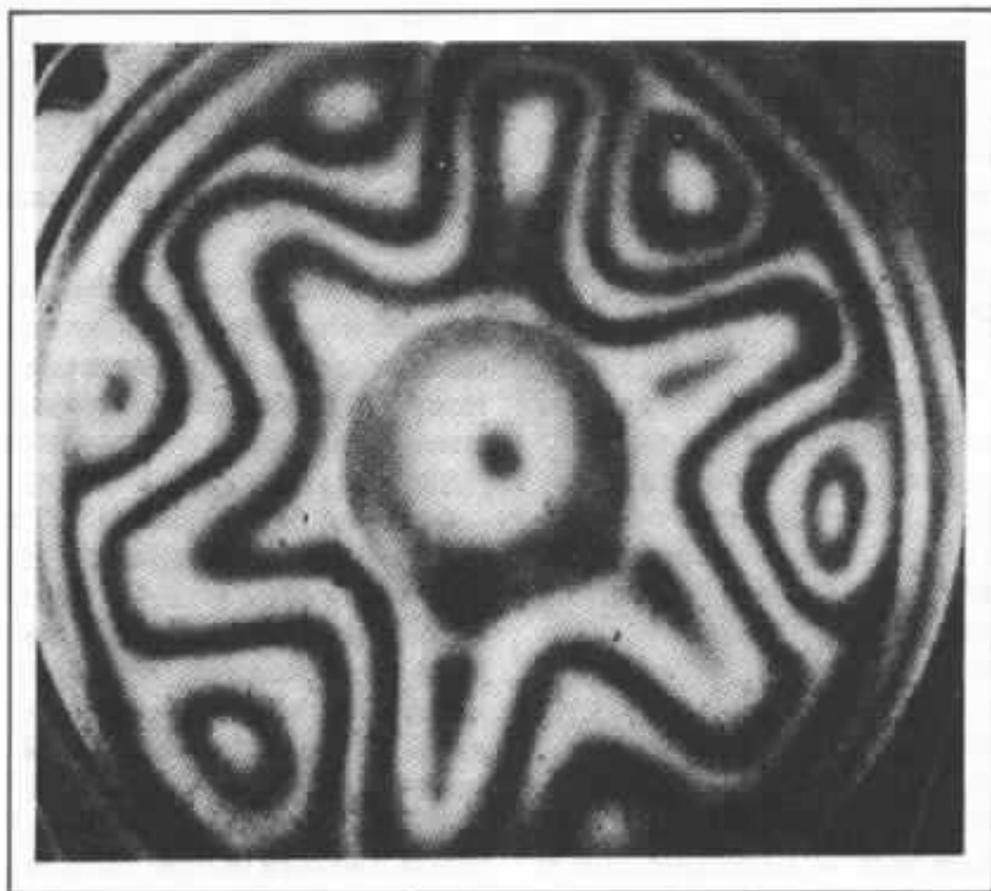


Fig 4 : examen stroboscopique par rayon laser mettant en évidence les fractionnements de membrane.

## Quelques remèdes

Le haut-parleur à ruban est donc un remède mais il ne s'agit cependant pas du même principe, de même que les dérivés du fameux Blatthaller de la firme Siemens et Halsk réalisé par le célèbre Mac Lachlan, tel que le Blatthaller miniature réalisé par Stanley Kelly, le haut-parleur du professeur Gamzon, l'Orthophase de Poutot et Gogny, le microphone Socapex (système Gamzon mais utilisé en microphone) et les multiples variantes passant par le célèbre Magnéplanar américain. Ces dernières sont en fait une transposition du procédé du haut-parleur électrostatique push-pull, où la force d'attraction électro statique est remplacée par la force d'attraction électro-magnétique. Ces solutions très élégantes et efficaces sont encore améliorables et ont donc un avenir certain.

Pour le haut-parleur électrodynamique conventionnel il existe plusieurs possibilités de remédier ou de contrôler les fractionnements incontrôlés décrits sur la fig. 4 (examen stroboscopique par rayon laser) et détaillés par exemple par F.J.M. Frankort dans le journal de l'A.E.S. de Sept. 1978 (fig 5).

La première solution consiste par exemple à chercher pour une épaisseur donnée plusieurs courbures de membranes et ceci dans plusieurs ouvertures de cône. Les résultats sont très dépendants du genre de papier utilisé et de sa technologie de fabrication. Compte tenu de la forme de la courbure, des variations de l'angle de transmission de la force motrice dans la membrane et de la perte mécanique dans le papier du cône il est possible de trouver de très bons compromis.

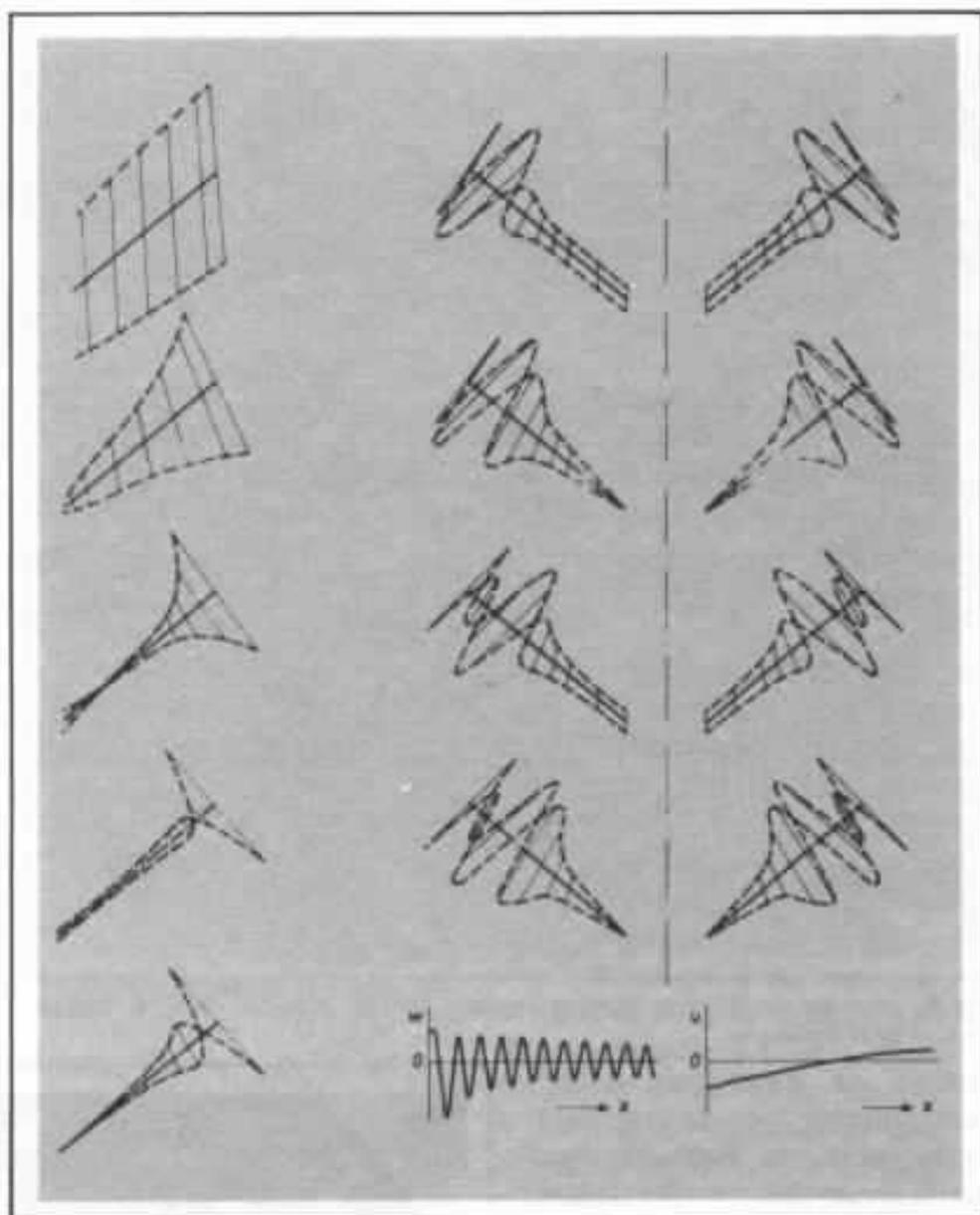


Fig 5 : détails des modes de vibration. (d'après F.J.M Frankort)

Dans quelques vieux haut-parleurs il est fréquent de trouver des modèles qui, grâce à une forme de membrane bien étudiée arrivent à d'excellents résultats.

Signalons ici que la forme courbée du diaphragme est efficace pour une autre raison : si le diaphragme n'est pas trop épais le fonctionnement en piston ne se fera que pour des fréquences relativement basses (en général la partie la plus linéaire de la courbe suivant la fréquence de résonance principale). Au delà, et si la courbure est bien calculée il se produit (théoriquement du moins) une réduction de diamè-

tre, de surface vibrante diminuant lorsque la fréquence augmente. Contrairement à ce bon compromis, la membrane conique, non courbée et souvent réalisée par collage et non moulage, provoque en général dans le haut du spectre une baisse de rigidité soudaine entraînant de nombreuses irrégularités en phase et en niveau acoustique. Sans avoir recours aux classiques corrugations il est donc possible d'obtenir de bons résultats par cette méthode dont l'homogénéité du résultat dépend surtout de la régularité de fabrication des membranes moulées.

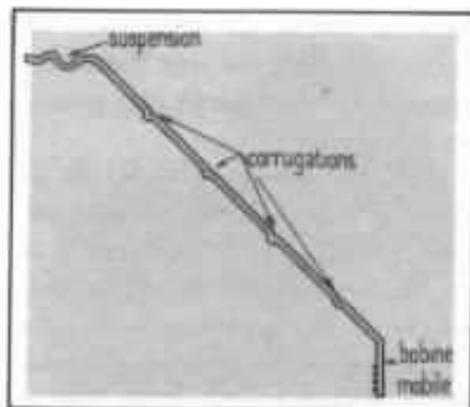


Fig 6 : principe des corrugations

### Les corrugations

En recherchant par diverses méthodes l'emplacement des fractionnements dynamiques de la membrane il est préférable de

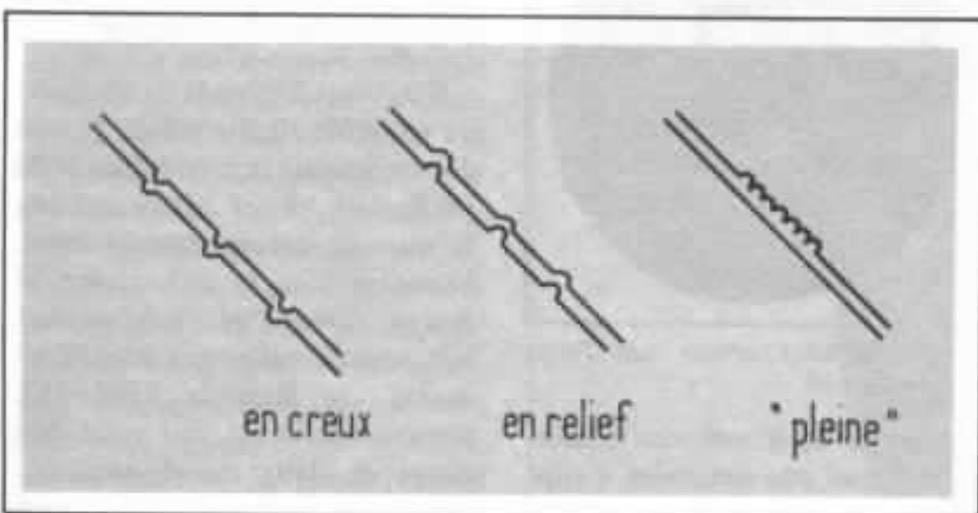


Fig 7 : variantes sur la forme des corrugations.

réduire le diamètre efficace de travail lorsque les fréquences augmentent. Si une forme appropriée de la courbure liée à une épaisseur variable de la membrane sont une solution, il est possible d'adopter une autre méthode très courante et très ancienne, celle des corrugations. Comme on le voit sur la figure 6 les corrugations consistent à « séparer » des parties concentriques de la membrane par des ondulations, suspensions qui par effet de « ressort » vont former un découplage mécanique et forcer la membrane à travailler sur des surfaces circulaires de plus

en plus réduites lorsque la fréquence augmente. Noter, comme on le voit sur la figure 7 que la forme des corrugations peut être sujette à de nombreuses variantes, où la corrugation peut être en creux, en relief ou bien encore être remplacée par une corrugation en U, en relief mais pleine c'est-à-dire provoquant pour un diamètre donné, une augmentation brusque de masse et limitant à partir d'une fréquence donnée, le travail de la membrane à une surface inférieure. Il faut aussi remarquer que ces diverses formes peuvent aussi prendre un aspect plus ou moins décoratif,

néanmoins elles ne sont généralement pas faites dans ce but.

Dans le cas de corrugations successives, cas assez général, on peut assimiler l'ensemble à une succession de masses entre lesquelles sont montés des ressorts (figures 8 et 9) ce qui ramène l'ensemble à un équivalent électrique semblable à la figure 10. Il est certain que si pour des fréquences pures ou fréquences glissantes on peut obtenir un bon résultat et une linéarité accrue, par contre sur phénomènes transitoires le résultat peut être inférieur voire très inférieur.

Au sujet des propriétés direc-

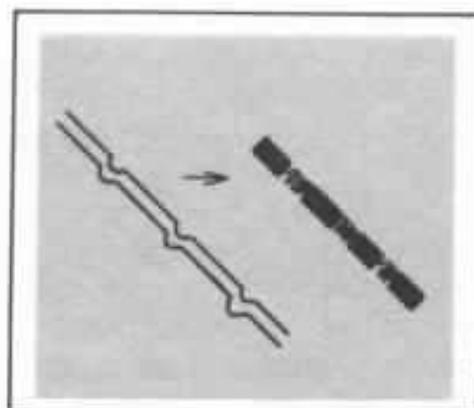


Fig 8 : équivalent masse-ressort des corrugations.

tionnelles d'un tel haut-parleur, elles dépendent beaucoup de ces corrugations. En fonction de la fréquence et sachant que du point de vue vibratoire les surfaces en mouvement vont réduire au fur et à mesure que la fréquence augmente, ceci va se traduire, vu de la bobine mobile par une variation, une réduction de l'angle d'ouverture du cône lorsque la fréquence va augmenter. Il va s'en suivre une directivité de plus en plus prononcée aux fréquences élevées, phénomène difficile à combattre. Pour lutter contre ce phénomène de directivité plus prononcée aux fréquences élevées qu'aux fréquences graves, on peut faire appel à des réflecteurs placés au centre du haut-parleur et de longueur donnée, en forme d'ogive (cas du haut-parleur français bien connu

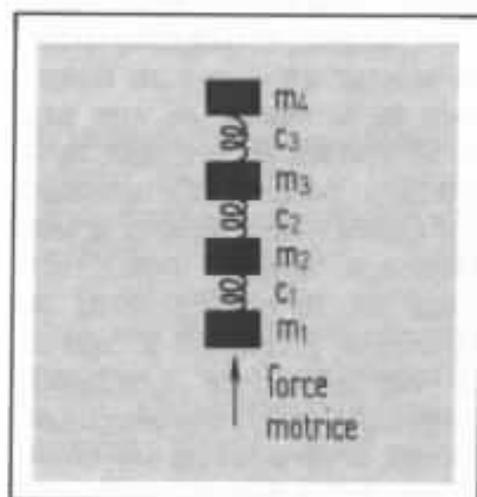


Fig 9 : comportement d'une membrane avec corrugations.

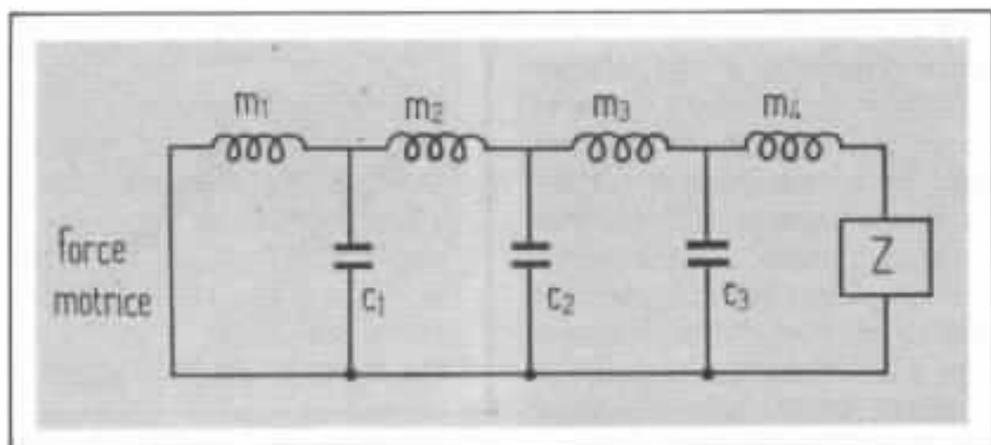


Fig 10 : schéma électrique équivalent de figure 9

de tous, le Médomex) ou encore en forme sphérique, cas d'un haut-parleur japonais connu et qui est resté sur le marché plus de 20 ans, le haut-parleur solo Technics 20 PW 09.

La membrane de ce haut-parleur remarquablement bien étudiée (figure 11) comportait ce réflecteur sphérique central réduisant la directivité aux fréquences élevées, mais aussi une corrugation de forme ovale, forme curieuse, mais utile car destinée à ne pas provoquer une variation brutale de masse dynamique d'une corrugation à l'autre, mais une variation progressive, améliorant ainsi la réponse transitoire grâce à une seule corrugation au lieu de plusieurs. Cette même méthode a été appliquée en France par la firme ERA. N'utilisant pas cette corrugation ovale elle mettait en œuvre un traitement de la membrane non pas sur sa surface entière mais laissant une partie ovale centrale non traitée. Ainsi à partir d'une fréquence donnée l'effet de masse dû au traitement de la membrane permettait à celle-ci de voir sa surface dynamique réduire (figure 12) très progressivement. C'est aussi un bon compromis et il doit être possible de trouver encore d'autres variantes.



Fig 11 : le haut-parleur solo Technics 20 PW 09

Comme on le voit ces méthodes ne sont pas destinées à supprimer les fractionnements non contrôlés du cône en mouvement

mais à tenter de contrôler ce fractionnement sur une bande de fréquences aussi large que possible.

Il n'est pas fait état ici de la masse totale et du rendement car il est très difficile d'obtenir à la fois un rendement élevé, un faible taux de distorsion et une bonne linéarité en niveau acoustique. Il faut penser aussi que le calcul de la position des corrugations est délicat et demande une part importante d'essais pratiques dépendant principalement des rapports de la masse de la bobine mobile, de la masse des surfaces en mouvement (compte tenu des corrugations) et de la charge de l'air équivalente.

Toujours à propos de tentative de contrôle rigoureux du travail dynamique de la membrane et du rendement, il est nécessaire aux fréquences élevées que la membrane soit à la fois petite et légère. Dans un haut-parleur japonais actuellement hors fabrication, le Pioneer PIM 16A (figure 13) il est fait cette fois usage de deux membranes distinctes comportant toutes deux des corrugations. A la différence

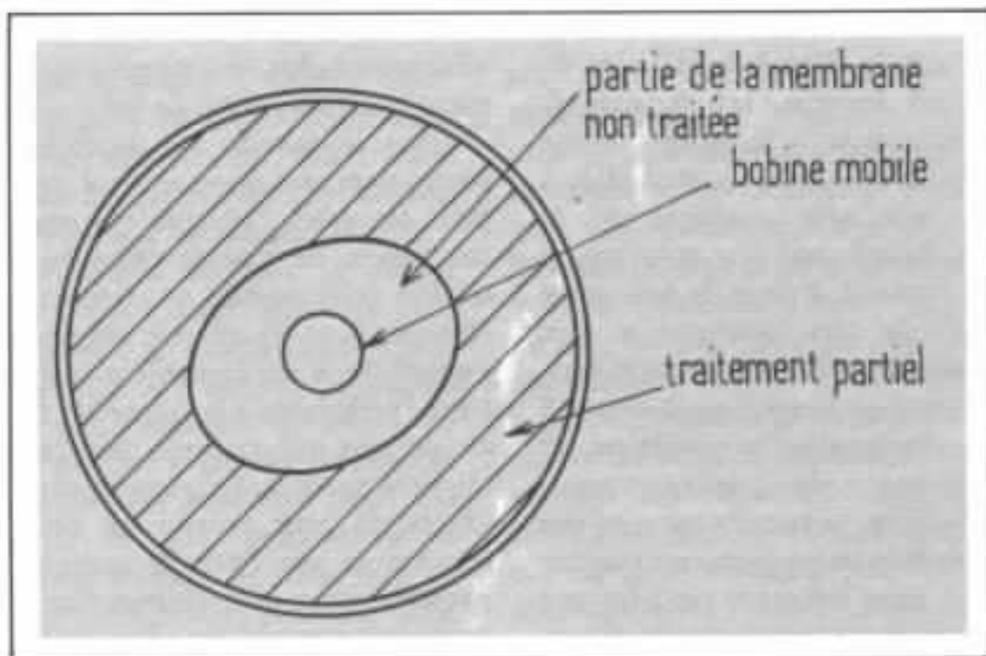


Fig 12 : détail du traitement de membrane du haut-parleur Technics 20 PW 09



Fig 13 : haut-parleur Pioneer P16 A

que la membrane centrale, fine et légère a une épaisseur régulièrement croissante vers sa périphérie elle-même collée à la membrane extérieure, en forme de couronne. Etant donné que très près de la bobine mobile l'angle de courbure est assez fort la transmission aux basses fréquences reste assez bonne mais aux fréquences élevées le très bon découplage entre les deux membranes et la réduction de l'épaisseur de la membrane près du centre allège l'équipage mobile et permet à ce haut-parleur solo de monter dans l'aigu aussi bien qu'un véritable tweeter. Comme on le voit il y a donc de très bonnes idées et compromis.

Cependant, comme on le voit sur la figure 14 le procédé stroboscopique, éclairant la membrane transitoirement de la même façon que le signal injecté à la bobine mobile, révèle les modes de vibrations non linéaires sont très irréguliers et ne sont pas seulement concentriques, (figure 4).

Cela signifie que la ou les corrugations circulaires, ovales, les

traitements divers partiel ou total, ne permettent qu'une amélioration relative. De plus, même en contrôlant relativement bien le travail dynamique de la membrane il n'est pas fait état ici de l'allure finale que va prendre la courbe de réponse du haut-parleur ainsi traité.

Il peut arriver, malgré une courbe de réponse artificiellement « linéarisée », de nombreux accidents de phase ou encore une courbe de distorsion assez irrégulière, concernant en particulier les divers harmoni-

un résultat subjectif médiocre (duretés, « bosses »). Bien que l'aspect de la courbe de réponse dite « retardée » est très importante sur ce point, ces défauts peuvent aussi provenir d'une remontée brusque de l'harmonique 3 ou d'un harmonique impair dépassant sur une certaine bande. Dans la zone médium-aigu cette distribution de niveau de chaque harmonique est très importante et joue sur les appréciations subjectives connues de « douceur » « finesse », « dureté » etc. La figure 15

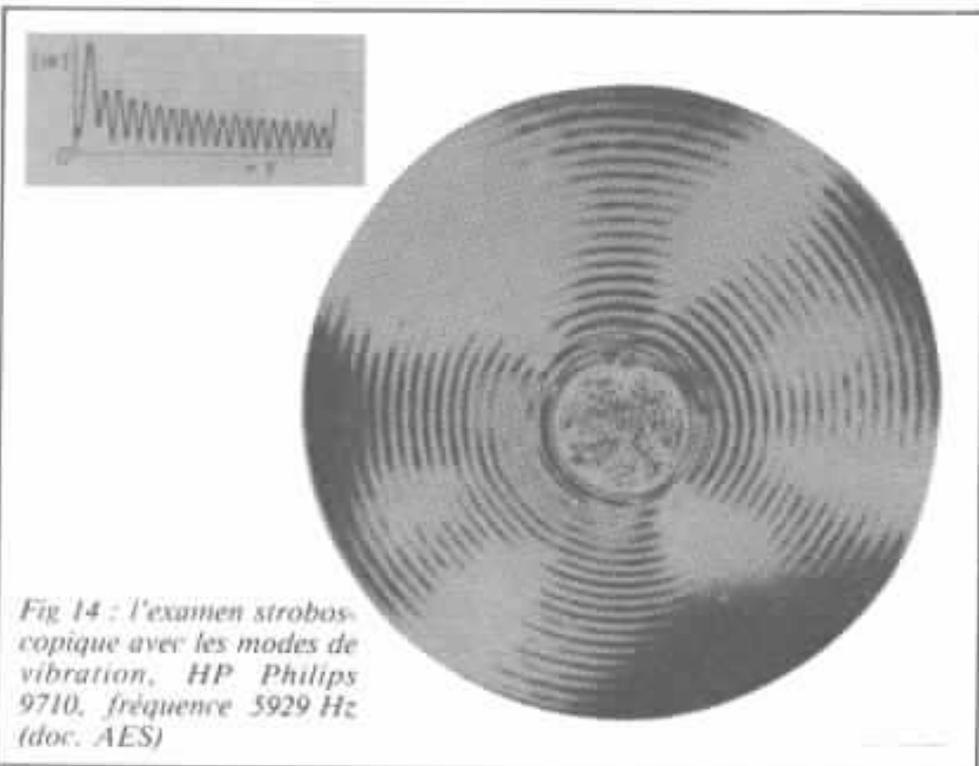


Fig 14 : l'examen stroboscopique avec les modes de vibration, HP Philips 9710, fréquence 5929 Hz (doc. AES)

ques. Ainsi plutôt que d'être simplement « aussi faible que possible » il est important de veiller à ce que le taux de distorsion par harmonique 2 soit autant que faire se peut d'une allure ressemblant à la courbe de réponse d'une part et que les harmoniques 3, 4, 5 soient situés plus bas en niveau d'autre part, et si possible en niveau décroissant par ordre d'harmonique. Il est curieux de rencontrer certains haut-parleurs présentant une courbe de réponse linéaire et malgré tout donnant

montre un exemple de ces courbes de distorsion.

### L'examen stroboscopique

Pour en revenir à l'examen stroboscopique, ce procédé a été étudié dès 1930 par Mac Lachlan et décrit par ailleurs dans son livre, une véritable bible du haut-parleur, « Loudspeakers » (1934, Oxford Press). Pour ce procédé Mac Lachlan utilisait soit du sable très fin qu'il saupoudrait sur la membrane, soit de la poudre de lycopode autre-

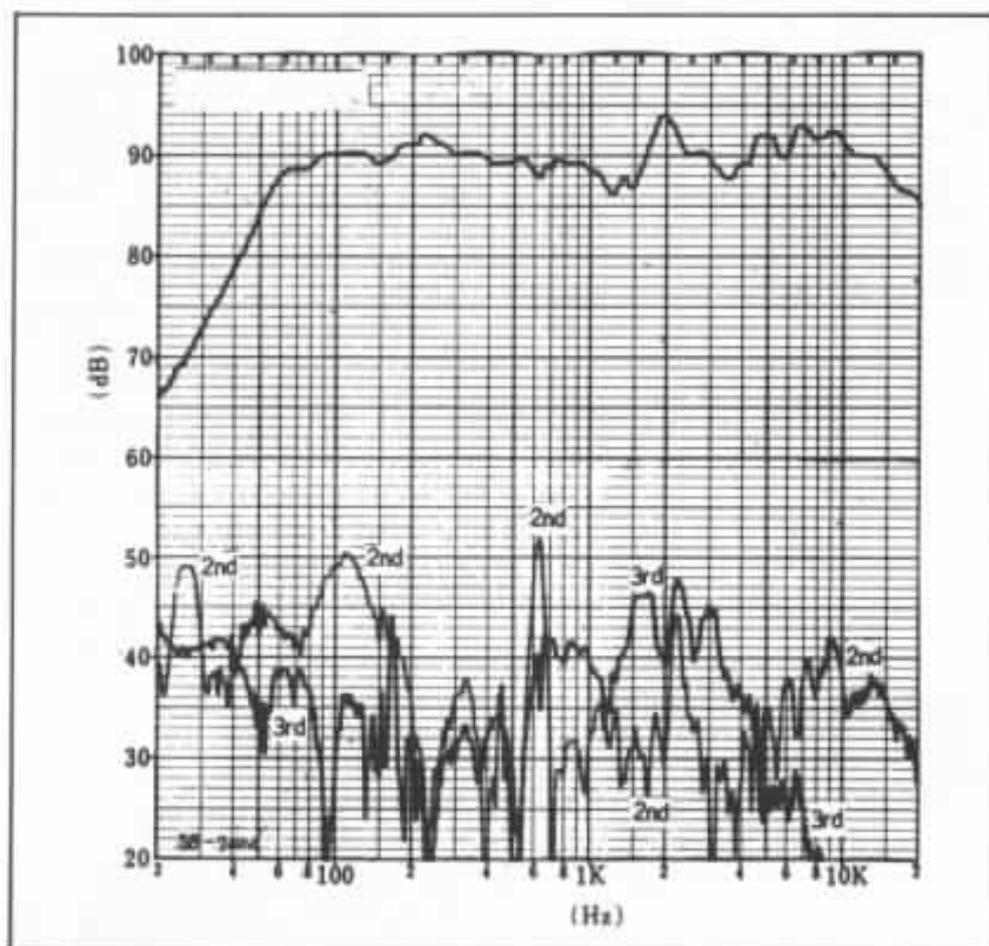


Fig 15 : exemple de courbe de distorsion

fois utilisée à la place du talc et dont la particularité et l'avantage était d'être composée de très fines particules très légères, de forme sphérique et recouvertes d'un fin duvet. Une telle poudre saupoudrée sur une membrane en mouvement permettait aux fines particules de se déplacer librement sans pour cela descendre dans le cône ou encore s'infiltrer dans le papier et, en se plaçant aux endroits vibrant le moins, de mettre en évidence le mode de vibration de la membrane. Bien qu'empirique cette méthode reste encore appliquée est à l'avantage d'être simple et peu onéreuse. En comparaison la méthode utilisant un rayon laser modulé, figure 16 est beaucoup plus difficile à mettre parfaitement au point car elle demande l'usage d'un miroir mobile d'un polissage très soigné. Ce miroir

est monté sur un équipement mobile, qui, recevant le signal d'un amplificateur doit osciller pratiquement sans aucune inertie afin que la comparaison du même signal envoyé à la bobine mobile donne une figure géométrique de mode de vibration exact. Il serait d'ailleurs intéressant de faire des comparaisons de procédés stroboscopiques visuels pour constater l'exactitude des résultats de ces diverses méthodes. L'examen stroboscopique est très intéressant et fournit des informations très précises sur les modes de vibrations parasites. Si cette mesure n'est pas par elle-même un remède, elle permet la possibilité de corriger avec précision les trop grandes déformations non contrôlées du cône et aussi de la suspension qui provoque dans presque tous les cas, et par déphasage, un acci-

dent dans la courbe de réponse. Là aussi l'examen stroboscopique devrait permettre un réajustement maximum de la structure de la suspension ou un traitement éventuel (viscoïde, largeur de la suspension, épaisseur, masse, traitement partiel etc.).

Tout ceci est un véritable art et le plus important est de pouvoir réaliser en série, sans trop de difficulté un haut-parleur aux caractéristiques stables.

Pour passer au matériau constituant la membrane, le papier, pour une même masse, une même épaisseur peut donner des résultats de fractionnement très différents suivant la composition de ce papier, la longueur des fibres, la façon, le sens, la technique de mélange de la pâte, ainsi que la technique utilisée pour le moulage. Le spécialiste de fabrication du cône s'habitue tant à la fabrication et au résultat qui en suit que son expérience au cours des années lui permet parfois de devenir un véritable expert dans ce domaine et de « deviner » les qualités et défauts d'une telle membrane par le toucher ou un choc appliqué à l'endroit où va se coller la bobine mobile. Bien que ceci paraisse très archaïque, il peut donner une précision insoupçonnée car l'oreille et le toucher intègrent en même temps de très nombreux paramètres alors qu'une mesure n'en introduit souvent qu'un seul (rigidité, tenacité, charge de rupture etc).

Songons à ce propos qu'un spécialiste en tissus est capable de reconnaître rien qu'au toucher plusieurs centaines de variétés de tissus alors qu'un palpeur de rugosité électronique ne donnerait en comparaison qu'un résultat médiocre.

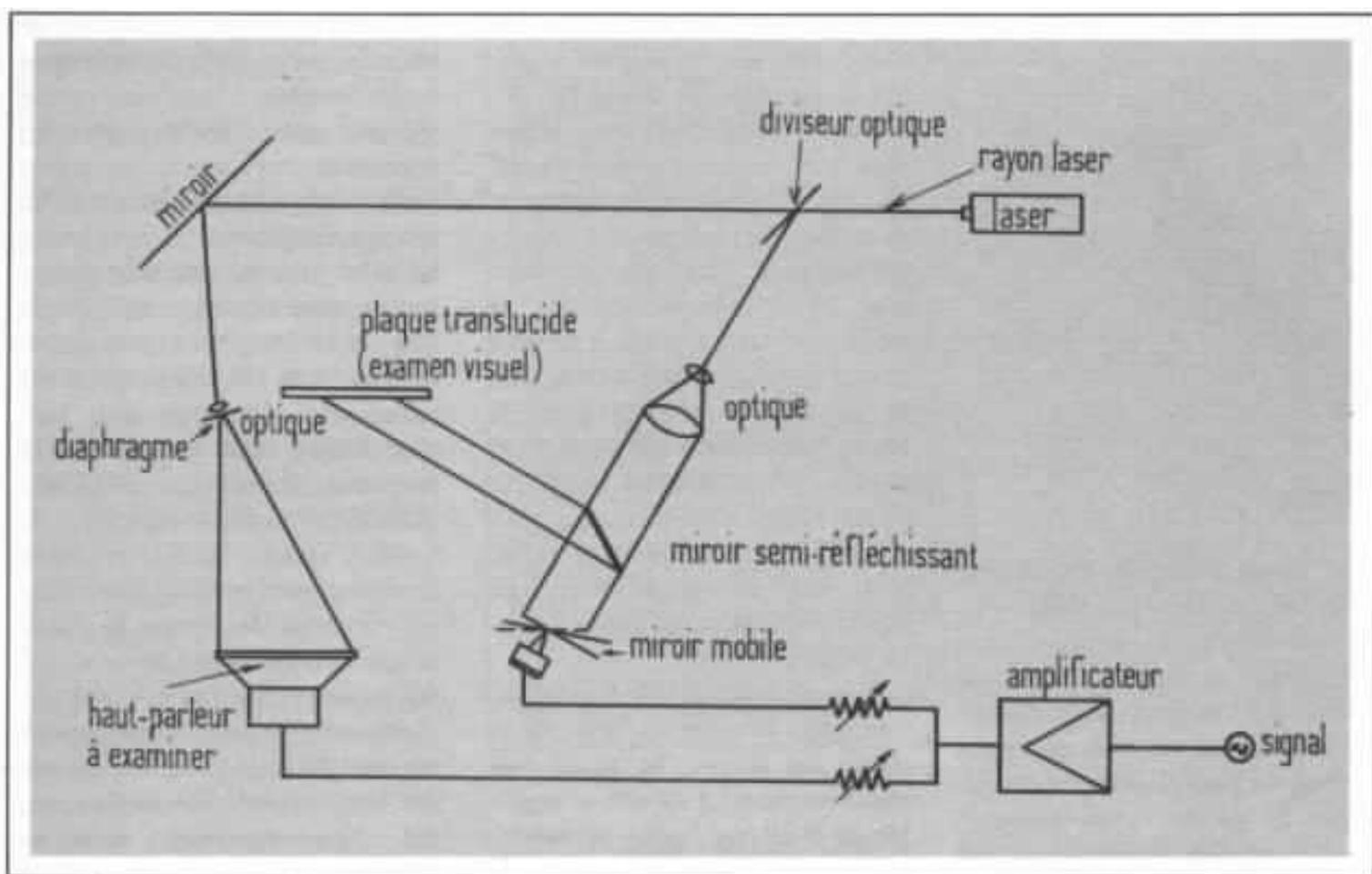


Fig 16 : méthode d'analyse holographique avec miroir mobile

### Les haut-parleurs plans

La mode est passée récemment, du moins pour une grande partie des haut-parleurs japonais à la structure « sandwich » contenant un cœur en structure nid d'abeille et plusieurs « peaux » dont l'importance est prépondérante dans le résultat final. La figure 17 montre l'aspect de ces membranes, qui en raison du sens d'orientation du nid d'abeille devraient être mues sur toute leur surface et non à partir de un, deux, ou quatre points moteurs pour donner un bon résultat. Bien que datant de l'époque du Blatthaller de Mac Lachlan, brevet qui fut vendu et exploité par la Siemens et Halske dès 1927 l'idée des diaphragmes plans venait des mêmes soucis, en particulier tenter d'annuler la distorsion de phase ainsi que la

résonance de cavité des diaphragmes coniques.

En 1958, dès que D.A. Barlow une autorité connue en Grande Bretagne pour ses recherches sur le haut-parleur, énonça les avantages du polystyrène expansé sur le papier pour la confection du cône, cette nouvelle idée fut aussitôt exploitée par KEF et LEAK. KEF, qui pensait déjà aux modes de vibration des membranes, selon leur forme géométrique, avait choisi pour son haut-parleur grave une forme rectangulaire et une surface frontale nervurée, qui fut remplacée par une autre génération faite non plus d'une membrane en polystyrène floquée mais cette fois recouverte d'une peau métallique. Bien qu'ayant un aspect frontal de haut-parleur plan il faut rappeler

que le dos de ce genre de haut-parleur est conique, comme un haut-parleur conventionnel. On voit bien ici le problème énoncé plus haut pour ce matériau ainsi que celui du vecteur de forces qui ne peut être trop élargi même pour des matériaux très rigides.

Pour ces nouveaux haut-parleurs plans du genre de la figure 18 il est très important de considérer que cette « amélioration » possède un revers qui est celui de l'épaisseur : alors que la membrane en papier peut avoir une épaisseur de l'ordre du millimètre ou même moins, la membrane sandwich, la membrane « nid d'abeille » est beaucoup plus épaisse et fait entrer en jeu la question de vitesse de transmission, à la fois dans le sens de force résultante (ouverture du cône) et dans le sens de l'épais-

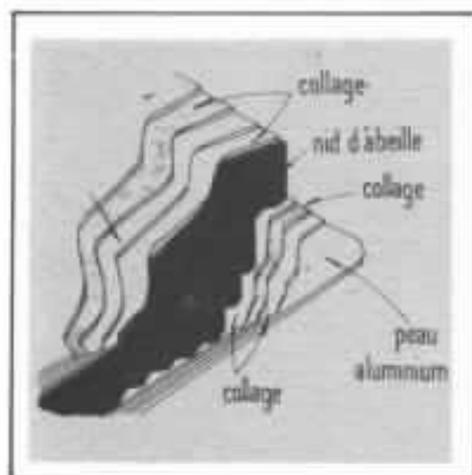


Fig 17 : détail de la structure nid d'abeille

seur. Dans le sens de l'épaisseur et avant que le son « sorte » de la membrane, la transmission mécanique se fera alors à une vitesse de transmission qui sera beaucoup plus variable que dans le cône en papier conventionnel. Dans le papier conventionnel cette vitesse de transmission qui est en moyenne de  $2 \cdot 10^3$  m/sec. peut passer à 2,4, 4, 6,5 suivant les structures et les matériaux employés (collages, peaux, matériaux comme l'aluminium, le titane, l'Oréphin, le Polymer Graphit etc). Il va donc se produire entre le moment où la bobine mobile transmettra à la membrane et le moment où un son sortira de celle-ci des variations successives de vitesse de transmission. Malgré un « allongement » de la courbe de réponse, le léger accident évité par l'absence d'effet de cavité il se produira malgré tout dans le haut de la courbe un accident assez violent, d'autant plus violent que le matériau utilisé aura un coefficient de pertes internes faibles. De 0,05 pour le papier il passe à une valeur bien plus faible pour des métaux comme le titane, soit 0,002.

La courbe de la figure 18 montre une telle membrane à structure sandwich qui, bien que plus

étendue que les membranes en métal nu (genre Hitachi) présente, au delà de 2 500 Hz des accidents suivis d'une « cassure » générale du travail en piston, appelée première résonance. Au delà de celle-ci les pertes mécaniques internes augmentent, le fractionnement de la membrane devient très irrégulier et il se produit, par coïncidences de modes de vibrations et de phase générale, des creux et points prononcés suivis d'une chute rapide de niveau acoustique. C'est le phénomène constaté sur les membranes en polystyrène expansé mues à partir d'un seul point.

Il serait souhaitable cependant que dans le haut du spectre la chute de niveau se fasse très régulièrement, à raison si possible de 6 dB/oct, pour permettre

un bon raccord subjectif avec les transducteurs spécialisés dans le haut médium ou l'aigu. Très souvent, une pointe prononcée (première résonance de « cassure ») reste audible même si filtrée parfaitement. Il se produit en effet comme une intermodulation, une vibration de sympathie, une « suction », une attraction de tous les sons reproduits vers cette résonance qui, bien que filtrée peut réapparaître à nouveau, et procure alors une coloration audible marquée.

Mais comme il en a été question plus haut tous ces problèmes proviennent de ce que la membrane n'étant pas mue en tous ses points et avec la même force. Comparativement la membrane de quelques microns d'épaisseur du haut-parleur électrostatique, du haut-parleur électro-

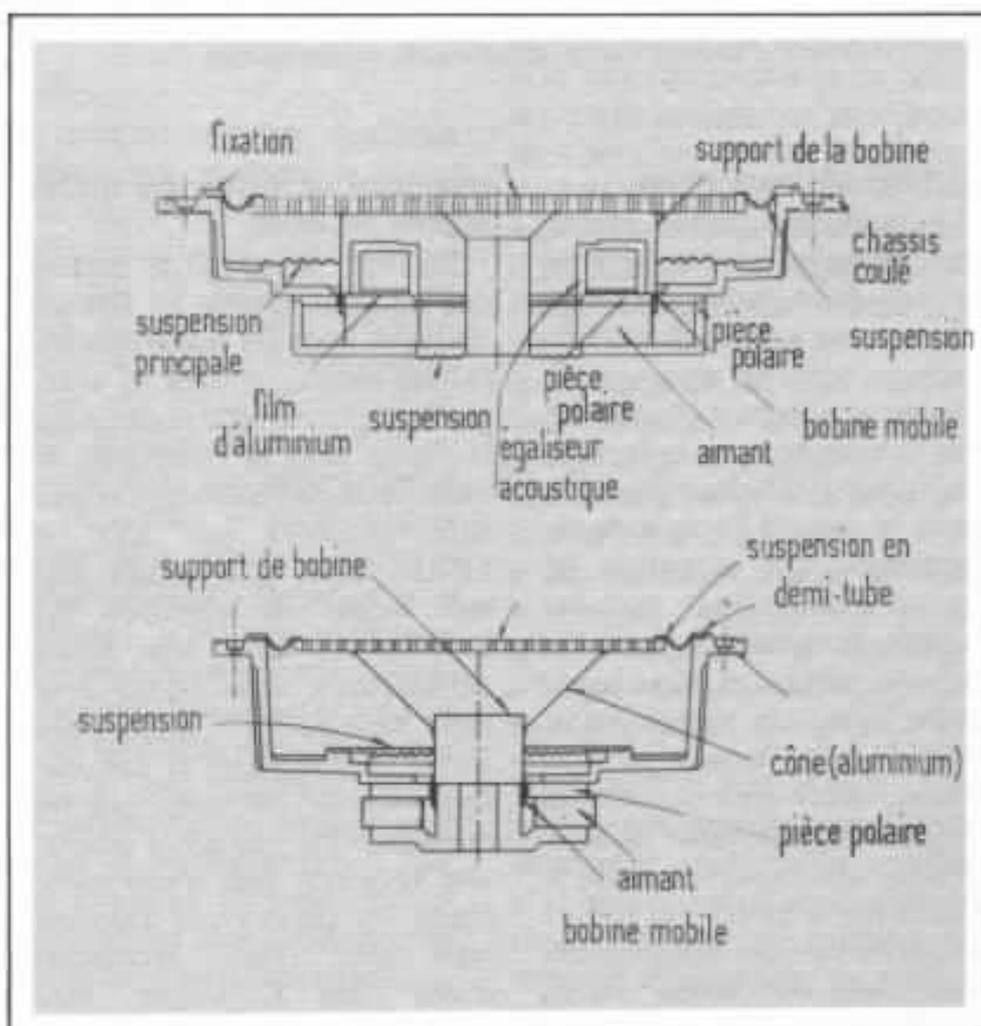


Fig 18 : haut-parleurs plans avec 1 et 2 moteurs.

dynamique à membrane plane peut travailler pratiquement en piston sur une bande relativement large, malgré sa grande souplesse, grâce à cet avantage. Dans le haut-parleur plan réalisé par SONY il est fait usage de quatre moteurs afin de réduire les modes de vibrations non linéaires. Sur la figure 19 on voit en coupe une partie du transducteur pour lequel la membrane (nid d'abeille) reliée à la bobine mobile par un prolongement de celle-ci offre une transmission de la force motrice sur un vecteur résultant très élargi, le plus mauvais, car étant de  $90^\circ$ . Dans ce cas et comme on le voit sur la figure 19 c'est un système de transmission qui tente d'utiliser au mieux la rigidité mécanique du diaphragme. Dans tous les cas, il y a un compromis. Une bobine mobile trop grande offre une meilleure « prise » sur la membrane mais alourdit le système, une bobine mobile de grand diamètre montée presque au niveau de la périphérie (genre Périodyne, (Suisse) ou Sanyo (Japon) sur un circuit magnétique en forme de tore exige soit une double suspension pour éviter le balancement, soit une perte de rendement due à un élargissement obligatoire de l'entrefer.

### Résultats

Devons-nous tenter d'améliorer la technique des corrugations sur le cône conventionnel ? Devons-nous plutôt passer aux nouvelles technologies du genre structure nid d'abeille qui est peut-être un progrès mais peut-être aussi une astuce commerciale généralisée.

Du point de vue résultats subjectifs il est encore tôt pour se prononcer. Une « trop bonne » transmission mécanique, linéari-

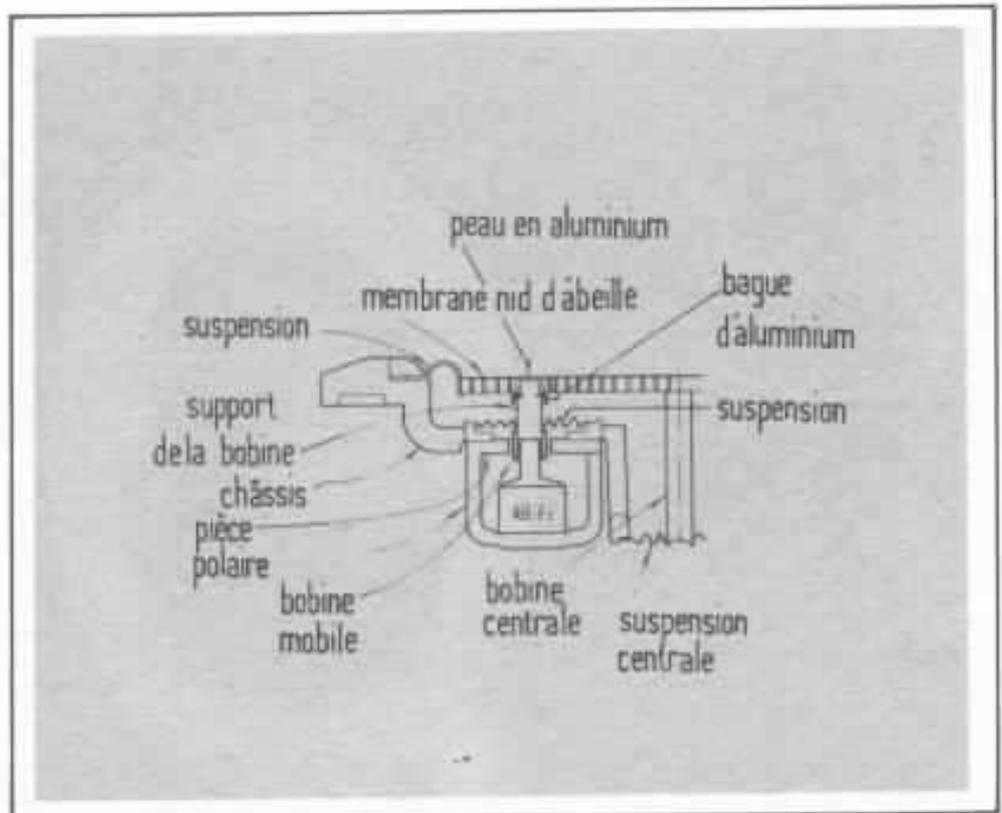


Fig 19 : détail du haut-parleur plan Sony.

sant une bonne partie du spectre sonore a le défaut majeur d'être suivie d'une réponse irrégulière dans le haut du spectre. Les membranes conventionnelles à corrugations ou formes de courbure étudiée, traitement partiel amortissant, peuvent éviter les accidents violents de réponse en fréquence mais donnent aussi, en général de moins bons résultats de travail en piston et de réponse en phase. Du point de vue mécano-acoustique une membrane de type « nid d'abeille » est désavantagée par l'effet de découplage de nombreux collages et de discontinuité de matériaux trop divers. La membrane, plaque vibrante doit « sonner » bien alors que toutes membranes connues ne « sonnent » pas d'une façon neutre c'est-à-dire soit sur une résonance caractéristique, soit d'une façon « fêlée » (présence de nombreux collages ?) soit d'une façon trop sourde (fort amortissement interne ou faible vitesse de trans-

mission mécanique).

Mais songeons que le meilleur compromis est toujours celui qui, même imparfait théoriquement, donne les meilleurs résultats subjectifs. Comme il en est pour la différence existant entre un bon et un mauvais violon, devons nous « domestiquer » le fractionnement non contrôlé, les modes de vibrations, non pas en vue d'un meilleur travail en piston mais plutôt en vue du meilleur résultat subjectif possible ? Du point de vue caractéristique de non linéarité ou mouvements incontrôlables depuis la bobine mobile, devrions-nous pas considérer le haut-parleur comme un reproducteur presque parfait pour lequel le « reste » devrait être conçu comme un instrument de musique ? C'est en tous les cas ce que laisse penser quelques rares haut-parleurs du marché qui ont su, par leurs performances subjectives remarquables, séduire nos oreilles plusieurs dizaines d'années de suite.

**Page non  
disponible**

# L'élaboration d'une enceinte acoustique

Gérard Chrétien

*Phonophone, est une marque bien connue de nos lecteurs. Jean Claude Tornior, son animateur a récemment développé une enceinte « haut de gamme », la BG, elle est la synthèse de critères qui lui tiennent particulièrement à cœur, la dynamique est la juste restitution de l'image sonore. Il s'est attaché à ce que chacun des transducteurs ait une réponse impulsionnelle en régime sinusoïdale excellente sur le spectre qui leur est imparti. Jean Claude Tornior a relaté son expérience pour nos lecteurs.*

**Gérard Chrétien :** Jean-Claude Tornior, la conception de votre nouvelle enceinte repose sur la réponse impulsionnelle. Pour cela vous vous êtes attaché à ce que chacun des haut-parleurs restitue convenablement l'attaque d'un signal sinusoïdal. Pourquoi ne pas avoir employé un signal carré ?

**Jean-Claude Tornior :** J'ai voulu réaliser une enceinte qui soit dynamique, qui puisse restituer toute l'énergie dans la première portion d'une sinusoïde. Le signal carré est un signal à trop large spectre. Il est trop dif-

ficile à analyser, surtout dans le cas de la conception d'une enceinte acoustique. Néanmoins je l'utilise pour effectuer la mise en phase entre les divers haut-parleurs constituant l'enceinte acoustique. Dans ma réalisation j'ai sélectionné les composants les uns après les autres, un de mes critères de choix a été effectivement la réponse à la première période d'une sinusoïde. Ainsi chaque haut-parleur peut donc être testé dans la bande de fréquences qu'il est chargé de reproduire.

**G.C. :** Quelle a été votre base de

départ, avez-vous commencé par le boomer ?

**J.C.T. :** Non, j'ai commencé par le bas-médium. J'ai eu le coup de foudre pour un haut-parleur Peerless de 20 cm. Il reproduit une impulsion sans aucun traînage de 200 à 1 500 Hz, avec une très faible distorsion. Il possède un très gros moteur et une membrane fine imprégnée. A mon avis, la bande de fréquences qu'il reproduit est la plus importante pour une reproduction « réaliste » de la musique.

**G.C. :** C'est la zone où il y a plus

d'énergie présente en régime musical ?

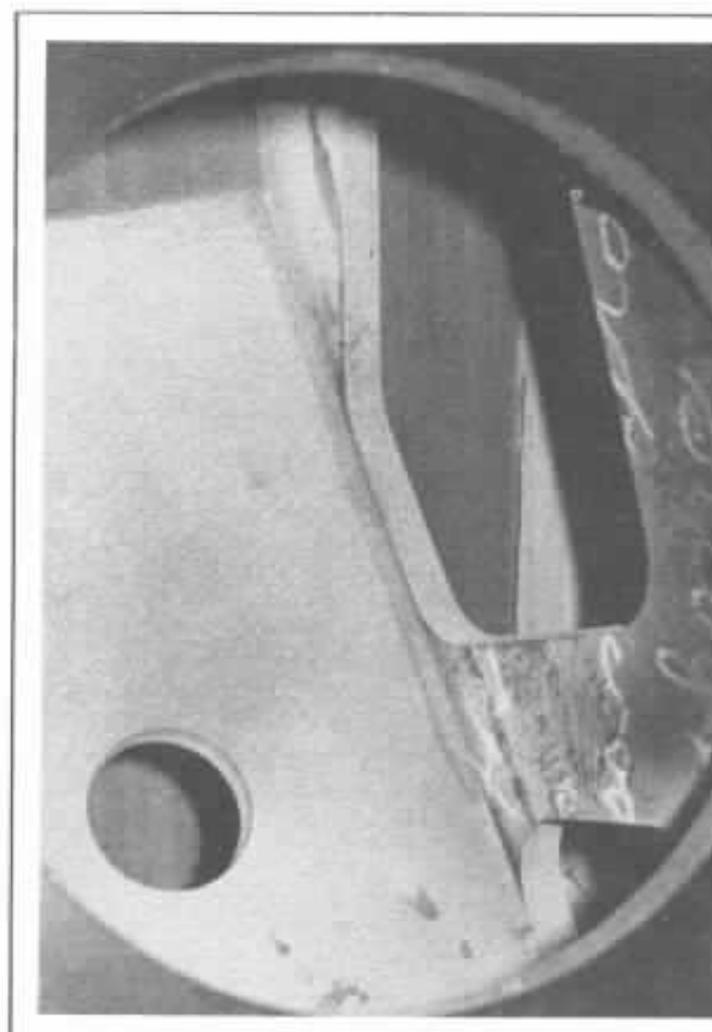
**J.C.T. :** Oui. Un de mes amis, preneur de son, partageait cet avis. Pour lui l'enceinte qu'il préférait était un modèle équipé d'un médium LE 8T Lansing, lequel avait énormément de dynamique. Le Peerless avec son gros moteur, sa bobine de 36 mm, sa membrane légère, donne d'excellents résultats dans la bande bas-médium. Je tenais là un très bon haut-parleur, mon enceinte s'est élaborée autour de celui-ci.

**G.C. :** Je crois pourtant, que vous aviez d'autres idées au départ ?

**J.C.T. :** En effet, des expériences préalables sur l'utilisation de haut-parleurs débafflés m'avaient fortement encouragé. C'est une méthode très efficace pour s'affranchir des effets de bords. En réalité, ma première idée avait été d'adopter un bafflage de forme pyramidale, en rapport avec les longueurs d'onde des fréquences reproduites par chacun des transducteurs.

Les effets de bords sur les angles vifs du coffret sont une véritable catastrophe. Ils sont source d'imprécision dans la restitution. Le débafflage d'un haut-parleur, lorsque cela est possible, dans la zone médium et aiguë procure une précision étonnante.

Je me suis donc attaché à appliquer ce principe pour cette enceinte. Cela me fixait des contraintes immédiates telles que l'impossibilité d'employer des tweeters à dôme. Leur émission se fait surtout sur la périphérie et la bande passante est liée aux dimensions du bafflage. Le centre du dôme est sujet à des ondes



*Détail de l'armature interne de la partie basse on voit le trou du résonateur ou sera fixé le tuyau et la mousse d'amortissement.*

stationnaires qu'il est possible d'amortir en plaçant une goutte de vinyl en son centre, cependant personne ne le fait ! Bref, il me fallait un tweeter à cône. Le choix est très limité. Je suis parti du classique Audax TW 8 B, qui est capable de reproduire en pleine amplitude la première période d'un train de sinusoïde. Malheureusement il ne peut pas descendre proprement en dessous de 6 000 Hz.

**G.C. :** Vous teniez là votre second transducteur ?

**J.T.C. :** Non, pas encore, car ce haut-parleur a un léger traînage inhérent à son rapport poids de bobine/poids de membrane. J'ai dû utiliser une bobine de 4 Ohms plus lourde, qui a aussi, pour avantage de limiter la self. L'alourdissement de la bobine a

limité la bande passante en haute fréquence, mais cela n'est pas critique car sa coupure se situe encore à 30 000Hz et sa réponse en pleine impulsion est tenue jusqu'à 20 000Hz. Un enduit silicone non séchant sur une seule face de la membrane amortit les suroscillations parasites.

**G.C. :** La seconde étape était franchie mais cela vous imposait un système à quatre voies. Trouver un médium qui satisfasse les conditions de rendement et de réponse impulsionnelle n'a pas dû être facile ?

**J.C.T. :** C'est exact. J'ai cherché dans tous les haut-parleurs existants l'intermédiaire qui puisse couvrir la bande de fréquences de 1 500 à 6 000 Hz, sans résultat je dois l'avouer. Tous les haut-parleurs du marché destinés

à cette partie du spectre ont une bobine mobile de 25 mm et ont une morphologie de boomer. Aussi, ils ne montent pas convenablement en impulsion, la plupart coupent à 1 500 Hz. Je me suis alors orienté vers des bobines de 19 mm, j'ai trouvé un haut-parleur d'autoradio sur lequel j'ai fait mettre un plus gros aimant. A ce stade cependant je songeais à abandonner mon projet. Si la réponse en impulsion de ce haut-parleur était satisfaisante, ce dernier avait des oscillations marquées dans sa réponse en amplitude, dues à son poids de bobine élevé. Je ne voyais pas quelle solution adopter pour s'en affranchir.

C'est sur son transducteur que j'ai pris conscience de la très grande importance du rapport poids de bobine/poids de membrane. Ce médium montait à 10 kHz et démarrait 1,5 kHz, mais son trainage était épouvantable. Un enduit m'a permis d'éliminer les suroscillations, malheureusement au détriment de la bande passante qui coupait en dessous de 6 000 Hz. J'ai donc essayé de

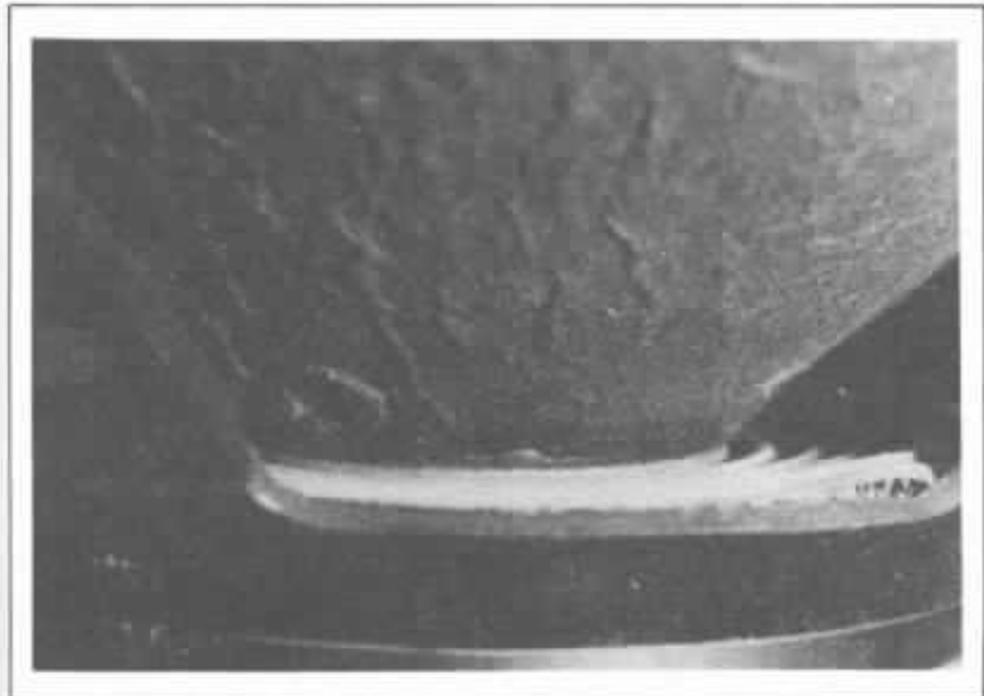


*Le haut-parleur de médium de 8 cm de diamètre. On remarquera l'enduit de la suspension et du cache noyau. Un autre enduit n'est pas visible, celui du dos de la membrane dont l'importance est grande.*

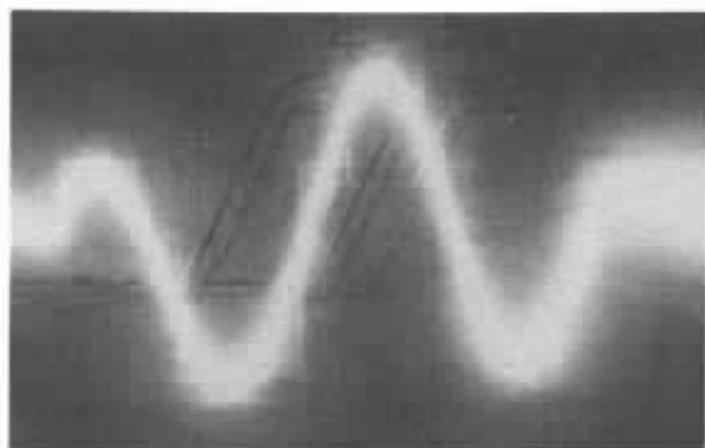
diminuer la quantité d'enduit utilisée, mais sans résultat je dois dire. C'est alors que j'ai réalisé

qu'un enduit très léger déposé uniquement sur le dos de la membrane en papier suffisait pour homogénéiser la structure du papier de la membrane. Les oscillations parasites étaient éliminées, pourtant le trainage subsistait. Des essais avec un cache noyau plat et une bobine plus lourde, m'ont aidé à améliorer le comportement. C'est à ce niveau que j'ai réellement pris conscience de l'importance des rapports de masses. Cela déboucha sur d'autres modifications. Elles consistaient d'une part à rigidifier la suspension mousse périphérique de manière à avoir une stabilisation par les bords, et d'autre part à imprégner le cache-noyau dont le rayonnement amenait des perturbations.

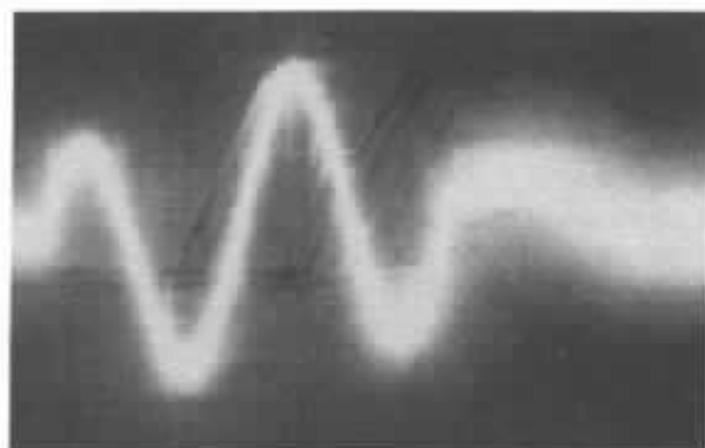
Ce haut-parleur est celui qui



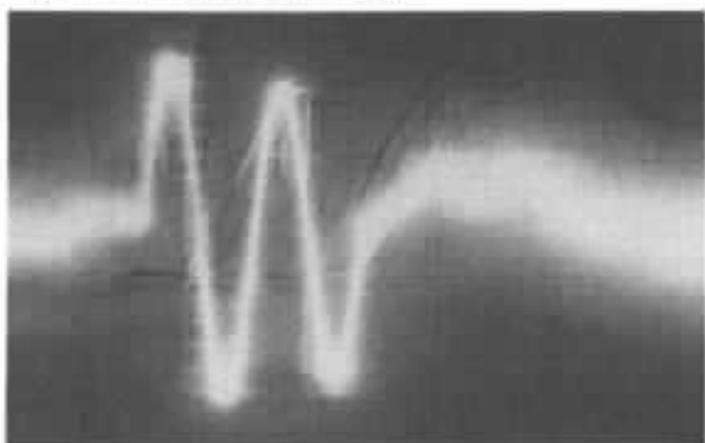
*Le haut-parleur de graves de 36 cm. Vue de détail du Spider. On remarquera les trous de décompression arrière placés sous le cache noyau.*



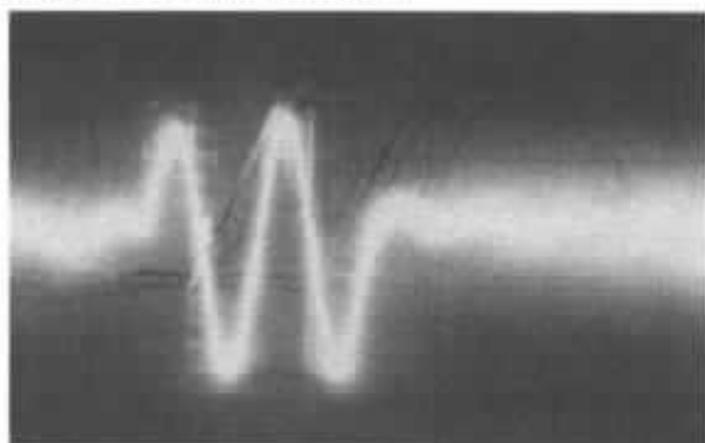
*Réponse du boomer à 70 Hz.*



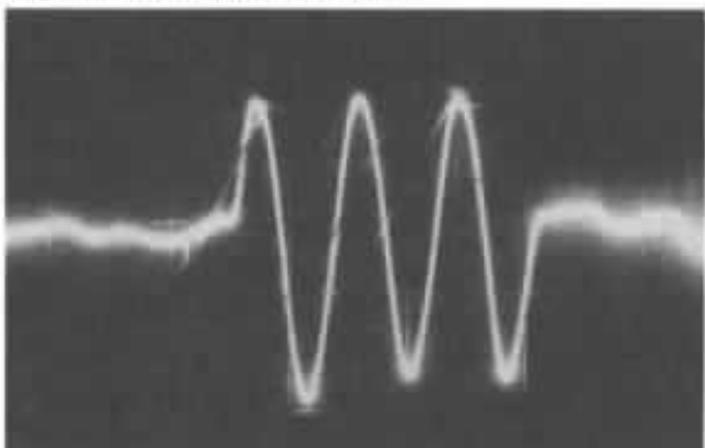
*Réponse du boomer à 100 Hz*



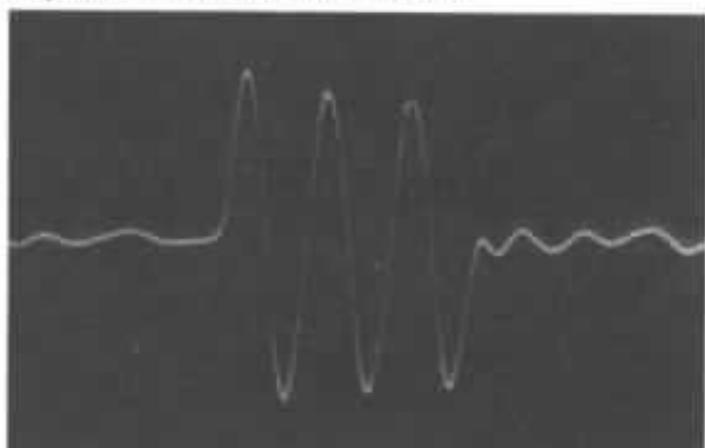
*Réponse du boomer à 200 Hz*



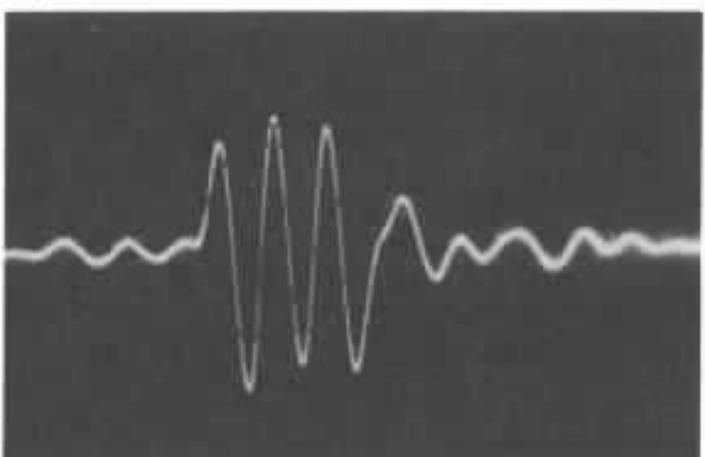
*Réponse du bas-médium à 200 Hz*



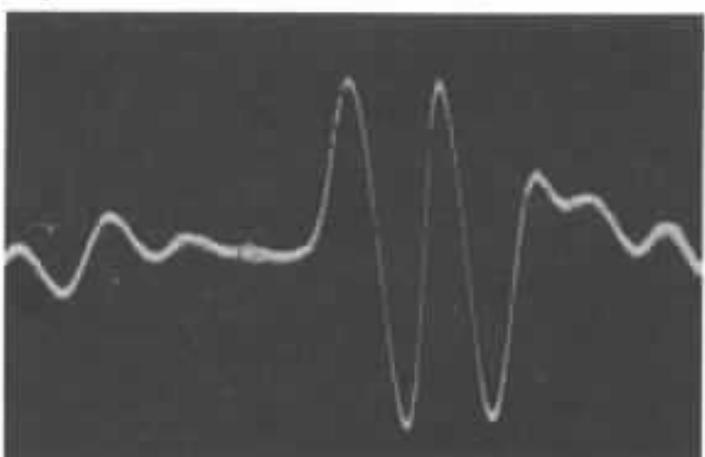
*Réponse du bas-médium à 500 Hz*



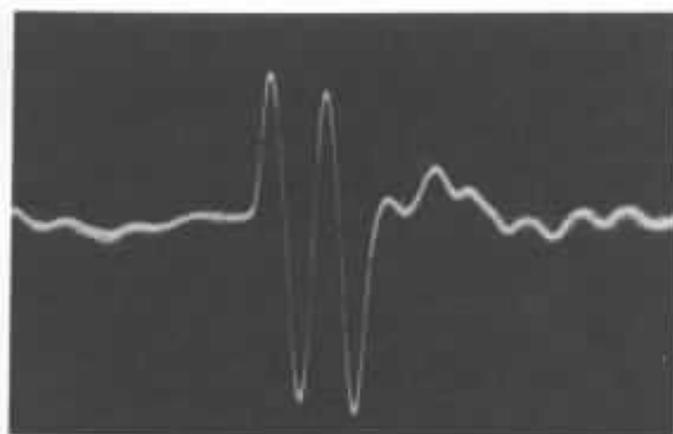
*Réponse du bas-médium à 1 500 Hz*



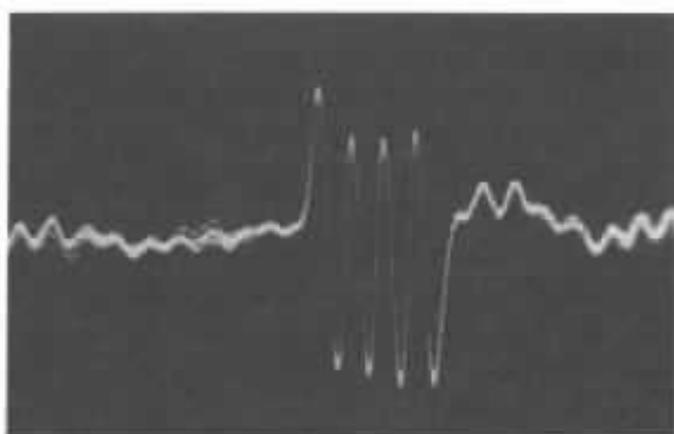
*Réponse du médium à 3 000 Hz*



*Réponse du médium à 6 000 Hz*



Réponse du tweeter à 9 000 Hz



Réponse du tweeter à 18 000 Hz

subit le plus de modifications. Elles sont toutes effectuées chez nous. Elles consistent tout d'abord à déposer un poids d'enduit vinyl bien déterminé sur le dos de la membrane, à l'aide d'un pinceau, à travers les petits trous du saladier. Ensuite, une goutte de vinyl imprègne le cache-noyau et la suspension périphérique est durcie.

Après cela, le haut-parleur est mesuré pour vérifier si « l'opération » est réussie. Ce traitement s'accompagne de dispersions, des retouches sont souvent nécessaires.

**G.C.** : C'est donc toutes ces modifications apportées à ce haut-parleur de médium qui vous ont fait prendre conscience de l'importance essentielle du rapport poids de bobine/poids de membrane ?

**J.C.T.** : C'est juste, ces constatations m'ont aidé à éliminer des accidents apportés par le tweeter. Comme je le mentionnais précédemment j'ai pu éliminer le traînage du TW 8 B en modifiant son rapport de masse. Il va de soi que toutes ces étapes se sont faites parallèlement avec les retouches et les améliorations qui s'imposaient au fur et à

mesure que la conception de mon enceinte avançait.

**G.C.** : Tous les essais que vous avez fait sur ces trois haut-parleurs étaient effectués sans baffle ?

**J.C.T.** : Oui bien sûr. Le haut-parleur testé était fixé sur un pied, sans baffle, le micro placé à 12 cm et à 20 ou 30° de l'axe. Les trois haut-parleurs ainsi obtenus après modifications convenaient parfaitement: leur réponse sur l'attaque d'un train de sinusoïde était excellente sur la bande de fréquences qu'ils étaient chargés de reproduire. Pourtant le problème était loin d'être terminé car, chacun d'eux n'avait été analysé que pris isolément. Le positionnement relatif de chacun d'eux est lié au filtrage retenu qui joue sur la phase et le diagramme de rayonnement. Mais nous verrons cela plus loin.

**G.C.** : Le registre bas-médium-aigu était résolu, il restait à déterminer le haut-parleur de grave. Quels critères vous ont guidé ?

**J.C.T.** : Il me fallait pour des questions de réponse dynamique dans le bas du spectre une surface d'émission qui soit aussi

grande que possible, de sorte à avoir un excellent couplage à l'air. Cela allait de paire avec un volume de charge aussi important que possible.

**G.C.** : Le haut-parleur de grave est chargé en bass-reflex ?

**J.C.T.** : Exactement, mais l'accord est un peu particulier. La réponse en amplitude présente une légère bosse à la coupure, cela pour une meilleure réponse impulsionnelle. Cette bosse est amortie par un résonateur interne. Ainsi, l'ouverture des événements peut être optimale pour la réponse en impulsion. Ils agissent comme un passe-haut quasi parfait. Le haut-parleur est ainsi libre, il ne « sent » pas le volume interne de l'enceinte.

**G.C.** : Quel volume d'enceinte a été retenu ?

**J.C.T.** : On est tenu à des critères hautement « techniques ». Une enceinte commercialisée doit dans la mesure du possible pouvoir passer par les portes. Je suis donc arrivé à un volume de 226 litres. Le choix du haut-parleur quant à lui a été fait après de nombreux essais. Je tenais à une bobine d'un diamètre minimum de 50 mm, cela

pour une question d'énergie essentiellement. Avec des 30 cm le couplage n'était pas parfait. En réalité je n'ai pas réussi à mettre ce paramètre en évidence à la mesure de manière rigoureuse. A l'oreille, des « bursts » en basse fréquence ne sont pas reproduits de la même manière avec une grosse et une petite bobine. Je suis arrivé à un compromis d'une bobine de 66 mm.

Je tenais par ailleurs, à un aimant ticonal pour avoir un champ magnétique important sans perte de niveau dans le grave et sans excès d'amortissement. C'est souvent les problèmes que l'on rencontre avec des aimants ferrite. Je pense que c'est pour des raisons d'homogénéité du flux, de répartition du champ dans l'entrefer. La résonance de mon haut-parleur chargé se situe à 50 Hz.

**G.C. :** Ce haut-parleur n'a pas été réalisé selon votre propre cahier des charges ?

**J.C.T. :** C'est un haut-parleur de 36 cm couramment fabriqué, mais que très peu de personnes utilisent. Peut-être est-ce parce que son coût est élevé. C'est un haut-parleur que je connaissais bien. J'avais, en fait, une idée derrière la tête quant à son utilisation, lorsque j'ai commencé mon projet. J'ai fait des essais avec des haut-parleurs moins onéreux mais sans résultat. Bien sûr, j'aurais pu utiliser certains haut-parleurs américains et arriver aux mêmes performances. Cependant je ne pense pas que cela m'ait apporté un surcroît de qualité. Je préfère utiliser un haut-parleur fabriqué en France, ce qui représente des avantages en matière d'achat et de délais.

**G.C. :** La résonance se situe à

50 Hz, ce qui ne représente pas une coupure très basse pour un haut-parleur d'un aussi grand diamètre ?

**J.C.T. :** A 40 Hz la réponse en amplitude est à - 4 dB en fonctionnement en piston. Et puis l'enceinte délivre un « décor sonore » jusqu'à 20 Hz.

**G.C. :** Un « décor sonore », qu'entendez-vous par là ?

**J.C.T. :** C'est ce qui est obtenu avec une enceinte qui procure du niveau dans le grave, mais sans détails. C'est du décor. Bien souvent l'émission des événements est utilisée à cette fin, la réponse peut-être très étendue dans le bas du spectre, mais cela n'apporte rien à la restitution.

A la mesure en régime impulsionnelle, le développement d'un train d'ondes, dans la partie de bande dénommée « décor sonore » s'effectue suivant une enveloppe en fuseau avec un déphasage souvent important à l'attaque.

**G.C. :** Est ce que ce haut-parleur subit des modifications ?

**J.C.T. :** Oui, quelques unes, mais elles sont minimes. Il est enduit pour améliorer sa réponse dans le médium de sorte à ce qu'il ait une courbe légèrement décroissante sans filtrage au dessus de 500 Hz. Ainsi je peux le filtrer plus facilement.

**G.C. :** Les quatre haut-parleurs étaient donc déterminés, quelle fut l'étape suivante ?

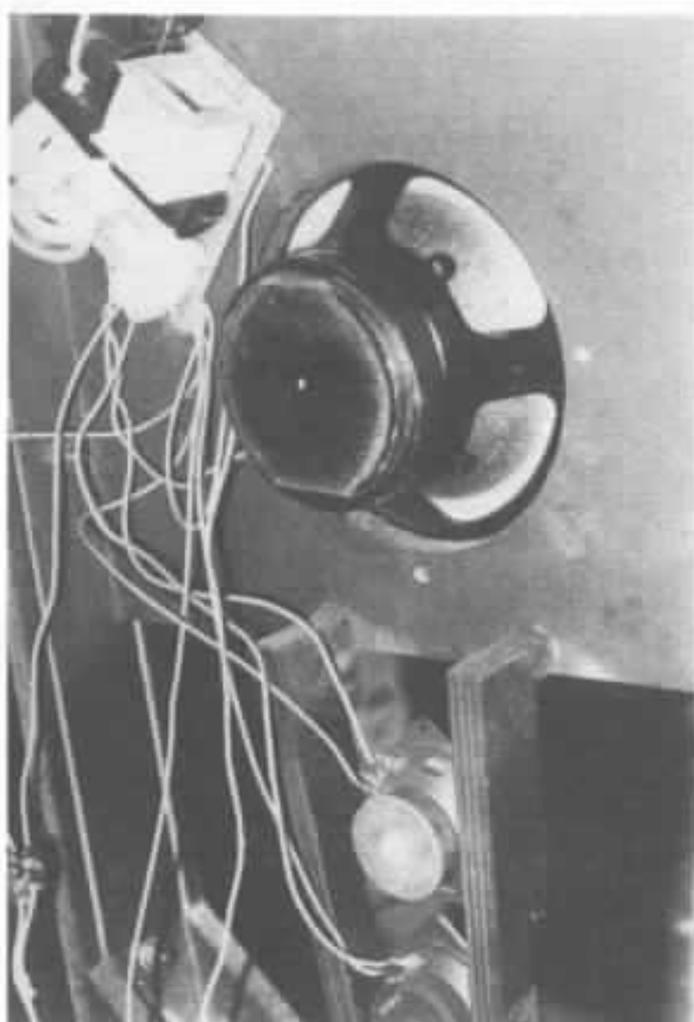
**J.C.T. :** Je désirais utiliser les haut-parleurs de médium et d'aigu débafflés pour une parfaite restitution dans l'espace. Des expériences antérieures avec les projecteurs de son, où le haut-parleur n'a aucun baffle

sur son pourtour, m'ont montrées que dans un tel cas l'onde incidente est extrêmement homogène avec un diagramme polaire dont les lobes latéraux sont très réduits. La meilleure preuve en est que l'intelligibilité du message est conservée même à grande distance, ce n'est pas le cas avec les haut-parleurs bafflés, où les réflexions sur les bords brouillent le message dans cette partie du spectre.

**G.C. :** Il fallait cependant les fixer les uns par rapport aux autres ?

**J.C.T. :** Oui, j'ai choisi des baguettes aussi fines que possible pour éviter tout effet de bord et toute réflexion parasite. Pour le bas-médium, compte tenu des longueurs d'ondes mises en jeu dans cette partie du spectre, j'étais tenu à utiliser un baffle. A ce niveau j'ai exploité une vieille idée que j'avais appliquée il y a près de 18 ans. A l'époque on ne disposait que de médiums dont la qualité n'était pas excellente. L'utilisation d'un baffle plan arrangeait alors bien les choses. D'ailleurs Briggs l'indique dans ses ouvrages. Je pense que plusieurs réalisations de haut niveau actuelles tirent leurs qualités de ce principe du baffle plan, où l'on évite tout son de boîte. Je suis donc parti de cette idée qui a, en outre, l'avantage sur le plan dynamique de ne pas détériorer le comportement du haut-parleur par une charge acoustique. Le baffle plan présentait donc tous les avantages dont j'avais besoin. Cependant je n'étais pas certain que les résultats seraient à la hauteur de mes espérances.

J'ai alors fait des essais avec mon haut-parleur de 20 cm. Les



*Détail de la partie supérieure du prototype. Le filtre est réalisé à partir de selfs à air et condensateurs au papier métallisé.*

dimensions du baffle plan ont été déterminées de manière à obtenir une coupure acoustique naturelle aux alentours de 200 Hz. Je suis arrivé à la valeur que je souhaitais avec une coupure douce à 12 dB/octave.

**G.C. :** Les choses se décan-  
taient. Comment avez-vous défini la position du médium et celle de l'aigu qui sont particulières, car le bas-médium se trouve au dessus de ces haut-parleurs ?

**J.C.T. :** C'est le résultat d'études que j'avais réalisées préalablement. Le centre acoustique d'une enceinte correspond à la position du haut-parleur d'aigu. La perception semble « démarrer » sur les fréquences aiguës puis s'attacher au reste du spectre. L'homogénéité de la

restitution est meilleure en utilisant cette démarche.

**G.C. :** Le haut-parleur de médium avait-il des dimensions suffisantes pour que sa coupure naturelle se situe aux environs de 1500 Hz ?

**J.C.T. :** Oui, cela n'a pas posé de problèmes si ce n'est une légère surtension à cette fréquence que j'ai pu éliminer avec un très léger bafflage.

**G.C. :** Abordons la question du filtrage. Comment procéder vous habituellement ?

**J.C.T. :** Ma méthode consiste à partir du tweeter en effectuant les diverses coupures, passe haut et passe bas, successivement. A

une fréquence considérée, la coupure haute et la coupure basse sont faites simultanément car il y a une rejection entre les deux haut-parleurs adjacents. La mise au point définitive d'un filtre ne peut se faire qu'avec les haut-parleurs branchés sur celui-ci. Remplacer ceux-ci par une résistance pure est une utopie.

Chacun des haut-parleurs adjacents est donc pris isolément, tout en restant branché sur le filtre. L'un d'eux est placé dans la laine de verre pour absorber son rayonnement. Ainsi il est possible d'examiner la forme de la coupure effective, que je fixe à -3 dB. Ensuite la phase de chacun des transducteurs est choisie de manière à ce qu'il n'y ait pas de rebondissements sur la courbe de réponse globale. Cela est souvent responsable de dureté à l'écoute.

Puis les haut-parleurs sont calés en utilisant un signal carré et en faisant coïncider les fronts d'attaque. La mise au point définitive se fait en régularisant la réponse en amplitude par retouches sur les valeurs des composants du filtre.

**G.C. :** Les haut-parleurs sont donc mis en phase relative deux à deux. Il n'y a pas de mise en phase globale de l'enceinte ?

**J.C.T. :** C'est exact. A chacune des coupures j'effectue une mise en phase entre les deux haut-parleurs concernés, à l'exception du grave où mécaniquement cela n'est pas possible. Aussi mon enceinte n'est elle pas capable de reproduire un signal carré. Je considère la phase par rapport à un plan et non par rapport à un point. Un micro effectue une mesure qui est ponctuelle, ce qui du point de vue perceptif n'est pas significatif.

**Page non  
disponible**

# Tests d'appréciations subjectives avec nos lecteurs

## 1 - Les enceintes acoustiques

*Gustavo Altieri - Gérard Chrétien - Jean Hiraga*

*Comme nous l'avions annoncé dans notre précédent numéro, nous avons entrepris d'effectuer des tests d'appréciations subjectives avec un échantillonnage de nos lecteurs abonnés tirés au hasard. Pour ce premier volet nous avons choisi les enceintes acoustiques, sujet qui suscite bien des polémiques.*

### **Introduction.**

De nombreuses études, et l'expérience de chacun ont mis en évidence l'inefficacité des méthodes couramment pratiquées pour évaluer la qualité globale d'un système, ou élément, de reproduction sonore. Les tests physiques représentent un aspect trop restreint de l'image acoustique fournie par un dispositif électronique ou électromécanique. L'écoute personnelle, quant à elle, fournit des appréciations individuelles qui rendent toujours discutables les conclusions qui peuvent être tirées. On est donc loin de pouvoir exprimer

les caractéristiques d'une chaîne haute fidélité à l'aide de ces deux méthodes. La première fournit des données de caractères objectifs, admettant par conséquent la stricte reproductibilité des tests. Les résultats ont aussi l'avantage d'être facilement transmissibles. Malheureusement, les paramètres ainsi mesurés ne reflètent pas la capacité du système testé à transmettre l'information contenue dans le message sonore original. La deuxième méthode présente toutes les limitations des appréciations personnelles, et la transmission du jugement subjectif passe par l'utilisation

d'une série d'adjectifs de significations plus ou moins nébuleuses.

C'est ainsi qu'appuyés sur une certaine expérience en matière de mesure et d'écoute, sur la connaissance des tests psychoacoustiques et sur une base objective dans le domaine du traitement des données, nous avons conçu une nouvelle méthodologie d'évaluation. Ce travail sera sans doute l'objet de critiques et de réserves, celles-ci nous serviront à perfectionner la méthode et à raffiner nos résultats. Aussi commençons-nous par l'étude statistique d'écoute du maillon le

plus controversé, l'enceinte acoustique.

## Matériel et méthode

### Recrutement :

Dix jours avant la date fixée pour notre test, nous avons effectué un prélèvement de 100 cartes au hasard dans notre fichier d'abonnés. De ce tirage a été exclue toute personne ayant un rapport avec la profession. Un tirage complémentaire a permis de les remplacer. Une lettre a été envoyée aux 100 personnes retenues, en les invitant à prendre contact avec notre rédaction par téléphone. Les personnes disponibles et désireuses de participer à ce test ont donc pris rendez-vous, suivant la tranche d'heures qui les intéressait : 10-12 heures, 13-15 heures, 15-17 heures. Le lieu où se déroulait l'écoute, leur a été communiqué à cette occasion. La veille de l'écoute nous obtenions la répartition suivante pour chacune des trois tranches d'heures : 16, 11, 14 personnes.

### Stimulus

Plusieurs possibilités s'offraient à nous. Utiliser une platine et des disques ou bien un magnétophone. Pour des raisons de répétitivité des tests, la seconde solution a été retenue. La bande utilisée pouvait être soit une bande mère, soit une bande préenregistrée à partir de disques. Nous avons choisi le second cas pour se placer dans des conditions aussi proches que possible de celles d'un amateur. Pour cela, nous avons employé un magnétophone Studer A68. La bande a été réalisée avec le matériel suivant :

- platine Linn Sondek
- bras tangentiel Goldmund
- cellule Grado Signature 3

- 1- G. W. TELEPHON  
Les deux fantômes pour l'odie transverse  
Berthold Fujsken  
Fantôme N° 1 - A major  
Disque ACCENT
- 2- Going Home, THE LA FOUR  
Things ain't what they used to be  
Leandro Amelida, Ray Brown  
Disque IV, Street Cat
- 3- Johann STRAUSS Valzes  
Transcriptions de Schoenberg Berg, Mahler  
Salon de l'Empereur  
Koster Symphonie  
Disque D.C.C.
- 4- HUPPI, RACHIN  
Chœur et orchestre du théâtre de la Scala  
Claudio Abbado  
Prélude  
Disque D.C.C.
- 5- Ella et Duke'Place  
Something live from  
Ella Fitzgerald, Duke Ellington  
Disque VERVE
- 6- MADRID, Le Espéculo des Dieux  
Sigis Nilsson, C. Sisti  
Orch. de Vienne  
Disque DECCA
- 7- Deany PETERSON, We get Request  
Too look good to be  
Hazel Feltman, Ray Brown, Ed. Thigpen,  
Disque VERVE
- 8- Sylvia GILDA  
In station Native Constant  
Live play

Fig.1 : Liste du programme musical remise aux auditeurs

- préamplificateur SRPP (alimentation largement dimensionnée et composants passifs de haute qualité).

Les plages de disques utilisées sont celles indiquées en figure 1. Nous n'avons pas la prétention d'avoir fait un choix particulièrement judicieux. Nous tenions seulement à ce que les divers critères sur lesquels les auditeurs seraient amenés à porter des appréciations, soient mis en évidence de façon claire. La durée totale de l'enregistrement est d'une trentaine de minutes environ.

### Electronique

Le magnétophone Studer utilisé comportant un réglage de volume précis pour chacune des voies, nous avons préféré ne pas utiliser de préamplificateur, de

sorte à limiter l'électronique employée. L'amplificateur était donc attaqué directement. Cet amplificateur devait satisfaire à plusieurs conditions. Il devait avoir une puissance disponible suffisamment élevée pour pouvoir s'affranchir des différences de rendement rencontrées entre les diverses enceintes acoustiques sélectionnées. De plus, nous avons tenu à ce que son image de marque soit la « moins contestée » possible. Cela nous a conduit à choisir l'Audio Research D 110 B. Nous remercions Audio Concepts de bien avoir voulu nous prêter cet amplificateur pour la circonstance.

### Commutateur et câbles

Nous tenions à ce que toutes les connexions entre l'amplificateur et les enceintes soient purement passives. Nous disposions d'un dispatching Audio Authority qui satisfaisait cette condition. Il offrait l'avantage supplémentaire de pouvoir commander des lampes témoins pour offrir un repère sur l'enceinte en fonctionnement, pour les auditeurs.

Le câble utilisé était de type Lucas. Deux mètres reliaient l'amplificateur au selecteur, quatre mètres reliaient ce dernier à chacune des enceintes.

### Salle d'écoute

Nous avons loué pour la circonstance la salle de conférence d'un hôtel du 16<sup>e</sup> arrondissement. Celle-ci a été choisie pour ses qualités acoustiques : immeuble ancien, murs non parallèles, pas de résonance critique et temps de réverbération suffisamment élevé pour que l'amortissement provoqué par la quinzaine d'auditeurs présents ne nous place pas dans des conditions trop éloignées de celles rencontrées lors d'écoutes

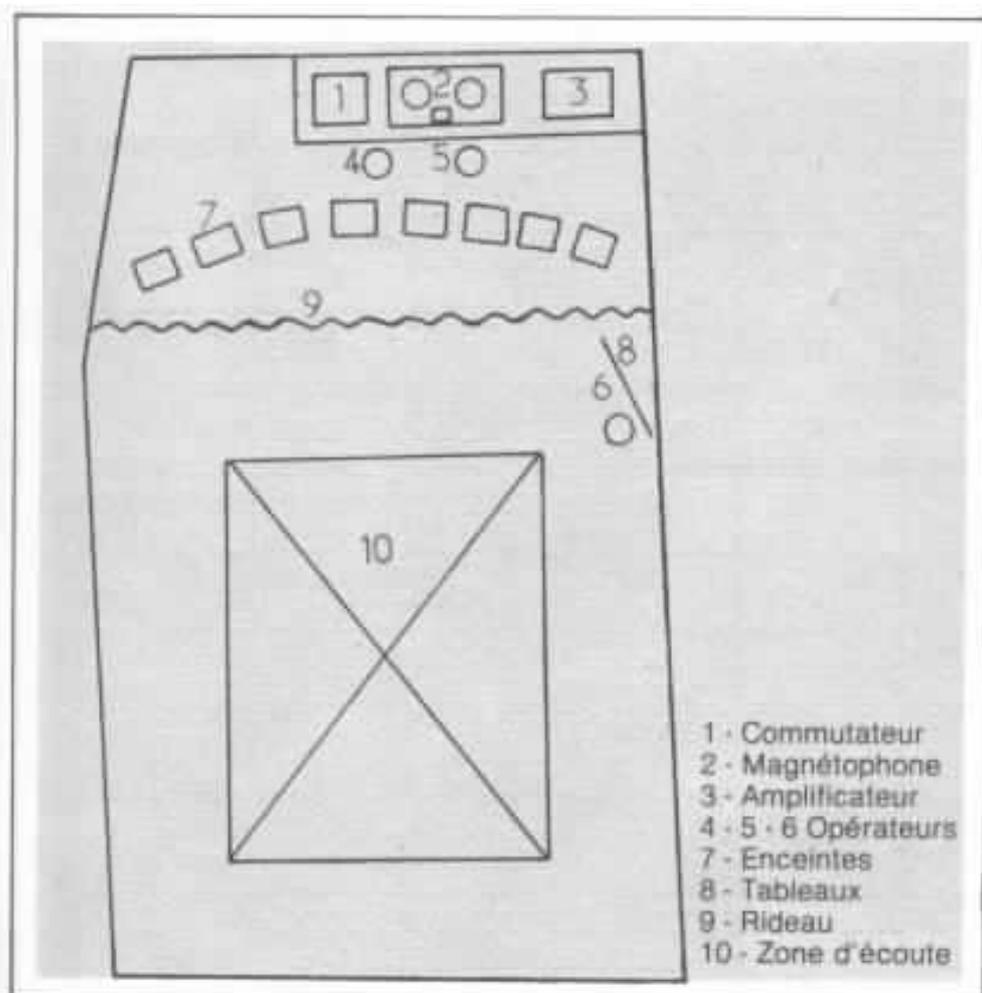


Fig. 2 : La salle d'écoute

domestiques. Par ailleurs, la configuration de la pièce, 5 m x 10 m environ, permettait de placer les enceintes derrière un rideau, ainsi que toutes les commandes. Les auditeurs n'avaient donc pour vision que le rideau et les lampes témoins signalant l'enceinte en fonction.

#### Le choix des enceintes acoustiques

Le choix a été simple. Il a porté sur des modèles dont le principe de fonctionnement est relativement similaire. Pour ces raisons nous n'avons pas sélectionné des haut-parleurs fonctionnant en doublet, genre électrostatique. Quatre des paires d'enceintes ont été retenues pour leurs qualités et leur réputation. La cinquième constituait le « piège », une petite enceinte d'un prix bien inférieur.

#### La disposition des enceintes

Nous sommes bien évidemment conscients que la mise en place de cinq paires d'enceintes dans un local ne constitue pas des conditions optimales d'écoute. D'ailleurs notre objec-

tif n'est pas, dans ces tests, d'établir un classement absolu. Bien au contraire, ce sont les valeurs comparatives recueillies qui nous intéressent.

La disposition a été déterminée de telle sorte que la distance entre chaque enceinte d'une même paire soit la même. L'idéal serait dans ce cas de disposer d'un système tournant, pouvant placer chaque paire rigoureusement au même endroit, comme cela se pratique dans certaines grandes firmes japonaises. Malheureusement cela n'est pas à notre portée pour l'instant. Dernière remarque, quant à la position de nos enceintes « pièges », conçues pour être placées contre un mur, cela n'était pas le cas et la réponse dans le grave de ce système n'était donc pas optimale. Leur écartement était en outre légèrement supérieur, nous avons jugé que ce manque de rigueur n'était pas important dans ce cas particulier.

#### Egalisation des rendements

L'échelle des niveaux de pression acoustique délivrée par les diverses enceintes a été déterminée au préalable. Quatre personnes ont participé à cette mise au



Le magnétophone Studer et l'amplificateur Audio Research.

		A	B	C	D	E	STIMULUS
1	IMAGE	Distribution spatiale	5	6	8	7	8
2		Profondeur Positionnement des sources	5	5	8	7	8
3		Précision de détails	6	5	8	7	8
4		Timbre	6	5	8	7	8
5		Dynamique	5	6	8	8	8
6	CONSIDÉRATIONS	Hétérogénéité de la distribution spectrale	5	5	8	7	7
7		Qualité de l'information dans le grave	4	5	7	8	8
8		Qualité de l'information dans le médium	6	5	8	7	8
9	ANALYTIQUES	Qualité de l'information dans l'aigu	6	5	7	7	8
10	APPRECIATION GLOBALE	Corrélation entre l'image reçue et la réalité	6	5	8	7	8
		Commentaire libre	encore à la fois mais manque de précision	meubles équilibrés assez nets	ensemble cohérent équilibré d'après = au C	forme et timbre à priori (Cristina)	à priori et médium (peut-être) timbre dynamique = au C

Exemple d'un formulaire rendu par l'un des auditeurs. Au dos figure son système d'écoute personnel.

point. Les résultats nous ont permis une graduation précise du réglage de volume pour chacune des paires d'enceintes, et cela pour des niveaux acoustiques différents. Nous avons préféré cette méthode à celle utilisant un sonomètre ne donnant une indication que très partielle qui ne tient pas compte du comportement dynamique. De plus, pour élargir notre champ d'investigations, le niveau d'écoute moyen pour chacune des trois séances était légèrement différent. Il s'avère qu'en fonction du niveau d'écoute, l'ordre des préférences peut-être modifié.

### Déroulement de l'expérience.

Le nombre des personnes à chacune des trois séances était respectivement de 16, 11, et 14. A remarquer que toutes les personnes qui avaient pris rendez-

vous étaient présentes, ce qui est à signaler. Nous les remercions vivement.

### Formulaire

Au début de chacune des séances un formulaire était remis à chaque participants avec la liste des plages musicales. Ce formulaire était expliqué par Gustavo Altieri. Il comportait 10 expressions qui représentent chacune une qualité sonore propre à chaque enceinte testée. Ces expressions ont été choisies selon les critères suivants :

- Elles doivent exprimer une caractéristique de l'image sonore capable de représenter une propriété acoustique « réelle », c'est-à-dire que nous avons éliminé des termes tels que « transparence », « moelleux »... qui ont un contenu trop lié à l'individualité de l'auditeur.

- Elles doivent représenter le symbole d'un concept le plus généralisé possible.

- Elles doivent évoquer pour les auditeurs présents une caractéristique perceptuelle qui soit la moins dispersée possible.

La méthode nous obligea donc à imposer une liste d'expressions, accompagnée d'un descriptif de la terminologie. Une discussion avec les participants a été engagée sur la base des explications suivantes :

### A - Image sonore

L'auditeur est appelé à noter sur une échelle de 0 à 10 les caractéristiques propres à l'image acoustique globale reçue des enceintes, selon la distribution et la signification suivantes.

#### Distribution spatiale :

- amplitude, largeur de l'image sonore
- capacité de remplissage



*Jean Hiraga aux commandes*

acoustique de la salle

- capacité de l'enceinte à surmonter les effets perceptifs dérivés de la dimension réduite de la source sonore.

*Profondeur-positionnement des sources*

- capacité du transducteur à reproduire l'information nécessaire à la reconstitution de l'image tridimensionnelle de la source.

*Précision de détails*

- qualité de la « micro information » détectée au sein de l'ambiance sonore globale.

*Timbre*

- ensemble de paramètres permettant l'établissement d'une signature acoustique de chaque transducteur

- « coloration » particulière.

*Dynamique*

- capacité de l'enceinte à res-

pecter l'évolution temporelle des niveaux sonores propres à la source naturelle.

### **B - Considérations analytiques**

L'auditeur est appelé à noter sur une échelle de 0 à 10 les caractéristiques suivantes :

*Homogénéité de la distribution spectrale*

- capacité de l'enceinte à reproduire l'évolution spectrale des instruments

*Qualité de l'information dans le grave*

*Qualité de l'information dans le médium*

*Qualité de l'information dans l'aigu*

### **C - Appréciation globale**

L'auditeur est appelé à noter

sur une échelle de 0 à 10, l'indice de corrélation entre l'image reçue et la réalité, en admettant que l'on parle de la comparaison globale de l'image reproduite avec l'image sonore reçue lors de l'écoute directe.

Les sujets de l'expérience disposent d'une place destinée à un commentaire libre. Il leur est également demandé de donner la description de leur système d'écoute personnel.

### **Distribution du message sonore**

Les plages musicales de 1 à 5 étaient tout d'abord passées en alternant fréquemment (de 15 à 30 secondes) chacune des cinq paires d'enceintes. Les auditeurs étaient invités à ne rien noter pendant cette première phase, celle-ci étant destinée à établir une échelle des valeurs entre enceintes et à se familiariser avec les conditions d'écoute.

Ensuite, chacune des enceintes était écoutée sur le même morceau musical pendant 2 mn environ. Chacune des plages 6, 7 et 8 de la bande a été employée de sorte à avoir des types de musique différents.

Après une pose de quelques minutes, la bande était réécoutée en connectant alternativement chacune des paires d'enceintes. Ce qui fait que chaque enceinte a été écoutée plusieurs dizaines de fois, cela sur des plages musicales différentes.

### **Résultats et discussions**

Selon la méthode décrite, nous avons recueilli les données correspondant à 37 auditeurs répartis en trois groupes respectifs de 15, 8 et 14 personnes. Trois participants ont abandonné l'expérience avant la fin de celle-ci, sans rendre les formulaires. Nous avons éliminé également un formulaire rendu (complet) par un participant qui a quitté la salle avant la fin de la séance.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	N	36	36	37	37	37	36	37	37	37	33
	$\bar{x}$	2.72	3.11	3.19	3.24	2.70	2.58	2.76	3.11	3.38	2.91
	$\sigma$	1.41	1.28	1.20	1.36	1.41	1.61	1.44	1.41	1.19	1.53
	$v$	1.98	1.64	1.44	1.86	1.99	2.59	2.08	1.99	1.41	2.40
	$\sqrt{V}$	51.84	41.16	37.6	42.0	52.2	62.4	52.2	45.3	35.2	53.3
B	N	36	35	37	37	37	36	37	37	37	33
	$\bar{x}$	2.56	2.77	2.43	2.43	2.84	2.22	2.76	2.73	2.70	2.36
	$\sigma$	1.42	1.33	1.46	1.46	1.46	1.41	1.42	1.47	1.58	1.62
	$v$	2.03	1.77	2.14	2.14	2.14	2.01	2.02	2.15	2.49	2.61
	$\sqrt{V}$	55.5	48.0	60.1	60.1	51.4	63.5	51.4	53.8	58.5	68.6
C	N	36	36	37	37	37	36	37	37	37	33
	$\bar{x}$	3.19	3.36	3.43	3.27	3.59	3.36	3.14	3.59	3.54	3.33
	$\sigma$	1.01	1.22	1.24	1.15	1.07	1.22	1.27	1.09	1.12	1.21
	$v$	1.02	1.49	1.53	1.32	1.14	1.49	1.62	1.19	1.26	1.48
	$\sqrt{V}$	31.7	36.3	36.2	35.2	29.8	36.3	40.4	30.4	31.6	36.3
D	N	36	36	36	36	37	35	36	37	37	32
	$\bar{x}$	2.89	2.83	2.64	2.72	2.73	2.49	2.67	2.68	2.73	2.56
	$\sigma$	1.24	1.32	1.48	1.06	1.24	1.34	1.39	1.11	1.17	1.22
	$v$	1.53	1.74	2.18	1.12	1.54	1.79	1.94	1.23	1.37	1.48
	$\sqrt{V}$	42.9	46.6	56.1	39.0	45.4	53.8	52.1	41.4	42.9	47.7
E	N	36	36	37	37	37	36	37	37	37	32
	$\bar{x}$	2.89	3.08	3.32	2.89	3.49	3.08	3.14	3.19	3.32	2.84
	$\sigma$	1.33	1.54	1.32	1.63	1.41	1.59	1.48	1.13	1.38	1.41
	$v$	1.76	2.36	1.73	2.65	1.98	2.54	2.18	1.27	1.89	2.01
	$\sqrt{V}$	46.0	50.0	39.4	56.4	40.4	51.6	47.1	35.4	41.6	49.6

Fig.3 : Tableau regroupant les diverses caractéristiques statistiques, pour chaque enceinte.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	$\bar{x}$	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
	$V_{\%}$	32	36	36	35	30	36	40	30	32	36
II	$\bar{x}$	E	A	E	A	E	E	E	E	A	A
	$V_{\%}$	46	41	39	42	40	52	47	35	35	53
III	$\bar{x}$	D	E	A	E	B	A	B	A	E	E
	$V_{\%}$	43	50	38	36	51	62	51	45	42	50
IV	$\bar{x}$	A	D	D	D	D	D	A	B	D	D
	$V_{\%}$	32	47	56	39	45	54	52	54	43	48
V	$\bar{x}$	B	B	B	B	A	B	D	D	B	B
	$V_{\%}$	56	48	60	60	52	64	52	41	59	69

Fig4 : Tableau récapitulatif où sont indiquées les enceintes selon la valeur moyenne pour chacun des paramètres.

La première analyse des données a montré qu'il était possible de réduire l'échelle originale de 0 à 10 à une échelle réduite de 0 à 5. Les critères individuels de notation ont été normalisés selon une échelle dégressive.

Pour chaque paramètre subjectif numéroté de 1 à 10 respectivement dans l'ordre du formulaire (1 correspond à «distribution spatiale», 10 correspond à «corrélation entre l'image reçue et la réalité»), il a été effectué la moyenne des notations. Il était important ensuite de connaître un indice de dispersion des variables. Cela pour savoir la façon dont se distribuent les valeurs autour de la moyenne. L'écart quadratique moyen ou écart type représentant la racine carrée de la variance a été aussi calculé. Ce dernier paramètre correspond à la moyenne des carrés des écarts à la moyenne.

De sorte à pouvoir comparer la dispersion des diverses distributions, on dispose d'un indice de dispersion relatif, le coefficient de variation, qui exprime sous forme de pourcentage le rapport de l'écart type à la moyenne.

En résumé, nous obtenons pour chaque caractéristique sonore, cela pour chaque enceinte :

- le nombre de données :  $n$
- la moyenne :  $\bar{x} = \Sigma x/n$
- la variance :  $V = \Sigma (x - \bar{x})^2/n$
- l'écart type :  $\sigma = \sqrt{V}$
- le coefficient de variation :  $V = 100 \sigma/\bar{x} \%$
- $x - \bar{x}$  = écart de la moyenne.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau de la figure 3.

Nous constatons que pour chaque paramètre subjectif, une enceinte C présente une moyenne supérieure à toutes les autres. De même que dans ce cas la dispersion des valeurs est la plus faible de l'ensemble. Cette dernière condition reflète une opinion généralisée quant aux caractéris-



Gérard Chrétien et Gustavo Altieri. Le début d'une séance. Les enceintes sont derrière le rideau !

tiques de ce modèle. La croissance du coefficient de dispersion peut se traduire comme «des avis très différents» ou «appréciations discutables». Par exemple, dans la colonne 1, l'enceinte D obtient une moyenne de 2,89 avec  $\sigma = 124$  et  $V = 42,9\%$  ; pour sa part l'enceinte E obtient  $\bar{x} = 2,89$  avec  $\sigma = 133$  et  $V = 46\%$ .

C'est-à-dire que pour une

moyenne égale, les opinions ont été plus dispersées dans le cas de l'enceinte E. La lecture directe du tableau principal permet de classer les enceintes selon la moyenne obtenue et la dispersion calculée. Cependant, étant donné la difficulté de lecture d'un ensemble comportant 250 chiffres, nous proposons l'étude du tableau récapitulatif de la figure 4.

	$\bar{x}$	$\sigma$	$V$
A	2.99	1.04	34.8
B	2.58	1.15	44.6
C	3.40	0.84	24.7
D	2.68	0.98	36.6
E	3.11	1.09	35.0

Fig 5 : Tableau d'appréciation d'ensemble. La moyenne des valeurs obtenue pour une enceinte et pour un auditeur est indiquée, ainsi que l'écart-type et le coefficient de variation (cf texte).

Dans ce tableau nous avons ordonné les enceintes selon la valeur des moyennes pour chaque paramètre. En première place nous trouvons toujours l'enceinte C qui est celle sur laquelle la dispersion est la plus faible.

L'enceinte E est placée en deuxième position sur six paramètres, tandis que l'enceinte A occupe cette place pour « profondeur et positionnement des sources », « timbre », « qualité de l'information dans l'aigu » et « corrélation entre l'image reçue et la réalité ». Cette même enceinte A tombe à la dernière place pour la dynamique.

L'enceinte D occupe la quatrième place sur sept paramètres. Enfin l'enceinte B a 7 moyennes en dernière position. Les coefficients de dispersion reflètent une très grande diversité d'opinion.

Nous avons introduit enfin une dernière considération qui peut s'interpréter comme un « coefficient de qualité globale », dérivé de notre méthodologie. Nous calculons la moyenne des valeurs obtenues pour une enceinte et cela pour un auditeur. Avec ces données qui représentent l'appréciation personnelle d'ensemble, nous obtenons la moyenne générale, celle de tous les auditeurs, ainsi que l'écart type suivi du coefficient de variation, se référer pour cela au tableau de la figure 5.

#### Lever du rideau

Les systèmes employés étaient les suivants :

- A : Allison Six
- B : Perspective
- C : J.M. Reynaud Opera
- D : BW 801
- E : Audio Reference 70

Tous les documents manuscrits de l'expérience peuvent être portés à la connaissance de qui le désirera. Sur ces manuscrits est indiqué l'équipement personnel de chacun des participants.