

# L'AUDIOPHILE



3<sup>e</sup> Année

N° 13 Décembre  
1979 20 F

**Page non  
disponible**

# L'influence des circuits d'alimentation

## 3 - Amélioration d'une alimentation non régulée

Guy Marec

*Nous avons mentionné, dans le premier article sur l'alimentation du préamplificateur Kanéda (Audiophile n°9) une différence subjective sensible obtenue dans le registre aigu en utilisant plusieurs condensateurs électrolytiques en parallèle plutôt qu'un seul de valeur équivalente. D'autre part, au cours des essais de l'alimentation régulée améliorée (Audiophile n°11), nous avons pu constater l'influence très considérable, sur la restitution du registre grave, de la capacité des condensateurs de sortie de l'alimentation non régulée. Il était dès lors intéressant d'étudier plus en détail le fonctionnement de ce type d'alimentation et d'essayer de déterminer l'importance des différents paramètres en jeu. Ceci nous a conduit à analyser l'influence des caractéristiques des gros condensateurs électrolytiques de filtrage constituant la charge capacitive de sortie de l'alimentation.*

### Le circuit d'essai (se référer à la fig 1)

Le circuit d'essai a la structure de l'alimentation non régulée Kanéda (Audiophile n°5). Il est réalisé avec du matériel d'origine strictement française.

- un transformateur donnant au secondaire 2 x 24V eff, 0,5 A.
- un pont redresseur 8 A
- deux condensateurs de préfil-

trage SIC - SAFCO Felsic 038 4700 $\mu$ F 40 V.

- une double self, référence EB 810 E, spécialement étudiée et réalisée par les établissements Millérioux pour cette application. Ses caractéristiques sont les suivantes :

$$L = 5 \text{ henrys}$$
$$R = 25\Omega$$

Cette double self est réalisée en bobinage bifilaire, ce qui n'est

pas le cas du modèle japonais. Sa symétrie parfaite permet de l'utiliser sans résistance d'équilibrage. La valeur de son coefficient de self induction est très sensible à l'état de magnétisation statique du circuit qui doit être aussi réduit que possible. Il est donc très important d'équilibrer au mieux les courants continus des deux enroulements pour conserver un coefficient de self induction maximum.

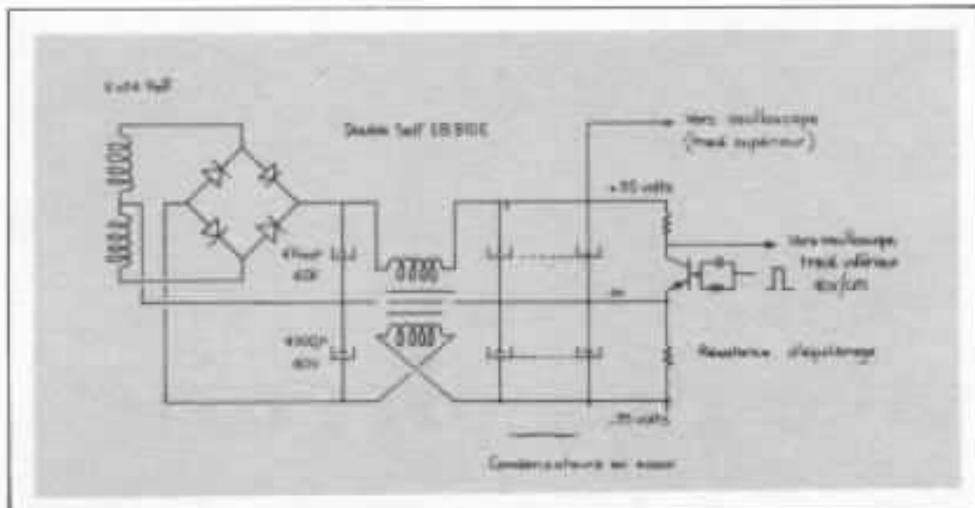


Fig. 1 : Circuit d'essai et circuit de charge

Les condensateurs testés sont les condensateurs de forte capacité, branchés après la self. Lorsque plusieurs condensateurs sont montés en parallèle, ils sont interconnectés par des plaques de cuivre argenté (voir photo).

### Méthode de comparaison

Nous avons employé la même méthode que dans les deux études précédentes sur les alimentations, c'est-à-dire que nous avons essayé d'établir une corrélation entre des mesures simples et des écoutes.

### 1 - Méthode de mesure

Pour que les mesures restent comparables à celles des articles précédents, nous avons utilisé la même méthode, c'est-à-dire faire

débitier par l'alimentation des impulsions de courant rectangulaires d'environ 90 mA crête. Les fréquences choisies sont, suivant les besoins, égales à 100 kHz et 10 kHz pour analyser l'extrémité supérieure du spectre, 1 kHz pour le registre médium, 30 Hz et 10 Hz pour le registre de fréquences correspondant à l'extrême grave. Le circuit de charge utilisé (se référer à la figure 1), bien que très imparfait, a été conservé par souci de continuité. Les mesures ont été faites sur l'alimentation positive en faisant débitier à l'alimentation négative un courant moyen équivalent, pour équilibrer le courant dans la self.

Pour rendre les signaux de sortie de l'alimentation plus visibles, nous avons dû utiliser un

autre tiroir d'oscilloscope plus sensible, mais de bande passante inférieure (1 MHz), ce qui explique l'allure très différente des transitoires de commutation qui sont de ce fait un peu « intégrés ». La fréquence de coupure basse de ce tiroir est de 2 Hz en couplage alternatif.

## 2 - Essais subjectifs

Les essais subjectifs ont été faits en alimentant un préamplificateur Kanéda limité aux circuits RIAA. Les composants étaient d'origine japonaise, à l'exception des potentiomètres de volume : deux Allen-Bradley, série J, d'origine américaine.

## Les condensateurs électrolytiques

### 1 - Caractéristiques générales

Entrer dans le détail de fonctionnement et de réalisation de ces condensateurs dépasserait le cadre de cette étude. Pour l'utilisateur, il est suffisant de savoir que le schéma électrique équivalent d'un condensateur électrolytique est, en première approximation, (se référer à la figure 2a) un circuit résonnant R-L-C série bien connu :

- la capacité C est la capacité proprement dite du condensateur. Elle peut atteindre 100 000  $\mu$ F pour un élément dans cette application.

- la résistance série R est une résistance parasite principalement due à la structure des connexions des sorties sur les électrodes. Son rôle est très important : c'est elle qui limite l'impédance minimum atteinte par le condensateur dans la plage des fréquences qui nous intéresse. Cette résistance est chiffrée en millième d'ohm (m $\Omega$ ). Sa valeur peut aller de l'ordre de 1m $\Omega$  ou

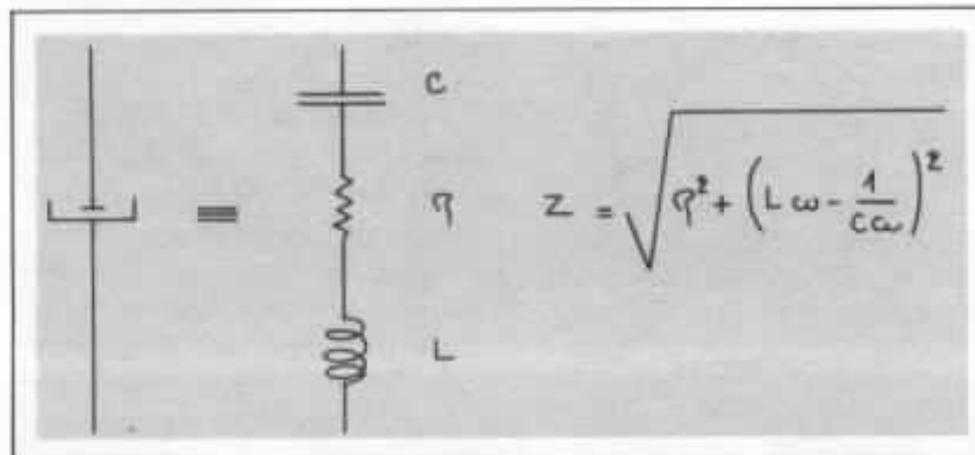


Fig. 2a : Schéma électrique équivalent d'un condensateur électrolytique.

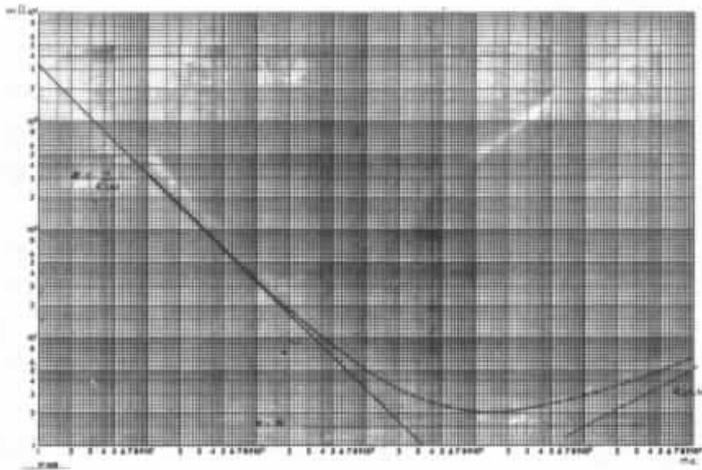


Fig. 2b : Courbe d'impédance type d'un condensateur électrolytique de haute qualité.

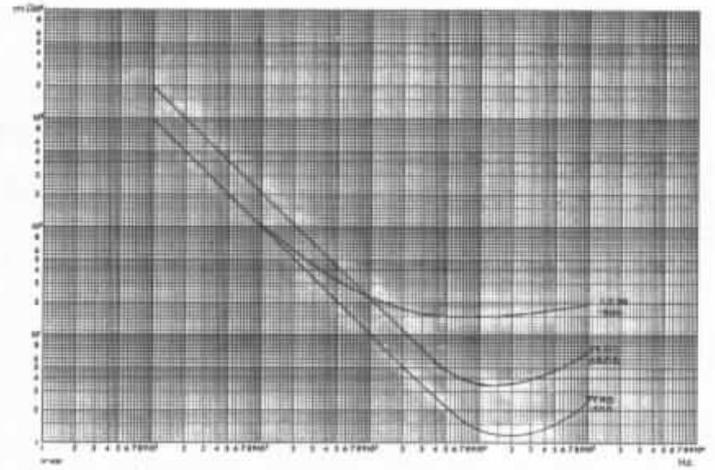


Fig. 5 : Courbes d'impédance des condensateurs 15 000  $\mu F$ . En haut Felsic O38, en bas Felsic TFRS. La courbe du centre est celle d'un Felsic TFRS de 6 800  $\mu F$  donnée à titre indicatif.

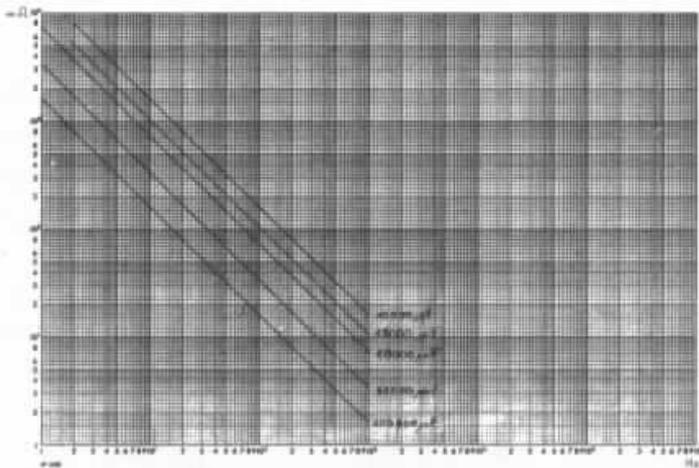


Fig. 3 : Limite asymptotique de l'impédance dans le bas du spectre de quelques valeurs courantes de condensateurs.

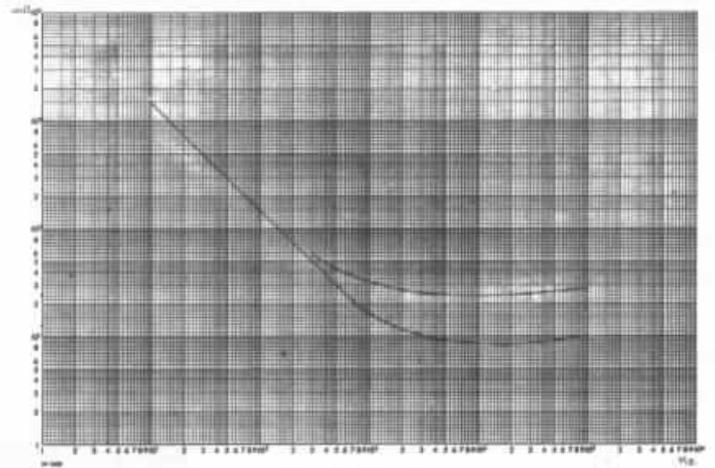


Fig. 6 : Courbes d'impédance de condensateur de 10 000  $\mu F$ . En haut Felsic O38, en bas Felsic O39 FRS.

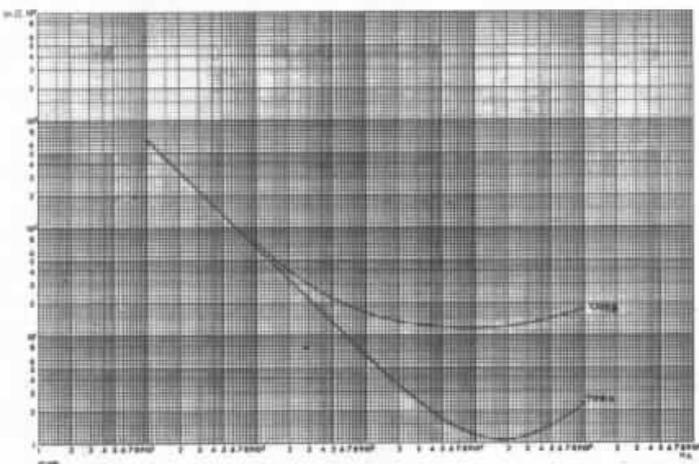


Fig. 4 : Courbes d'impédance de condensateurs de 22 000  $\mu F$ , en haut Felsic O38 en bas Felsic TFRS.

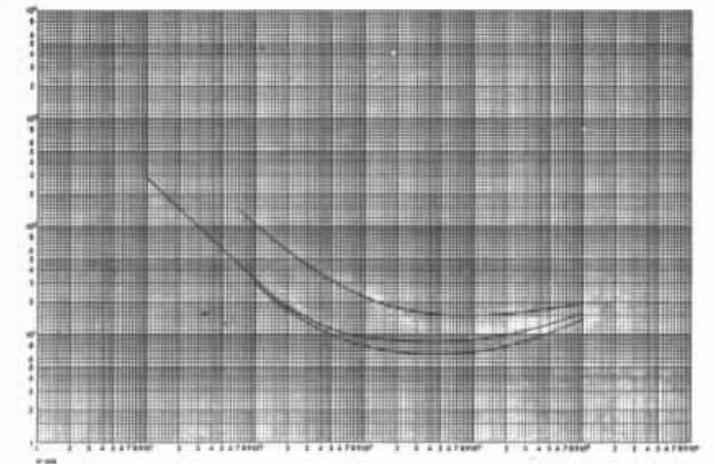


Fig. 7 : Courbes d'impédance de condensateur de 47 000  $\mu F$ . En bas Felsic O39, au milieu Felsic O38, en haut à titre indicatif courbe d'un Felsic O38 de 15 000  $\mu F$ .



Photo 1 : Différence de taille pour une même valeur entre la série TFRS et 038

moins pour les meilleurs condensateurs, à plus de 100mΩ. Un câblage mal étudié peut augmenter de façon très sensible cette résistance série. Il est nécessaire de minimiser les résistances des fils de connexions et des contacts si on veut tirer le meilleur parti des condensateurs électrolytiques de forte valeur. Ceci explique l'emploi de plaques de connexion en cuivre argenté.

- La self série L est une self parasite résiduelle due à la structure interne des électrodes. Elle est très faible, de l'ordre de quelques nanohenrys. Son effet, très faible sur l'impédance dans notre plage de fréquences d'utilisation, est le plus souvent négligeable. Il est, par contre, possible que, combinée aux selfs résiduelles de câblage, elle entre en résonance avec les condensateurs au mylar, papier, polystyrène ou autre, mis en parallèle sur les condensateurs électrolytiques pour améliorer l'impédance dans le haut du spectre.

Le module de l'impédance du condensateur a la forme bien connue :

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$



Photo 2 : Série 039 et TFRS. L'encombrement est de plus de trois fois supérieur en TFRS.

Les condensateurs électrolytiques sont généralement caractérisés par une courbe d'impédance en fonction de la fréquence tracée sur papier à coordonnées logarithmiques (nécessaires du fait des grandes plages de valeurs tant d'impédance que de fréquence).

La figure 2b schématise cette courbe pour un condensateur imaginaire presque idéal de 47000 μF dont la résistance série serait de 1,5 mΩ environ. La courbe se décompose en trois parties :

- à gauche, une partie ascendante d'asymptote :

$$Z = \frac{1}{C\omega}$$

Le terme capacitif est prépondérant. Le condensateur se comporte réellement comme un condensateur, l'impédance décroît quand la fréquence augmente. Si ce condensateur était « parfait », la courbe d'impédance se réduirait à cette droite

et la valeur de l'impédance décroîtrait indéfiniment, quand la fréquence augmenterait.

- au centre, la chute de l'impédance est limitée par la résistance série qui devient prépondérante. Le condensateur se comporte approximativement comme une résistance.

- à droite, une partie ascendante d'asymptote :

$$Z = L\omega$$

Le terme selfique devient prépondérant, le condensateur se comporte comme une self, l'impédance augmente donc avec la fréquence.

Cette courbe très pratique permet d'évaluer les performances d'un condensateur et surtout de comparer celles de plusieurs condensateurs. La figure 3 donne les limites théoriques, dans le bas du spectre, des impédances de quelques valeurs courantes de condensateurs.

## 2 - Condensateurs testés

Nous avons choisi des condensateurs de marque SIC-SAFCO pour faire cette étude, d'une part, parce que cette firme présente un catalogue extrêmement complet de structures et de valeurs, d'autre part, parce qu'au cours de 15 années d'utilisation de ces composants, nous n'avons enregistré aucune défaillance. C'est peut-être de la chance, mais c'est quand même significatif. Nous nous sommes limités aux modèles suivants :

- un modèle très connu, couramment utilisé en électronique professionnelle, le Felsic 038, que nous employons dans tous les circuits d'alimentation professionnels et aussi dans les amplificateurs et préamplificateurs à usage électroacoustique.

- un modèle très sophistiqué, le

Felsic TFRS (Très Faible Résistance Série). Vraisemblablement c'est ce qui se fait le mieux à l'heure actuelle en condensateurs électrolytiques. Ces condensateurs ont été étudiés pour permettre des échanges de très grandes quantités d'énergie en des temps très courts (circuits onduleurs, alimentations à découpage...).

- un modèle à performance climatique plus élevée que celle du Felsic 038, le Felsic 039 qui présente la particularité de pouvoir être réalisé en une technique FRS (Faible Résistance Série), ce qui le situe en intermédiaire entre les deux modèles précédents. Du point de vue encombrement (se référer aux Photos 1 et 2) les Felsic 038 et 039 sont identiques. Par contre, à capacités nominales et tensions identiques, les Felsic TFRS occupent un volume pratiquement triple. Ils sont aussi beaucoup plus chers : à capacités égales, un modèle Felsic TFRS vaut environ 3 fois plus cher qu'un modèle 038. La qualité se paie toujours en électronique. Noter sur la photo n°2 les connexions à double vis du modèle TFRS pour améliorer les contacts.

## 3 - Comparaison des caractéristiques

Les courbes d'impédance présentées figures 4, 5, 6, et 7 ont été établies à partir de documents SIC-SAFCO. Ce sont des courbes mesurées et non des courbes théoriques. Pour faciliter les comparaisons, nous avons groupé sur le même graphique, les courbes d'impédance de modèles différents, ce qui n'était pas le cas sur les documents d'origine SIC-SAFCO.

La figure 4 présente les courbes d'impédance des condensa-

teurs de 22 000 $\mu$ F Felsic TFRS, et Felsic 038.

Dans le bas du spectre (F 100 Hz), les impédances des deux condensateurs sont pratiquement identiques ; par contre, au-dessus de 100 Hz, les différences deviennent progressivement très importantes. Dans les registres aigu et extrême-aigu, l'impédance du Felsic TFRS est 10 fois plus faible, ce qui constitue une amélioration très considérable. Le même rapport peut être constaté sur les condensateurs de 15 000 $\mu$ F présentés figure 5.

La figure 6 présente les courbes d'impédance de condensateurs de 10 000 $\mu$ F Felsic 038 et Felsic 039 en version FRS. Dans le bas du spectre, les courbes tendent aussi à se rejoindre ; en aigu et extrême-aigu, l'impédance du modèle FRS est environ 3 fois plus faible. La différence est beaucoup moins marquée sur la figure 7 qui présente les courbes de modèles 47 000 $\mu$ F Felsic 038 et 039, le modèle 039 mesuré ne devait pas être FRS.

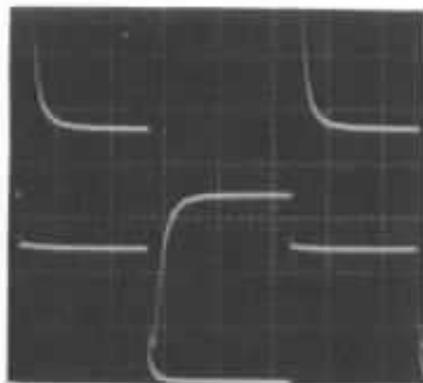
## Influence de la résistance série

L'influence de la résistance série a pu être étudiée en réalisant le circuit d'alimentation d'une part, avec deux condensateurs Felsic 038 de 22 000 $\mu$ F, d'autre part, avec deux condensateurs Felsic TFRS de même valeur.

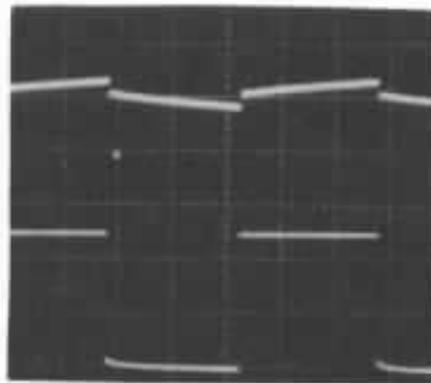
### 1 - Mesures

Les oscillogrammes sont présentés figure 8.

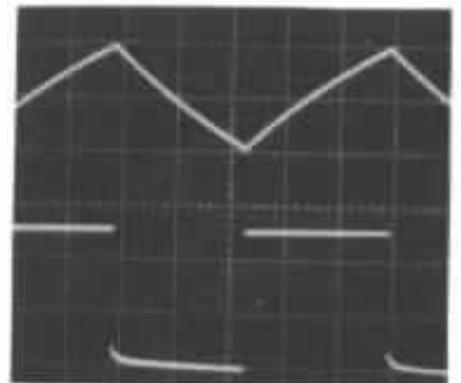
- à 10 Hz, les réponses des deux alimentations sont pratiquement identiques. L'échelle des oscillogrammes montre la forte impédance de sortie des alimentations



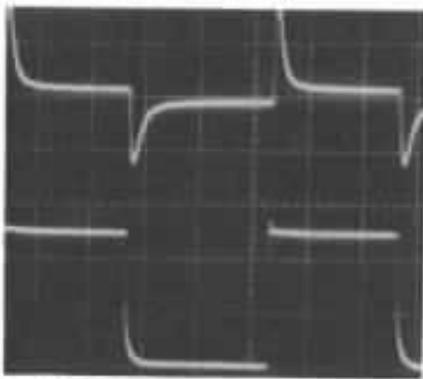
100 kHz, 22 000  $\mu\text{F}$  Felsic 038  
Sortie alimentation 1 mV/cm



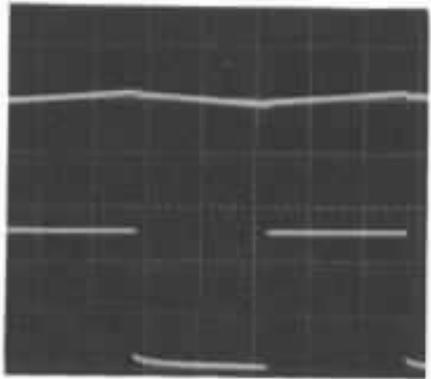
1 kHz, 22 000  $\mu\text{F}$  Felsic 038  
Sortie alimentation 5 mV/cm



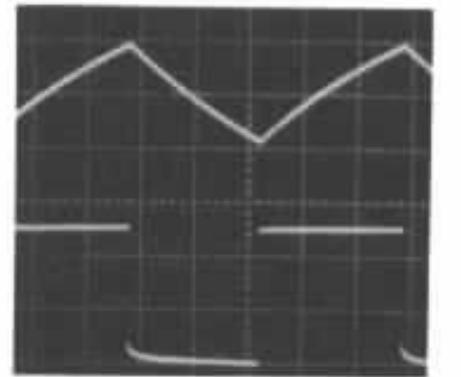
10 Hz, 22 000  $\mu\text{F}$  Felsic 038  
Sortie alimentation 50 mV/cm



100 kHz, 22 000  $\mu\text{F}$  Felsic TFRS  
Sortie alimentation 1 mV/cm

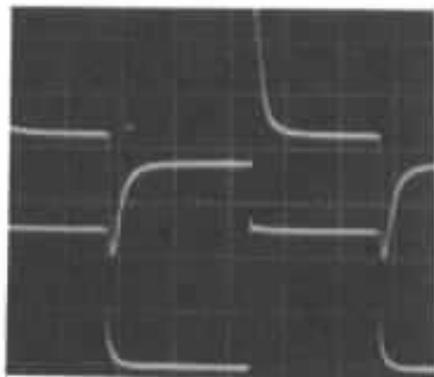


1 kHz, 22 000  $\mu\text{F}$  Felsic TFRS  
Sortie alimentation 5 mV/cm

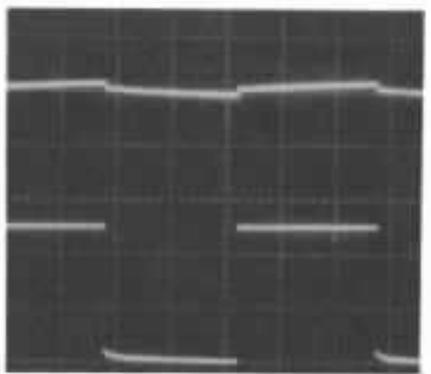


10 Hz, 22 000  $\mu\text{F}$  Felsic TFRS  
Sortie alimentation 50 mV/cm

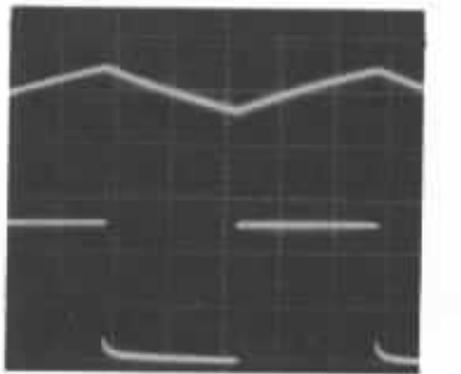
Fig. 8 : Réponses comparées de l'alimentation réalisée avec des condensateur Felsic 038 et Felsic TFRS de 22 000  $\mu\text{F}$



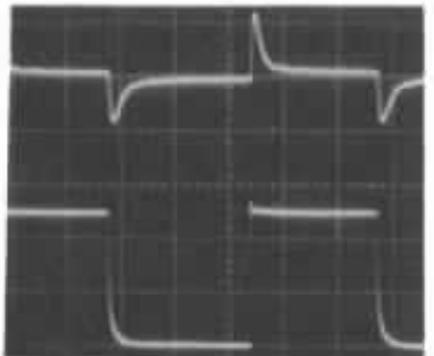
100 kHz, 44 000  $\mu\text{F}$ , Felsic 038, sortie alimentation 1 mV/cm



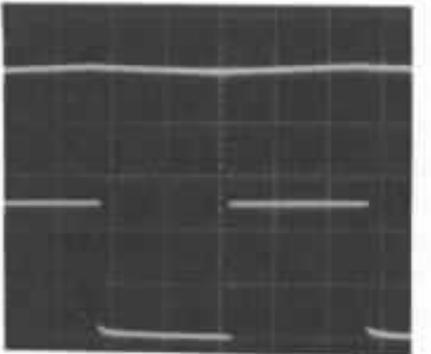
1 kHz, 44 000  $\mu\text{F}$ , Felsic 038, sortie alimentation 5 mV/cm



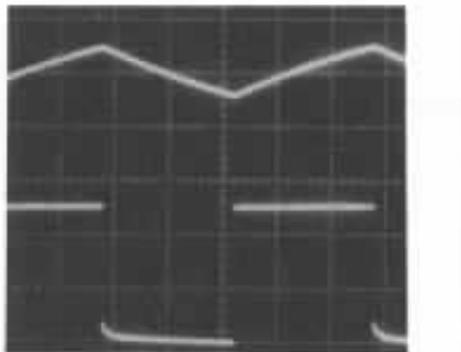
10 Hz 44 000  $\mu\text{F}$ , Felsic 038, sortie alimentation 50 mV/cm



100 kHz, 44 000  $\mu\text{F}$ , Felsic TFRS, sortie alimentation 1 mV/cm



1 kHz, 44 000  $\mu\text{F}$ , Felsic TFRS, sortie alimentation 5 mV/cm



10 Hz 44 000  $\mu\text{F}$ , Felsic TFRS, sortie alimentation 50 mV/cm

Fig. 9 : Réponses comparées de l'alimentation réalisée avec des condensateurs Felsic 038 et Felsic TFRS de 44 000  $\mu\text{F}$

à cette fréquence. La légère courbure des « dents de scie » est due à la constante de temps d'entrée de l'oscilloscope fonctionnant, compte tenu des échelles utilisées, en couplage alternatif.

- à 1 kHz, la différence est déjà sensible entre les deux alimentations. Le circuit réalisé avec les Felsic TFRS à une impédance de sortie plus faible dès le registre médium.

- à 100 kHz, la différence d'impédance de sortie est très accentuée.

La figure 9 présente les résultats obtenus en portant dans les mêmes conditions la capacité de sortie à 44 000  $\mu\text{F}$ . L'effet cumulatif des condensateurs abaissant l'impédance de sortie dans tout le spectre est très visible.

A titre de comparaison, la figure 10 présente les oscillogrammes de l'alimentation régulée améliorée décrite dans le n°9. Dans le haut du spectre la supériorité des condensateurs est très visible.

## 2 - Influence subjective

L'influence subjective de la résistance série a été testée en alimentant le préamplificateur successivement avec les deux circuits réalisés avec 44 000  $\mu\text{F}$  (Felsic 038 et TFRS). Les écoutes ont été faites dans les mêmes conditions. Les condensateurs TFRS apportent une amélioration sensible depuis le registre haut-médium jusqu'à l'extrême-aigu. Cette amélioration se traduit par une image sonore à la fois plus précise et plus transparente. Un instrument solo par exemple, est beaucoup mieux situé dans l'espace, les contours sont mieux délimités. Il semble que l'image sonore soit débarrassée de « petits riens » très difficiles à

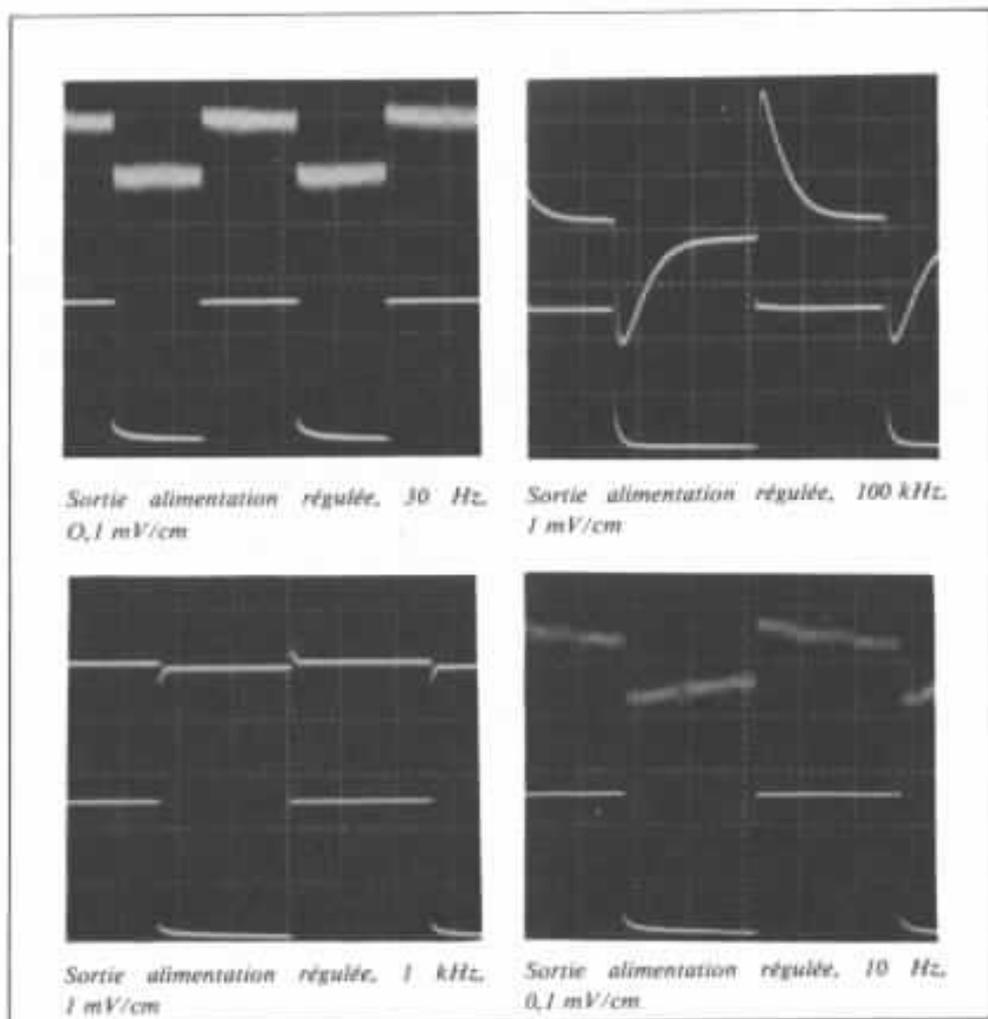


Fig. 10 : Oscillogrammes de l'alimentation régulée décrites dans l'Audiophile n°9

définir : peut-être des résidus harmoniques de rang élevé de redressement du secteur. L'abaissement de la résistance série semble aussi donner aux timbres une densité spectrale accrue.

## 3 - Le cas des condensateurs Felsic 039

Un essai de comparaison a été fait en réalisant l'alimentation avec des condensateurs de 47 000  $\mu\text{F}$  successivement Felsic 039 puis 038. Les différences étaient peu mesurables et ne donnaient pas à l'écoute l'impression de changer de circuit d'alimentation. Il est vraisemblable que les échantillons utilisés n'étaient pas des modèles réalisés en technologie à Faible Résistance Série.

## Influence de la capacité

L'influence de la capacité de charge de l'alimentation a été testée en réalisant successivement le circuit avec :

200 000  $\mu\text{F}$   
100 000  $\mu\text{F}$   
47 000  $\mu\text{F}$

### 1 - Mesures

Les oscillogrammes obtenus à 10 Hz et 30 Hz sont présentés figure 11. L'abaissement de l'impédance interne avec la capacité et la fréquence est très visible. L'impédance interne de l'alimentation dans ce registre est inversement proportionnelle à la fréquence. Les impédances correspondantes peuvent être déduites de la figure 3. Par exemple, le condensateur de 100 000  $\mu\text{F}$  à une

impédance de  $160\text{m}\Omega$  à 10 Hz et de  $53\text{m}\Omega$  à 30 Hz. Nous sommes loin de l'impédance interne de l'alimentation régulée améliorée (se référer à la figure 10) qui est de l'ordre de  $1\text{m}\Omega$ . Cette impédance correspond, à 30 Hz, à un condensateur de 5 farads ! La légère pente observable à 10 Hz sur la réponse de l'alimentation régulée est due, elle aussi, à la capacité série d'entrée de l'oscilloscope.

## 2 - Influence subjective

A l'écoute, l'augmentation de capacité se traduit d'abord par une légère diminution du niveau de grave et d'extrême-grave. Il apparaît rapidement qu'en réalité les sons graves deviennent plus fermes, mieux définis, plus faciles à distinguer les uns des autres. L'amélioration est très

sensible en passant de  $47\ 000\mu\text{F}$  à  $100\ 000\ \mu\text{F}$ . Par contre, en passant de  $100\ 000\mu\text{F}$  à  $200\ 000\mu\text{F}$ , une amélioration se fait encore sentir, mais d'une façon moins évidente. On garde l'impression, en faisant les essais, qu'en augmentant encore le volume des condensateurs utilisés, on pourrait améliorer encore la qualité des registres grave et extrême-grave.

Jean Hiraga cite une expérience faite au Japon où la mise en place de  $400\ 000\mu\text{F}$  a donné un résultat subjectif équivalent à celui d'une batterie d'accumulateurs.

## Schéma de l'alimentation améliorée

### 1 - Le choix

Il ressort de l'étude précédente

que dans le cas du préamplificateur Kanéda :

- la restitution des registres médium et aigu est plus influencée par la résistance série des condensateurs électrolytiques d'alimentation que par leur capacité.

- la restitution du registre grave est influencée uniquement par la capacité des condensateurs et ceci sans limite apparente à la valeur de cette capacité.

Il faut toutefois noter qu'à variations d'impédance égales, l'influence est peu sensible sur le registre grave et extrêmement sensible sur le registre médium-aigu. L'établissement d'un schéma d'alimentation améliorée est donc un compromis qui doit de plus, tenir compte :

- du prix des condensateurs, très considérable dans le cas des

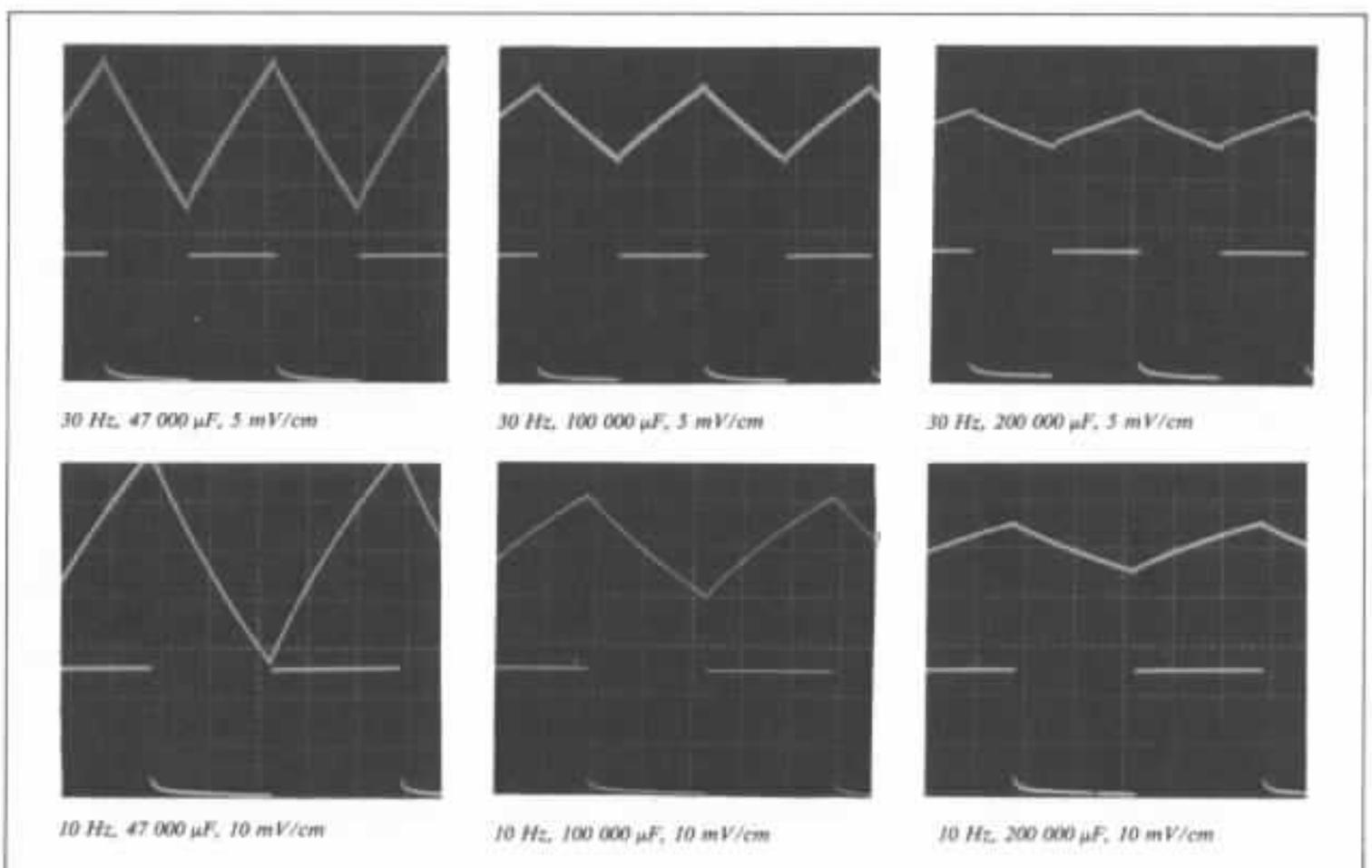


Fig. 11 : Influence de la capacité sur le comportement de l'alimentation dans le bas du spectre

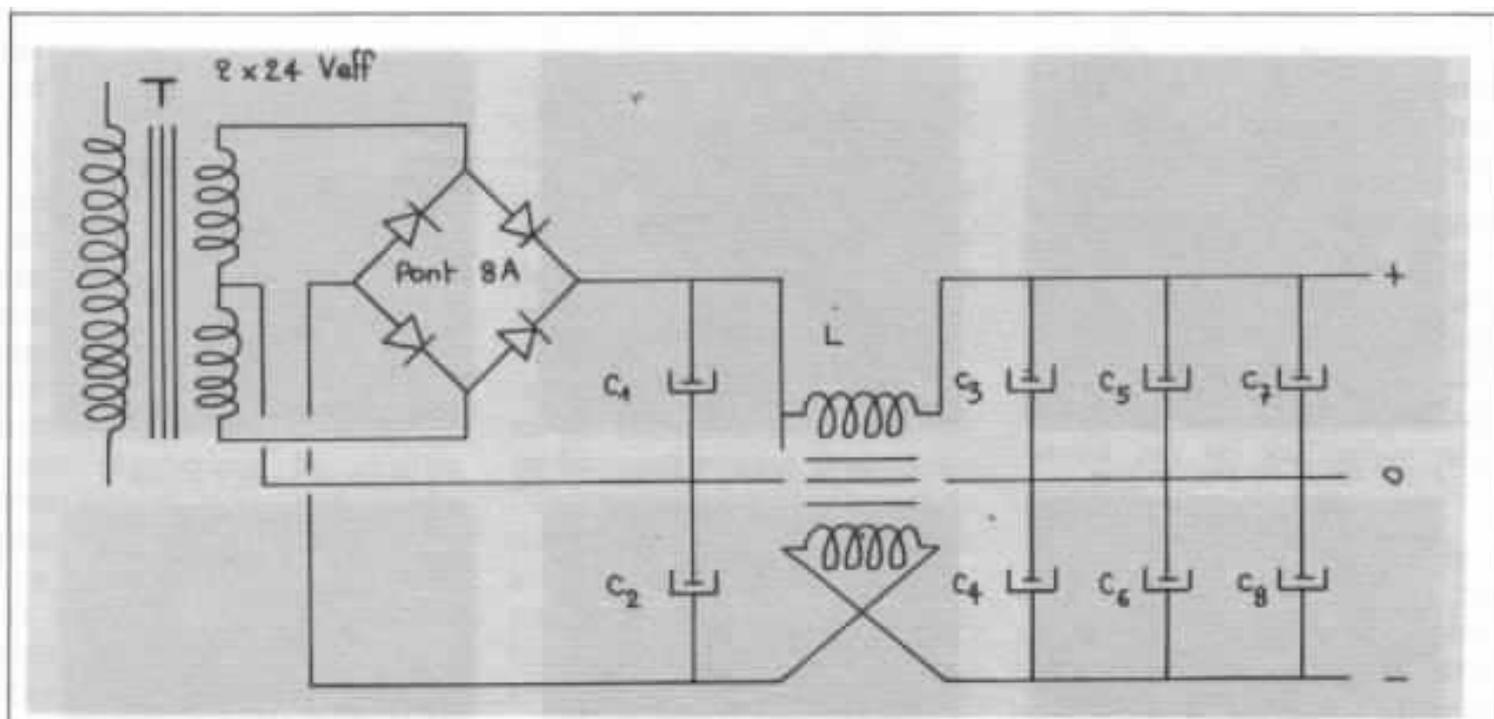


Fig. 12 : Schéma de l'alimentation non régulée améliorée

**Nomenclature :**

*T = Transformateur Millerioux B1350B ou STB12 en 2 × 24 Veff.*

*L = Self double EB810E Millerioux*

*C<sub>1</sub> = Felsic 038 4700 μF, 40 V*

*C<sub>2</sub> = Felsic 038 4700 μF, 40 V*

*C<sub>3</sub> = Felsic 038 47 000 μF, 40 V*

*C<sub>4</sub> = Felsic 038 47 000 μF, 40 V*

*C<sub>5</sub> = Felsic 038 47 000 μF, 40 V ou mieux Felsic 039 FRS*

*C<sub>6</sub> = Felsic 038 47 000 μF, 40 V ou mieux Felsic 039 FRS*

*C<sub>7</sub> = Felsic TFRS 15 000 μF, 40 V*

*C<sub>8</sub> = Felsic TFRS 15 000 μF, 40 V*

modèles à Très Faible Résistance Série ;

- de l'encombrement : il faut que le volume de condensateurs utilisé permette un câblage très compact où les condensateurs sont interconnectés par des plaques de cuivre argenté (ou étamé) et où les liaisons au préamplificateur sont les plus courtes possible. L'idéal est d'utiliser des condensateurs de formats identiques.

Ces deux dernières conditions excluent la réalisation de l'alimentation uniquement avec des condensateurs à Très Faible Résistance Série.

Nous avons choisi (se référer à

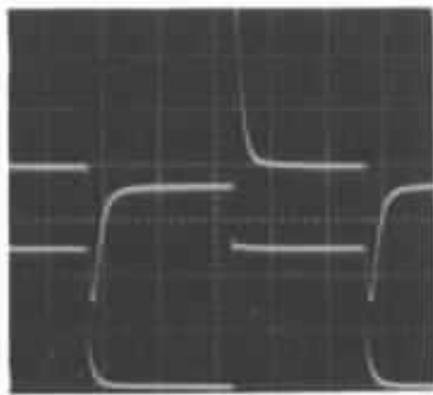
la figure 12) une capacité globale de l'ordre de 100 000 μF, réalisée avec deux condensateurs de 47 000 μF en parallèle (Felsic 038 ou mieux Felsic 039 FRS), auxquels a été rajouté un Felsic TFRS de 15 000 μF, pour améliorer la réponse dans le haut du spectre. Les oscillogrammes de la figure 13 montrent l'effet de cette amélioration qui, subjectivement, est très importante.

**Note :**

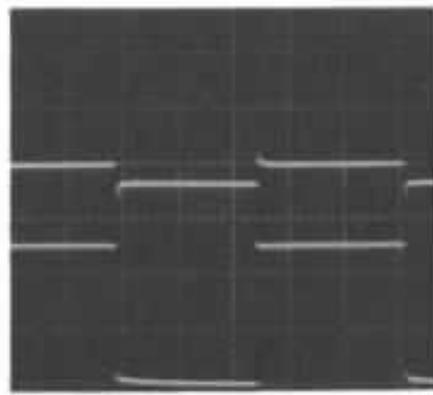
Il est possible de réaliser le circuit avec un condensateur Felsic 038 ou 039 FRS de 100 000 μF avec, en parallèle, un condensa-

teur Felsic TFRS de 22 000 μF qui à le même format. Ce montage, plus encombrant en hauteur mais occupant moins de surface, n'a pas été testé. Nous ne disposons pas de condensateurs de 100 000 μF. Nous pensons toutefois que, si l'on accepte cet encombrement vertical supplémentaire, il faut prévoir la possibilité de rajouter un deuxième condensateur de 100 000 μF.

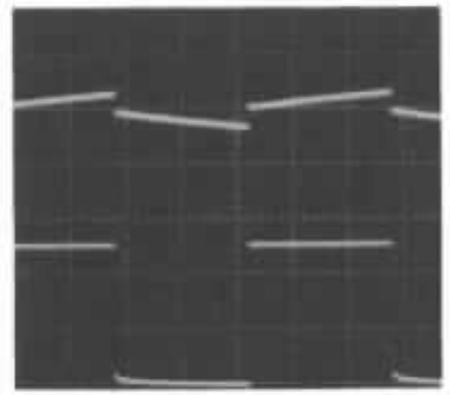
L'ensemble aura alors un encombrement en surface équivalent à celui de la solution proposée et pourra donner un supplément de définition dans l'extrême-grave.



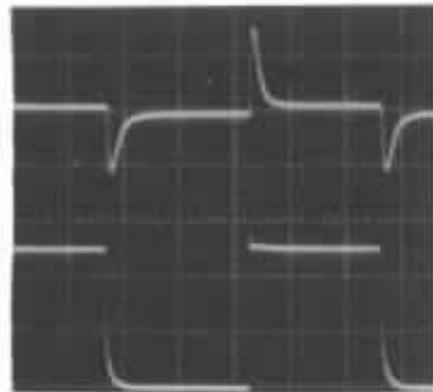
$2 \times 47\,000\ \mu\text{F}$ , 100 kHz, 1 mV/cm



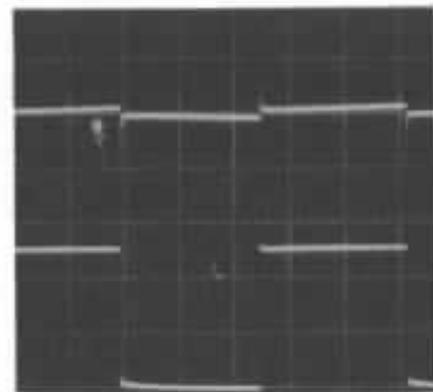
$2 \times 47\,000\ \mu\text{F}$ , 10 kHz, 1 mV/cm



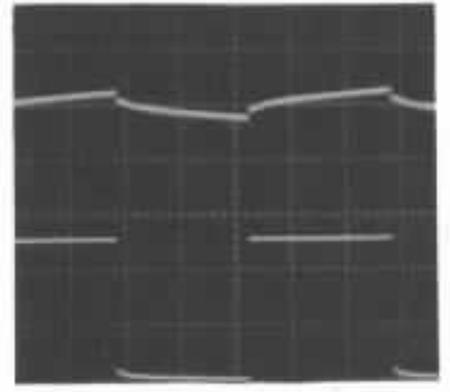
$2 \times 47\,000\ \mu\text{F}$ , 1 kHz, 1 mV/cm



$2 \times 47\,000\ \mu\text{F} + 15\,000\ \mu\text{F TFRS}$ ,  
100 kHz, 1 mV/cm

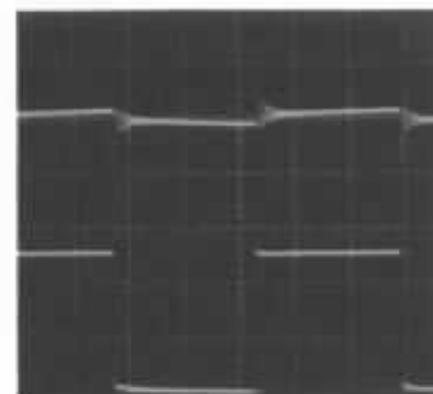


$2 \times 47\,000\ \mu\text{F} + 15\,000\ \mu\text{F TFRS}$ ,  
10 kHz, 1 mV/cm

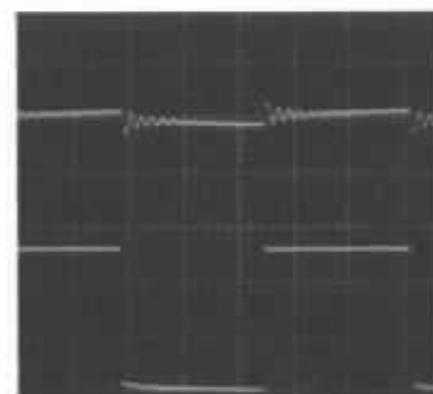


$2 \times 47\,000\ \mu\text{F} + 15\,000\ \mu\text{F TFRS}$ , 1 kHz,  
1 mV/cm

Fig. 13 : Effet d'un condensateur Felsic TFRS de 15 000  $\mu\text{F}$  sur la réponse de l'alimentation dans le haut du spectre



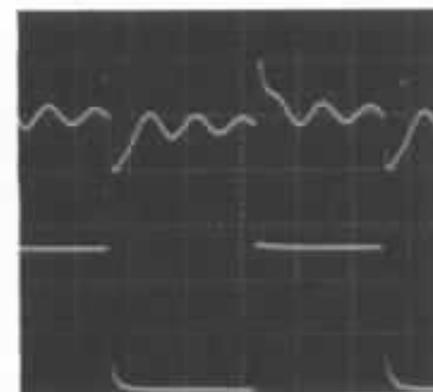
Condensateur supplémentaire de 1  $\mu\text{F}$ ,  
10 kHz, 1 mV/cm



Condensateur supplémentaire de 4,7  $\mu\text{F}$ ,  
10 kHz, 1 mV/cm



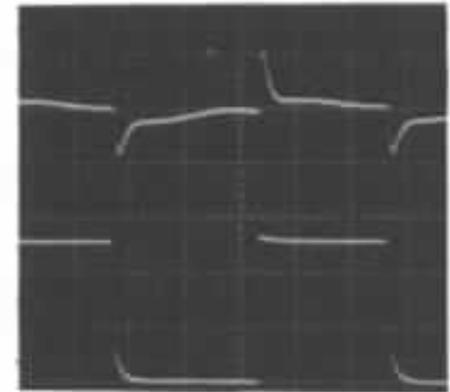
Condensateur supplémentaire de 10  $\mu\text{F}$ ,  
10 kHz, 1 mV/cm



Condensateur supplémentaire de 1  $\mu\text{F}$ ,  
100 kHz, 1 mV/cm



Condensateur supplémentaire de 4,7  $\mu\text{F}$ ,  
100 kHz, 1 mV/cm



Condensateur supplémentaire de 10  $\mu\text{F}$ ,  
100 kHz, 1 mV/cm

Fig. 14 : Influence des condensateurs « d'amélioration » sur la réponse de l'alimentation

## 2 - Le problème des condensateurs supplémentaires « d'amélioration »

Une technique assez couramment employée dans les alimentations non régulées consiste à ajouter, en parallèle sur les condensateurs électrolytiques, un condensateur de très bonne qualité (papier huilé, polystyrène, polycarbonate, mylar, etc...), pour régulariser la courbe d'impédance dans le haut du spectre. Cette technique apporte une amélioration dans la mesure où la fréquence d'accord des selfs parasites (condensateur électrolytique plus câblage) et de ce condensateur est relativement basse et tombe au maximum dans une plage de fréquences où le terme résistif du condensateur électrolytique est prépondérant et peut ainsi amortir fortement le circuit oscillant. Avec des condensateurs électrolytiques à Très Faible Résistance Série, il faudrait employer des condensateurs supplémentaires de plus de 100  $\mu\text{F}$  pour avoir une amélioration. La figure 14 donne les résultats obtenus avec des condensateurs de 1 $\mu\text{F}$ , 4,7 $\mu\text{F}$ , et 10 $\mu\text{F}$ . La résonance du circuit est parfaitement visible. Avec 10 $\mu\text{F}$  la fréquence d'accord est de 180 kHz environ. Ces condensateurs n'améliorent rien. Bien au contraire, si les selfs de câblage sont très importantes, ils peuvent augmenter l'impédance dans le haut du spectre et colorer la restitution. Nous déconseillons donc leur emploi dans cette alimentation.

## 3 - Réalisation du circuit

La réalisation de l'ensemble alimentation-préamplificateur a beaucoup d'influence sur le

résultat final. Un câblage mal étudié peut augmenter considérablement la résistance série des condensateurs, ainsi que les selfs résiduelles, ce qui peut pratiquement annuler l'intérêt d'utiliser des condensateurs à Très Faible Résistance Série. L'implantation doit être conforme à la maquette qui a servi à cette étude (se référer à la photo et à la figure 15). Il est très important d'interconnecter les condensateurs de sortie de l'alimentation par des plaques de cuivre rouge d'épaisseur 2 mm argentées (ou à défaut étamées), pour éviter l'oxydation et améliorer les contacts. Les condensateurs TFRS seront placés à l'extrémité des plaques du côté de la carte du préamplificateur.

Les fils d'alimentation et de masse du préamplificateur seront soudés directement sur les plaques, ou connectés par des cosses de très bonne qualité directement sur les vis des condensateurs. Ces fils seront les plus gros possible et les plus courts possible.

### Alimentation régulée ou non régulée que choisir?

Nous avons conclu l'étude précédente sur l'amélioration d'une alimentation régulée, en donnant une légère supériorité au circuit non régulé dans les registres médium-aigu et en soulignant la nécessité de l'améliorer dans le registre grave.

Le circuit, proposé ici, accentue encore la différence dans les registres médium-aigu et compense partiellement l'écart dans le registre grave. L'alimentation régulée améliorée reste incontestablement plus précise dans ce registre, alors que l'alimentation

non régulée améliorée permet d'atteindre un niveau de qualité assez exceptionnel en médium-aigu, particulièrement bien mis en évidence par l'écoute de voix.

Il est très important de noter que les améliorations et différences auxquelles il est fait allusion ici, se placent à un très haut niveau de qualité et sont difficilement perceptibles au premier abord par un audiophile non entraîné.

En ce qui concerne la réalisation, l'alimentation régulée est moins encombrante et moins chère, mais nécessite un minimum de connaissances techniques pour être bien réalisée.

L'alimentation non régulée est très encombrante, beaucoup plus chère, mais plus facile à réaliser par un non spécialiste.

## Conclusion

Il ne faudrait pas conclure des essais précédents, qu'il est possible d'améliorer la qualité de n'importe quel préamplificateur en multipliant le nombre des condensateurs de filtrage de son alimentation, ou en utilisant des condensateurs ultra-sophistiqués (dans certains cas, le résultat peut même être catastrophique).

Le préamplificateur Kanéda, de par sa structure, est extrêmement sensible à la qualité de son circuit d'alimentation. Il est, en effet, constitué de trois étages en liaison directe non découplés de l'alimentation. Ceci fait que l'impédance interne de l'alimentation est une impédance de couplage, non seulement des étages entre eux, dans chaque voie, mais des deux voies entre elles et du préamplificateur au secteur. C'est ainsi que des améliorations

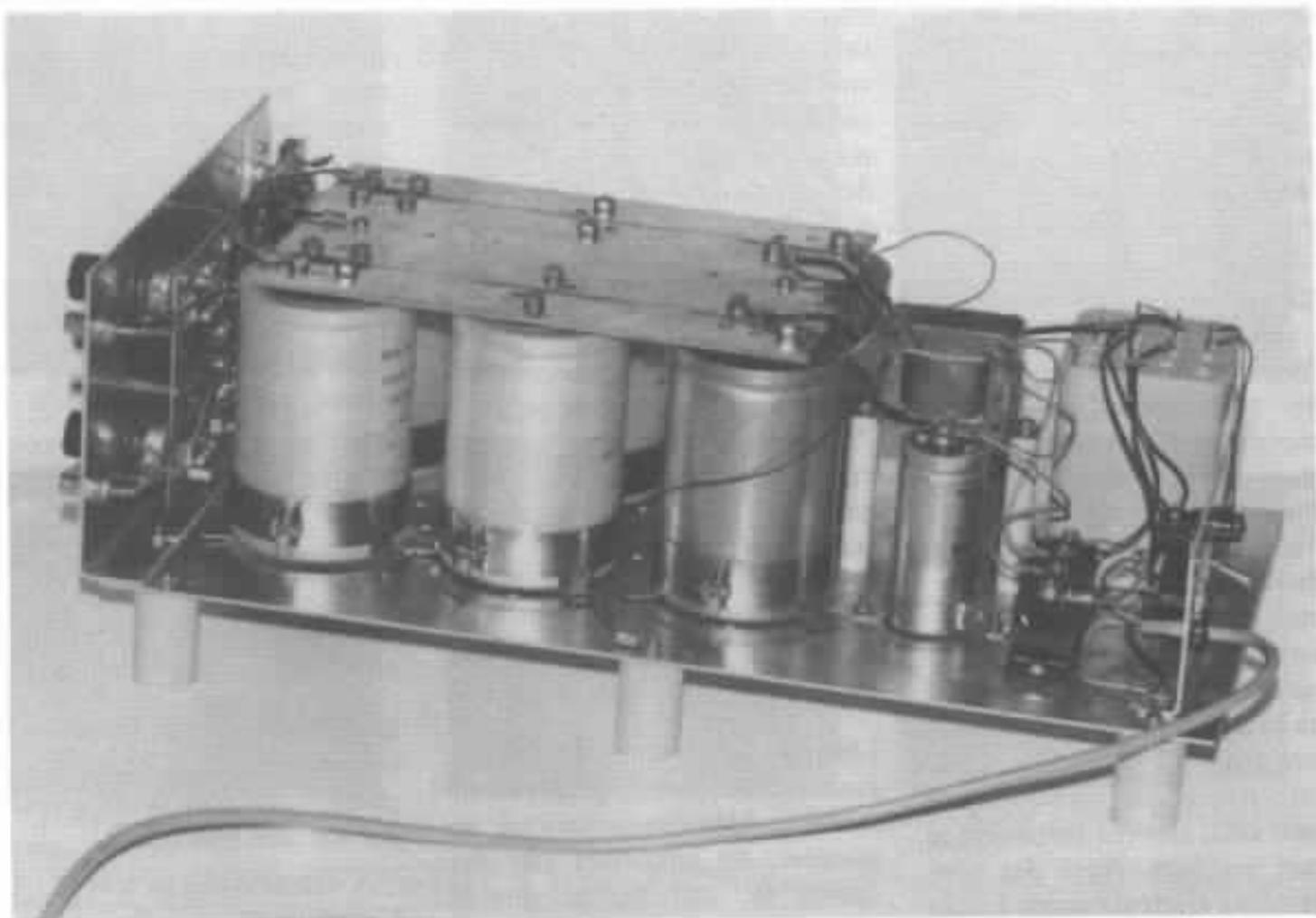


Photo 3 : Le prototype du préamplificateur Kanéda utilisé lors des essais. Le circuit est fixé parallèlement à la face avant.

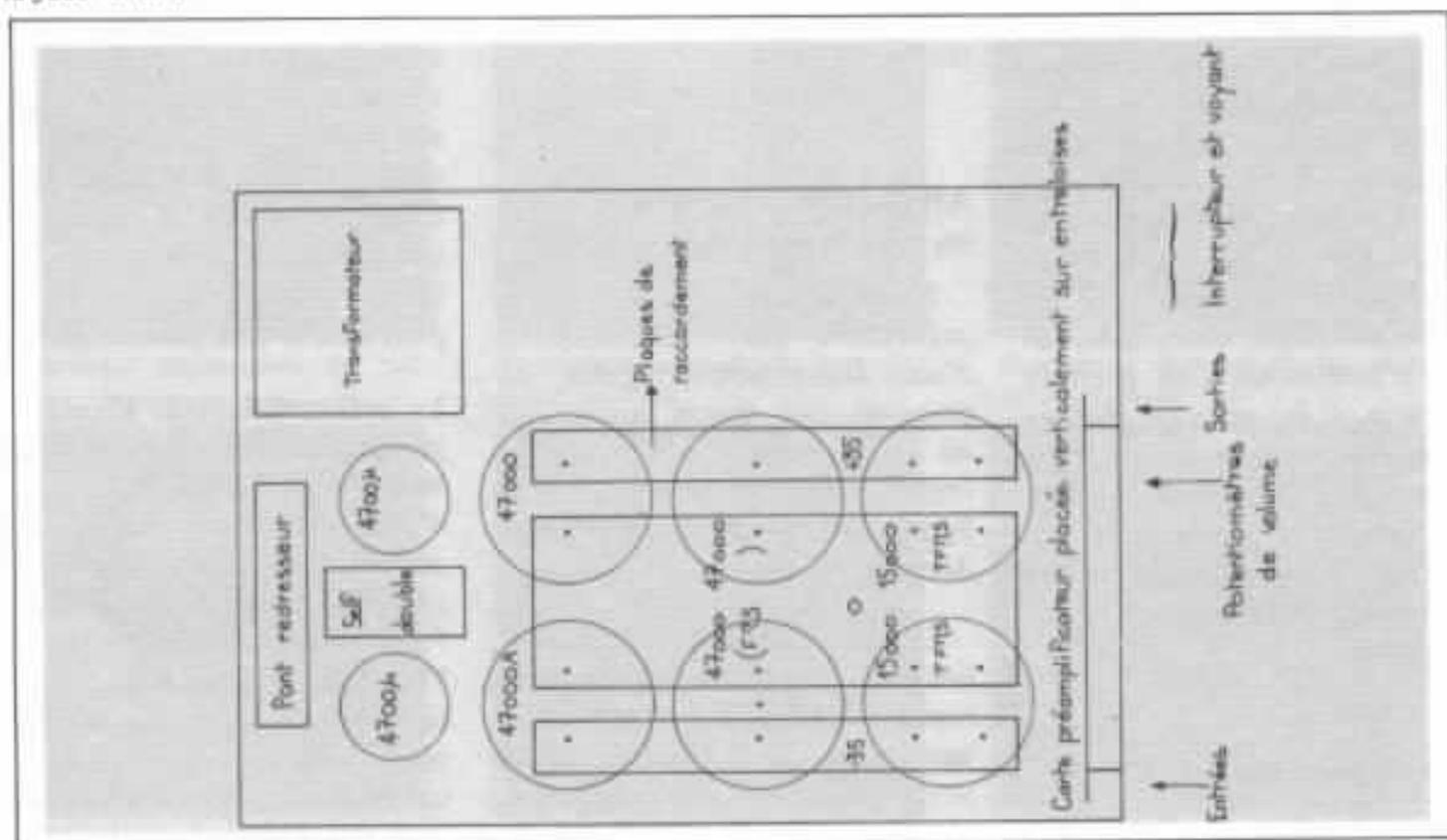


Fig. 15 : Implantation recommandée des éléments du préamplificateur avec alimentation non régulée améliorée.

sont obtenues quand ce couplage est diminué. Cette structure se retrouve un peu dans le préamplificateur SRPP première version, publiée dans L'Audiophile n°2. Elle semble être très appréciée au Japon, tout au moins dans le milieu des audiophiles perfectionnistes. Elle est à opposer à une structure plus conventionnelle où chaque étage est découplé du reste du circuit et donc de l'alimentation proprement dite. Il serait extrêmement intéressant de faire des essais

comparatifs poussés de ces deux structures de préamplificateurs.

Nous terminerons cette étude en revenant un peu sur le problème des « petits condensateurs d'amélioration ». Cette technique doit faire l'objet d'un contrôle, chaque fois, qu'elle est employée. Il faut faire des mesures et éventuellement des écoutes. Les mesures sont indispensables, parce que, subjectivement, une augmentation d'impédance de l'alimentation dans le haut du

spectre peut relever l'aigu d'un préamplificateur (ou d'une chaîne complète), qui, pour une raison quelconque, en manque.

On tombe alors dans le système des compensations qui ont très souvent leurs revers et dont il vaut mieux exclure les circuits d'alimentations. Une alimentation idéale devrait avoir une impédance nulle dans tout le spectre sonore. Il faut chercher à s'en rapprocher le plus possible.

**Page non  
disponible**

# Lutte contre les vibrations dans l'ensemble bras-cellule

Charles-Henri Delaleu

*Les vibrations parasites dans le système de lecture de disque 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.*

*Dans cet article nous mettons clairement en évidence ces phénomènes parasites et nous proposons des solutions très faciles à mettre en œuvre et d'un apport évident quant au rendu sonore.*

## Mise en évidence des vibrations bras-cellule.

Le système bras-cellule peut être considéré en théorie comme une masse qui, soumise à la pesanteur, donne une force d'appui au niveau de la pointe de lecture. Le porte-pointe se comporte comme un ressort (fig 1).

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

$F_0$  = Fréquence de résonance

$K$  = Raideur de l'équipage mobile

$M$  = Masse effective du système bras-cellule

Malheureusement, les phénomènes sont plus complexes car  $M$  est une masse dissipatrice d'énergie. Il ne suffit donc pas de déterminer l'adaptation de l'ensemble bras-cellule par les valeurs de  $M$  et de  $K$ .

Les structures de la tête et du bras sont trop complexes pour être considérées d'une telle manière. Il faut donc étudier leur comportement dynamique.

Dans la première expérience effectuée, l'ensemble bras-cellule est excité au niveau de la tête de lecture suivant la figure 2.

Une fréquence glissante est injectée au mini-exciteur de

vibrations (type 4810). Celui-ci permet d'appliquer une force  $F$ . La tête d'impédance, qui est un double capteur de force et d'accélération, mesure les deux vecteurs  $\bar{A}$  et  $\bar{F}$ . Ainsi, l'excitateur est asservi afin d'obtenir une vitesse constante. Le signal force recueilli est amplifié (2606), puis enregistré (2305).

La courbe à obtenir sur un système parfait est une droite montante à 6 décibels par octave (mesure effectuée à masse constante).

L'examen de l'enregistrement graphique démontre le contraire. A l'aide d'un analyseur de mou-

**Système Masse-Ressort.**

L'impédance mécanique  $Z_m$  est le rapport entre deux

vecteurs  $\vec{F}$  force et  $\vec{V} = \frac{d\vec{x}}{dt}$  vitesse relative :

$$Z_m = \frac{\vec{F}}{\vec{V}}$$

La compliance ( $C_c$ ) est le rapport entre de déplacement et la force)

$$C_c = \frac{d}{F}$$

Pour les fréquences médiannes l'équation prend la forme

$$C_c = \frac{1}{Z_m \cdot \omega} \text{ cm/dyne}$$

La fréquence de résonance est égale à :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{m \cdot C_c}} \quad C_c = \frac{1}{K}$$

$$d'où Q = \frac{2\pi F_0 m \omega}{r_c + r_t} = \frac{1}{r_c + r_t} \cdot \frac{m \omega}{\sqrt{C_c}}$$

$C_c$  : compliance de la cellule  $m$  : Masse équivalente bas-cellule  
 $r_c$  : Résistance équivalente de la cellule  
 $r_t$  : Résistance équivalente du bras et son support

Dans le cas d'un bras de lecture, on ajoute l'amortissement du bras et celui de l'équipage mobile (C)

Sans amortissement l'impédance est de :  $Z_t = \frac{j\omega M}{K - \omega^2 M}$   
 Avec amortissement :  $Z = \frac{CK^2}{K^2 - \omega^2(2MK - C^2) - \omega^4 M^2} + j\omega \frac{MK(K - \omega^2 M) - C^2 K}{K^2 - \omega^2(2MK - C^2) - \omega^4 M^2}$

Si  $\omega \rightarrow 0$  :  $Z \rightarrow C + j\omega M$  si  $\omega \rightarrow \infty$  :  $Z \rightarrow \frac{K - C\omega^2}{j\omega M}$

Facti  $R = \frac{1}{2T} \sqrt{\frac{K}{M} \left(\frac{C}{M}\right)^2}$  A la fréquence d'atténuation

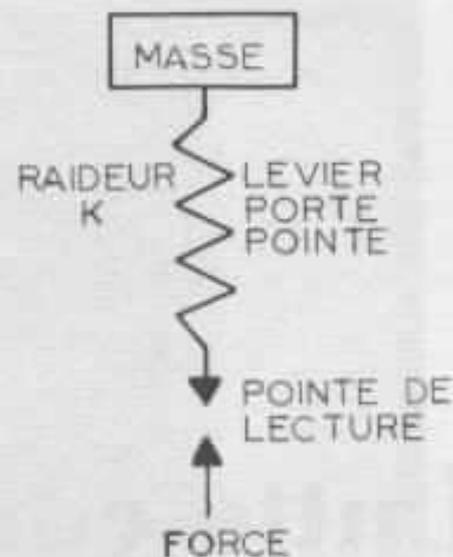


FIG:1

vement (type 4911), nous pouvons observer le comportement du système. A 46 Hz et 150 Hz, se trouvent deux perturbations marquées. Seule la bande de 20 Hz à 1 kHz doit être prise en compte.

L'accident à 46 Hz est dû à l'interface coquille-cellule, car la liaison est peu intime (ce phénomène se retrouve avec toutes les coquilles peu rigides, les cellules fixées par l'intermédiaire de cales, et surtout lorsque l'on place un «soi-disant» amortisseur entre la cellule et la coquille).

L'accident à 150 Hz provient de la fixation de la coquille interchangeable. L'analyse stroboscopique révèle que la coquille et le bras se déplacent en opposition de phase.

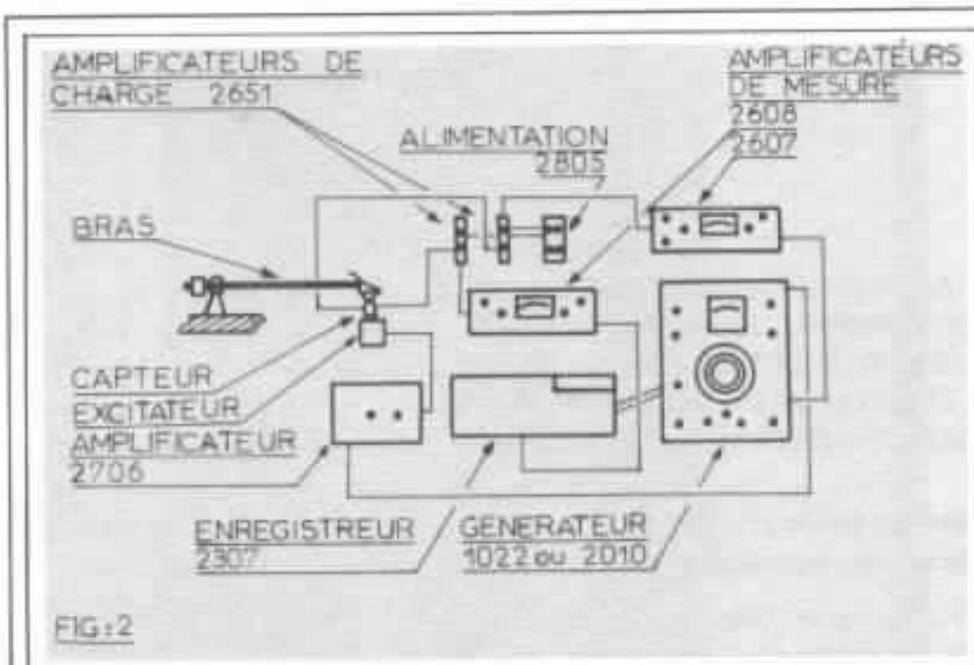
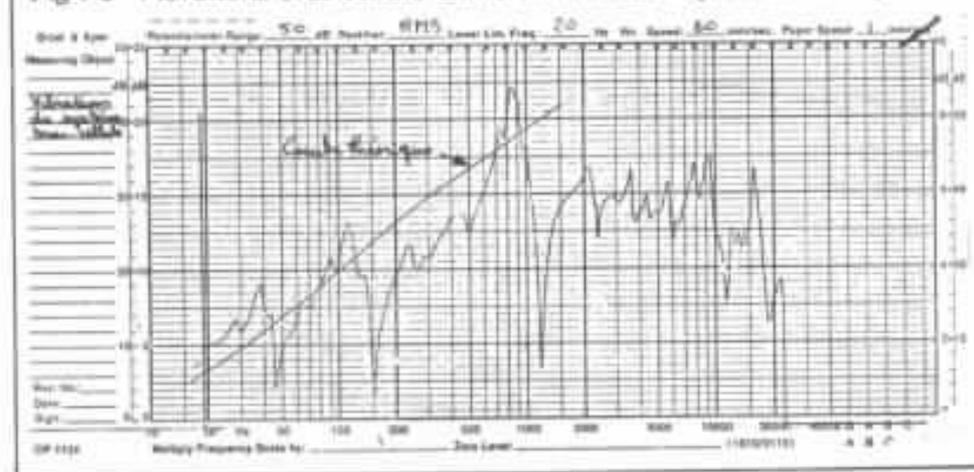
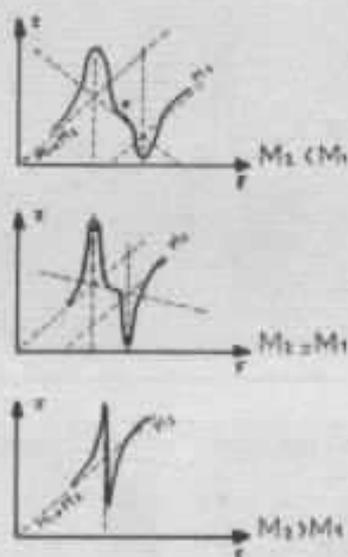
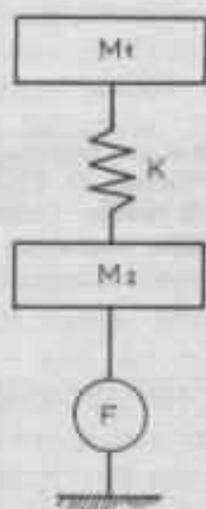


Fig : 2 Vibrations bras-cellule La tête de lecture repose sur le capteur



**Liaison cellule-coquille**

Lorsque la cellule est fixée à la coquille par l'intermédiaire d'un « amortissement », ou que la liaison n'est pas franche (cales, mauvais vissage, coquille peu rigide), l'ensemble peut être con-



impédance ponctuelle  
masse-ressort-masse

Fig : 3 Liaison cellule-coquille  
M1 : Masse effective du bras  
K : Liaison  
M2 : Masse effective de la cellule  
A gauche les courbes d'impédance du système

sidéré comme un système masse-ressort-masse. La force est appliquée sur l'une des masses (fig 3).

Nous avons :

$$Z_T = c + j\omega M_2 + \frac{j\omega M_1 \cdot \frac{K}{j\omega}}{\frac{K}{j\omega} + j\omega M_1}$$

soit :

$$Z_T = c + j\omega \frac{KM_1 + KM_2 - \omega^2 M_1 M_2}{K - \omega^2 M_1}$$

$$\text{Si } \omega \rightarrow 0 \quad Z_T \rightarrow c + j\omega (M_1 + M_2)$$

En haute fréquence, « c » devient négligeable et «  $\omega^2$  » prédominant.

$$Z \rightarrow j\omega M^2$$

Nous avons zéro au numérateur de la fraction pour :

$$KM_1 + KM_2 - \omega^2 M_1 M_2 = 0$$

Soit :

$$\omega = 2\pi F \text{ pour une fréquence}$$

$$F_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K(M_1 + M_2)}{M_1 \cdot M_2}}$$

L'impédance est minimale à la résonance.

Le zéro au dénominateur de la fraction est obtenue pour :

$$K - \omega^2 M_1 = 0$$

L'impédance passe par un maximum pour :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_1}}$$

### Vibrations mécaniques des cellules

La seconde expérience a pour but de démontrer l'existence de vibrations mécaniques sur le corps des cellules, lors de la lecture d'un disque. Un mini-acceleromètre de type 4369 est fixé à l'avant du corps de la cellule. On relève sur un enregistreur graphique 2307 l'émission

recueillie par le 4369 à la lecture d'un disque de fréquences (disque de mesure), voir fig. 4.

Cette mesure est effectuée avec plusieurs modèles de cellules, chaque cellule est en double exemplaire. Les caractéristiques (courbe de réponse, de vibrations) de chaque tête sont relevées, chaque transducteur est appairé avec un modèle de même référence ayant les mêmes caractéristiques. On prélève une cellule dans chaque modèle à laquelle on fait subir un traitement pour diminuer les vibrations mécaniques.

A la fin du traitement, on mesure toutes les paires et l'on compare les résultats entre chaque cellule modifiée et celle qui ne l'est pas. Dans tous les cas, les différences sont de l'ordre de grandeur des courbes de la figure 4.

Il est à noter que pour les plus grosses cellules la masse ajoutée par le traitement est de 0,3g.

La troisième expérience concerne la lecture d'informations musicales sur disque, et les différences que l'on est en droit d'attendre entre deux cellules de même modèle dont l'une est traitée.

Deux disques sont choisis :

— L'un pour sa grande dynamique, il s'agit d'une gravure directe intitulée : Charlie Byrd, Crystal Clear vol IV, le passage du solo de batterie ;

— l'autre, pour la complexité du message : Rossini Overture, London Symphony Orchestra Decca.

Dans le premier disque, avec les cellules modifiées, la dynamique est supérieure de 3 décibels environ, ceci pour tous les modèles de phonolecteurs.

Dans le deuxième cas, le com-

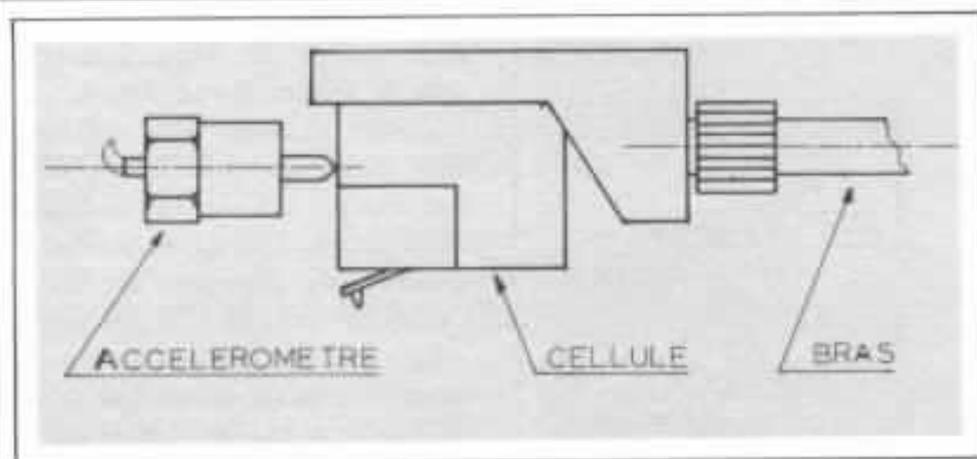


Fig : 4 Vibrations mécaniques de cellules. Position de l'accéléromètre sur la cellule. L'inertie de l'accéléromètre limite les vibrations parasites du corps de la cellule.

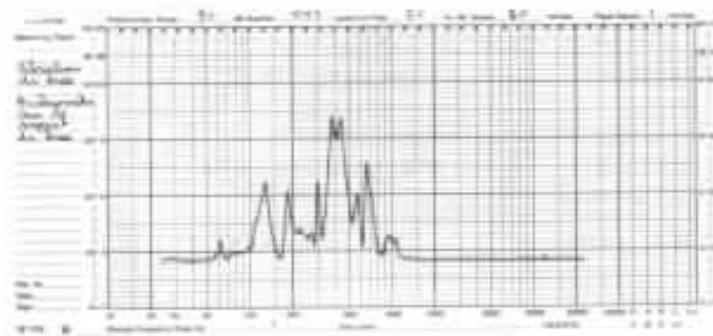
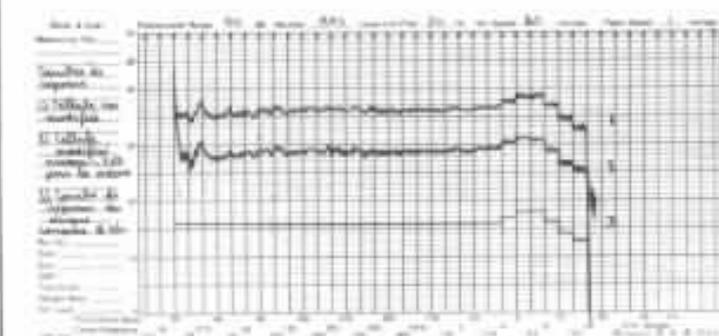
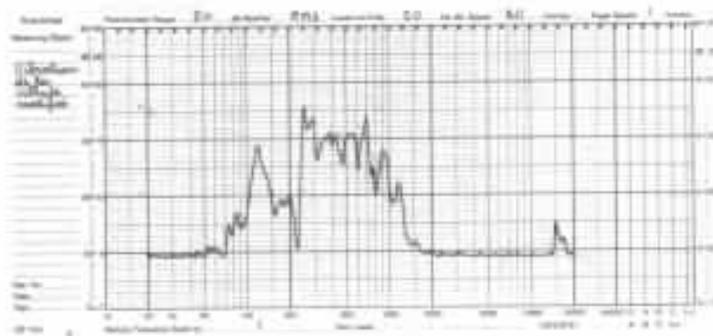
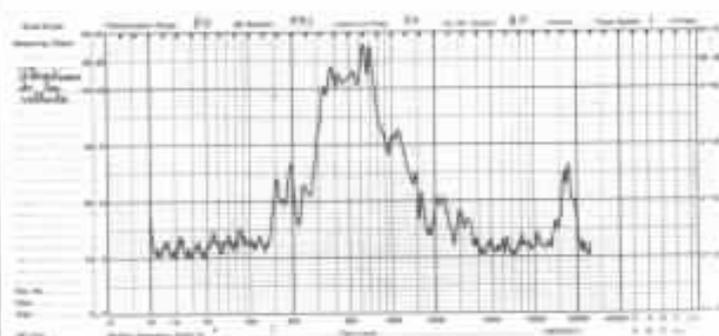


Fig. 4 : Les vibrations se trouvent dans la bande de 200 Hz à 2 000 Hz comme dans le cas des enceintes acoustiques. Ceci rend le problème encore plus délicat. Cette zone correspond à la bande d'acuité maximum de l'homme.

portement transitoire est très différent (cf. fig. 5).

A l'écoute de toutes les cellules, les mêmes constatations ont pu être ressenties : meilleure dynamique, médiums et aigus plus précis, graves plus fermes, informations beaucoup plus naturelles avec les cellules traitées. Avec celles qui ne le sont pas, nous percevons plusieurs petits bruits parasites qui viennent entacher le signal, phénomène qui est fortement atténué après le traitement du corps de la cellule.

Pour quelques cellules dont le levier porte-pointe comporte des anomalies vibratoires, une légère plastification à l'aide de colle vinylique a pu atténuer ce problème. Ceci est la raison pour laquelle les fabricants de têtes de lecture se tournent vers des matériaux plus nobles tels que le carbone, le béryllium et le bore.

#### Vibrations mécaniques du bras

Lors de la première expérience, l'analyseur de mouvements 4911 a permis d'aperce-

voir les vibrations du bras de lecture sur toute la gamme 15 Hz à 1000 Hz. Comme pour les cellules, nous pouvons atténuer ce phénomène néfaste. Il faut donc améliorer le comportement vibratoire du bras, sans pour autant augmenter sa masse dans de fortes proportions.

En ce qui concerne la coquille, le meilleur moyen est de positionner des nervures en aluminium, zamac au magnésium sur le dessus, et de couler une couche d'araldite d'un millimètre d'épaisseur, (voir fig. 6).

La seconde étape concerne l'embout enfichable qu'il convient de supprimer en bloquant sa baïonnette par de l'araldite. La masse ajoutée pour la modification de la coquille est de 0,3 g à 0,6 g suivant la taille de l'objet. Pour la baïonnette, elle est de 0,1 g environ.

La dernière étape concerne le tube du bras. Les plus difficile à travailler sont les bras en « S » en forme de coude. Malheureusement, ce sont les mêmes qui, mécaniquement, vibrent le plus. Avec l'analyseur de mouvements, on perçoit très nettement d'importants centres de vibrations aux coudes, (voir fig 7).

Pour rendre plus performant le bras, la solution la plus simple consiste à injecter une substance amortissante à l'intérieur du tube ayant pour but de raidir celui-ci, puis d'abaisser les micro-vibrations se propageant le long du corps.

Pour les bras droits, la solution est plus aisée. La première opération à effectuer consiste à glisser à l'intérieur du tube, un second tube que l'on prendra en fibre de carbone, pour sa légèreté et son bon module de young. Les fibres de carbone ainsi que les fibres de verre se trouvent dans les formes appropriées chez les revendeurs de modèles réduits.

Entre le bras et le second tube, on coule de l'araldite, puis à l'intérieur du second tube, on injecte une seconde substance totalement différente : goudron, blackson, etc (fig. 8).

Pour ce qui est de la valeur de la masse ajoutée, elle dépend de l'imagination des personnes qui entreprennent les modifications. Pour un bras de haute qualité, l'adjonction de deux petites nervures sur la coquille, d'une cou-

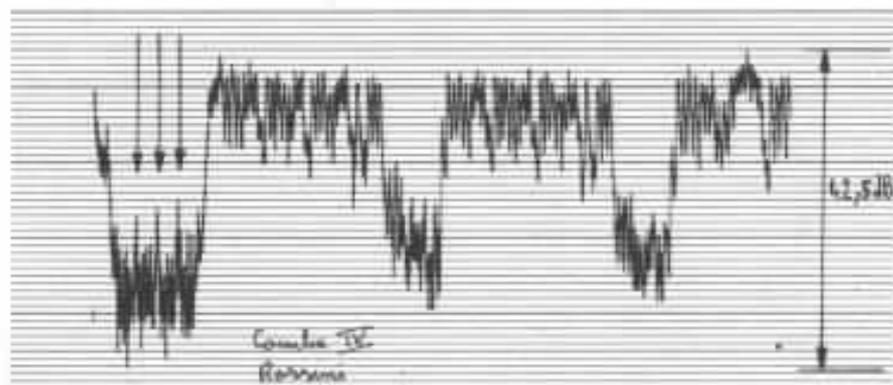
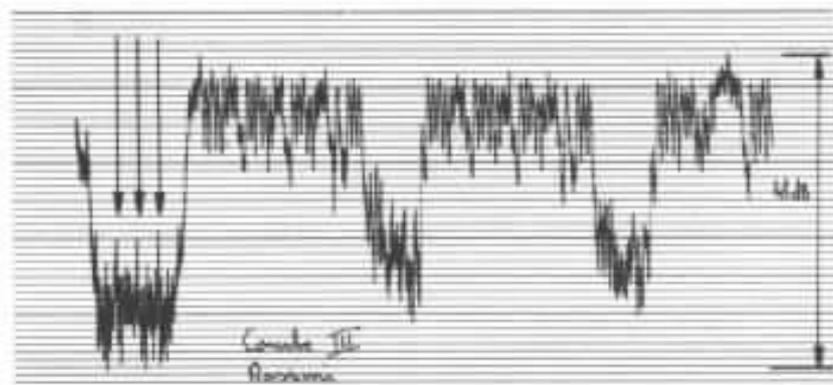
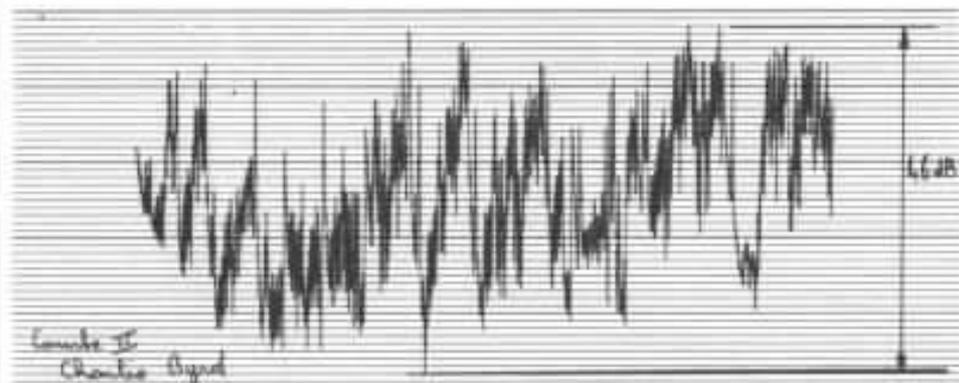
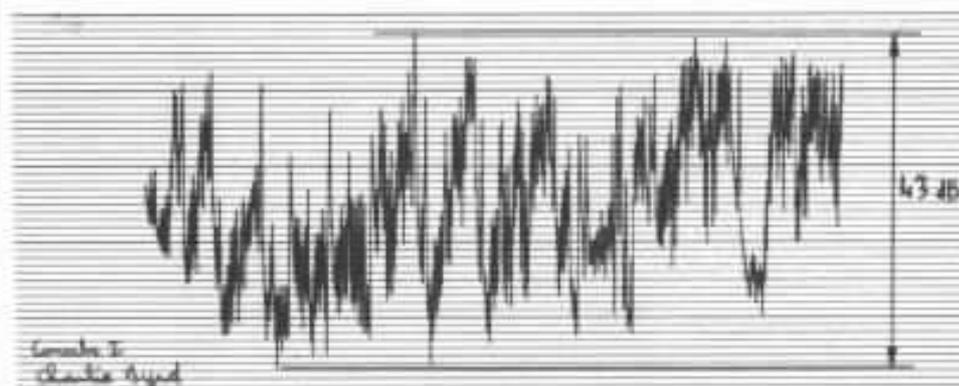


Fig. 5 : Lecture d'un disque

Courbe 1 - Cellule normale

Courbe 2 - Cellule modifiée, dynamique supérieure de 310

Courbe 3 - Cellule normale

Courbe 4 - Cellule modifiée, comportement dynamique

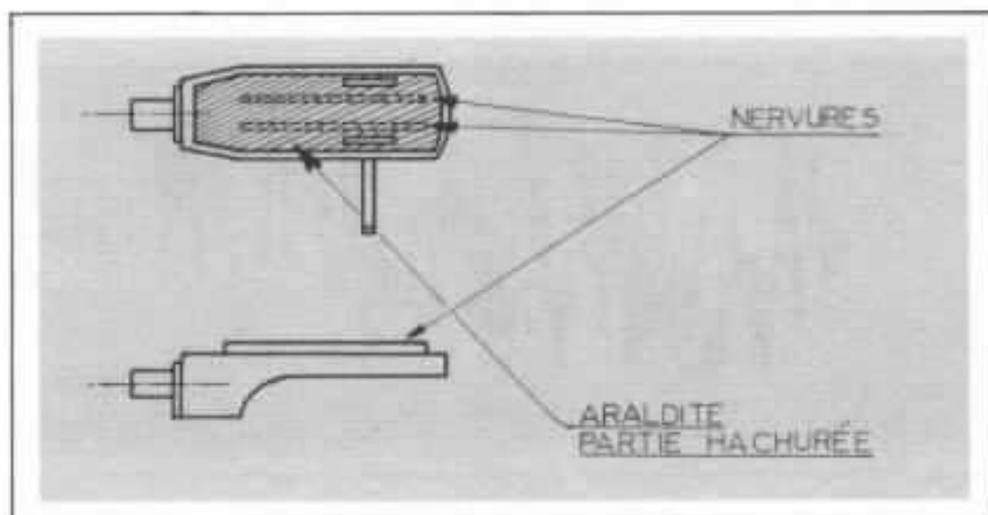


Fig. 6 Modification de la coquille  
Attention à la position des nervures, à l'épaisseur de l'araldite qui doit être rigoureusement constante

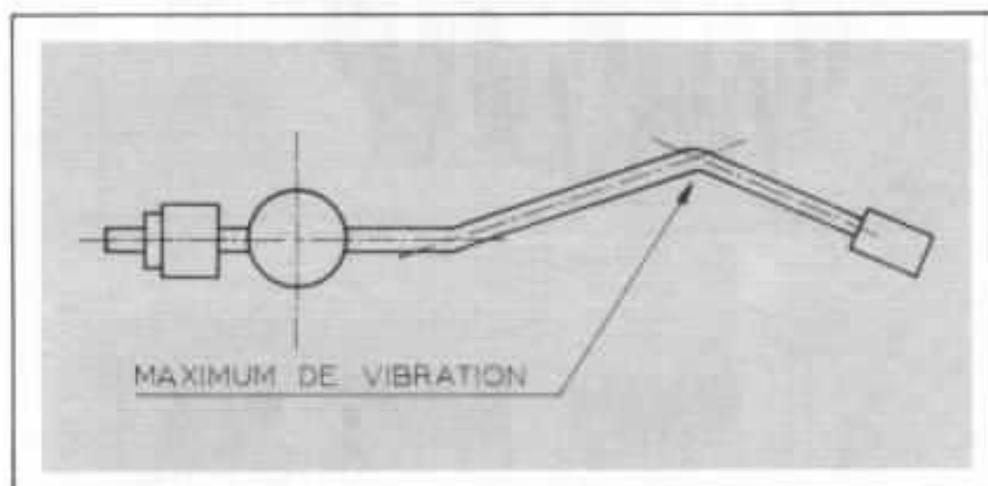


Fig. 7 : Position des vibrations maximums sur un bras Coupe d'un bras droit modifié.

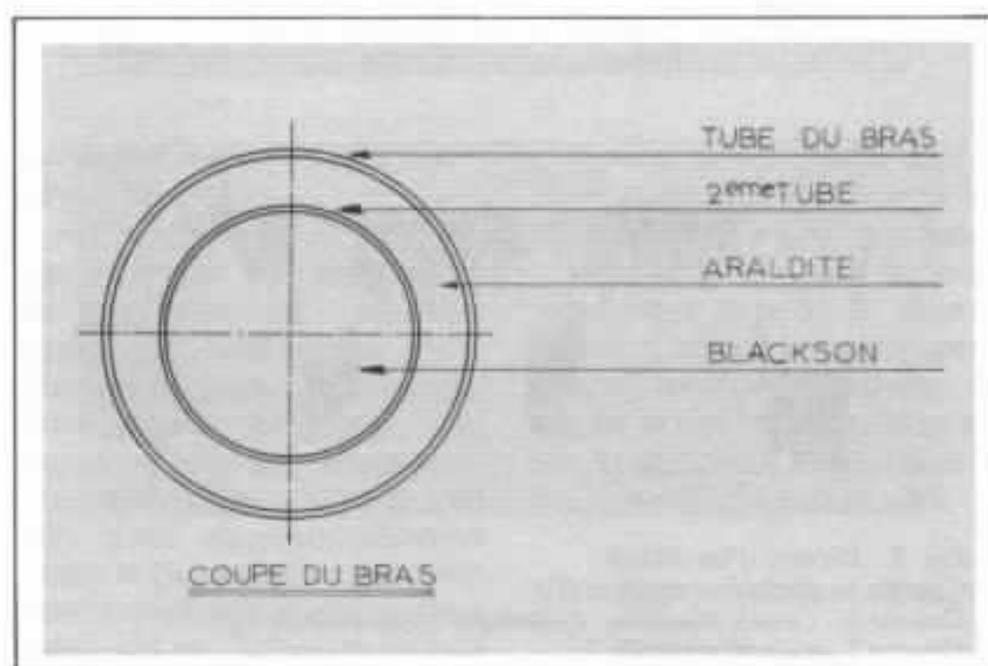


Fig 8 - Réglage de la force d'appui

che de 1,5 mm d'araldite à l'intérieur de celle-ci, puis de la pose d'un tube en fibre de carbone, l'injection d'araldite entre le tube et le bras, puis de blackson à l'intérieur du second tube, la masse ajoutée est de 12,5 g. A l'origine, le bras pesait 260 g.

Il est important de choisir différents matériaux afin d'engendrer des vitesses de propagation différentes. Ceci permet de diminuer les résonances du bras dues à l'établissement de modes de vibrations privilégiées à certaines fréquences.

Les personnes qui seront tentées de réaliser les modifications décrites, devront être très attentives lors de la réalisation. En effet, l'apport de masse en proportion importante modifiera le comportement cinétique du bras.

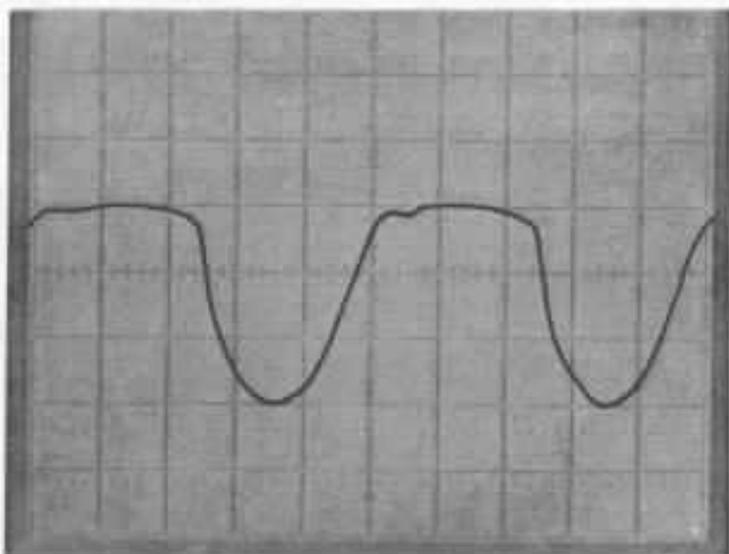
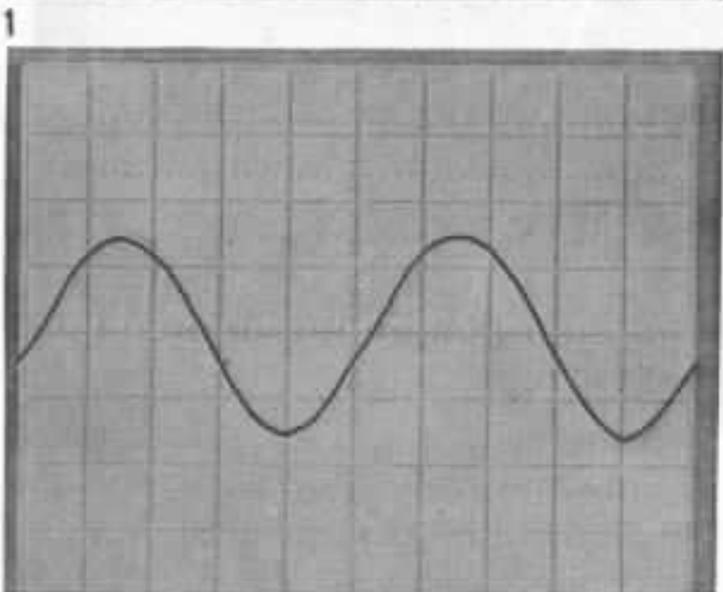
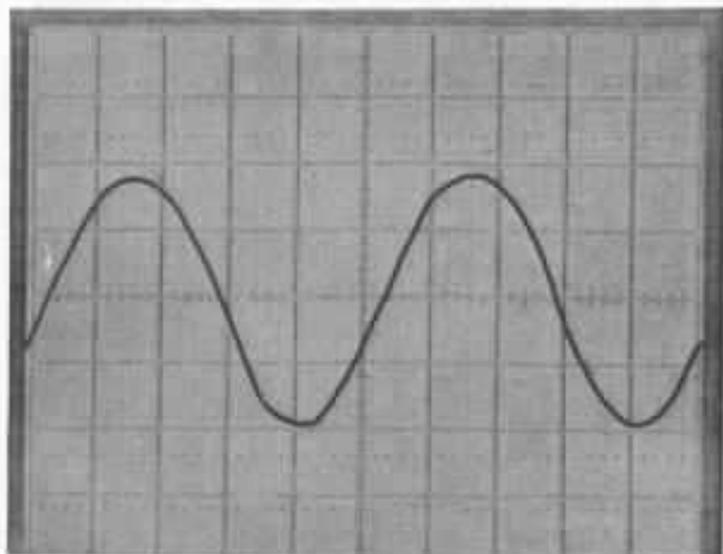
Aussi, les matériaux à utiliser devront être soigneusement choisis et dosés en petites quantités. Le poids moyen d'une cellule montée sur une coquille est de 20 g. La masse ajoutée à la cellule montée sur la coquille ne devra pas dépasser 0,6 g.

Le poids moyen d'un bras est de 320 g. La modification du bras ne devra donc pas dépasser 16 g. La limite étant de 5 % de la masse brute, une légère modification du comportement du bras est à craindre en cas de dépassement.

## Conclusion

Les points à surveiller particulièrement dans l'installation d'un ensemble bras-cellule sont les suivants :

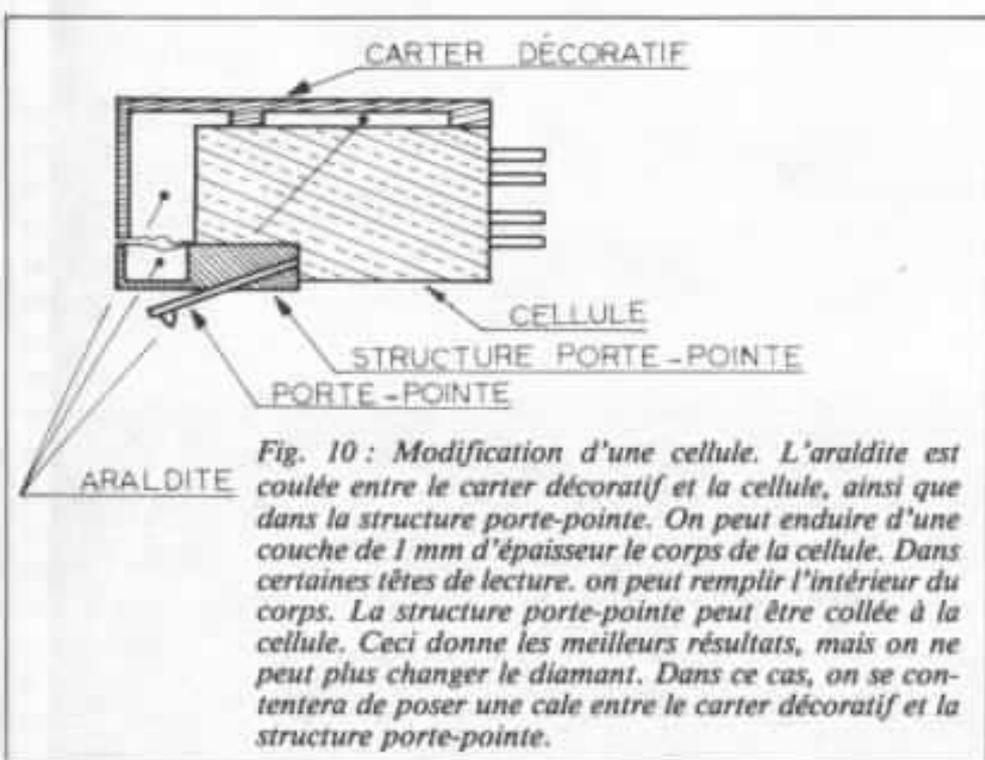
- La force d'appui : le réglage de la force d'appui est délicat, car une mauvaise charge peut être très néfaste ; voir fig 9.



1 Fig. 9 : La force d'appui est de 1,2 grammes, valeur indiquée par le constructeur.

2 La force d'appui est de 0,6 grammes.

3 La force d'appui est de 2,4 grammes. La forme de la sinusoïde de 3/50 Hz est variable en fonction de la force d'appui.



- Angle d'offset
- Overhang
- Anti-skating
- Vibrations du porte-stylect
- Vibrations de la visière du porte-équipage mobile
- Vibrations du corps de la cellule : voir fig 10
- Liaison cellule-coquille
- Couplage coquille-bras (baïonnette)
- Vibrations du bras.
- Adaptation cellule-préamplificateur (article Audioophile n°8 Gérard Chrétien).

**Page non  
disponible**

# Réalisation d'une platine de très haute qualité

## 1 - Les impératifs

*Jean Constant Verdier*

*Voilà bientôt six mois, J.C. Verdier passait nous voir, avec un prototype qu'il venait tout juste d'achever. Le prototype en question était une platine. Nous l'avons écouté, mesuré et nous lui avons formulé certaines suggestions, qu'il s'attache à résoudre à l'heure actuelle. Nous lui avons aussi demandé, pour nos lecteurs, de relater son expérience.*

Une expérience professionnelle déjà longue m'a confronté bien souvent aux différents problèmes soulevés par la conception et la mise en fabrication de tables de lecture haute fidélité destinées aux marchés grand public. Dans ce domaine le concepteur doit se plier aux exigences des services commerciaux et il est conduit, pour rester dans le cadre de son budget, à adopter les gadgets qui font vendre au détriment parfois de l'indispensable. Toutefois l'expérience est enrichissante car j'ai été conduit à examiner de très près tout ce que fait le concurrence, mesures systématiques, comparaisons de

toutes natures et pour terminer mise en pièces du matériel. A ce titre le métier est intéressant car il est possible d'imaginer ce que pourrait être une table de lecture conçues hors de tous impératifs commerciaux... et de la réaliser pour son usage personnel.

### **Le plateau**

Chacun sait que le plateau doit avoir un moment d'inertie élevé pour régulariser la vitesse de rotation. Dès lors on est tenté de réaliser un plateau évidé afin que le maximum de matière se trouve à la périphérie pour bénéficier de l'inertie la plus grande

possible tout en économisant la matière première. Ce calcul pour judicieux qu'il soit conduit à l'adoption de profils creux (voir figure 1, 2 et 3) qui constituent tous des résonateurs doués de coefficients de qualité élevées. Le cas représenté en figure 3 constitue un comble dans le genre. Ce plateau très profond, produit une note perceptible par l'oreille pendant plusieurs minutes lorsqu'on l'excite en le frappant sur le bord... évoquer le son des platines à son propos devient aussi évident que superflu. Pour imparfaits qu'ils soient dans leur immense majorité, ces plateaux appellent le respect, car ils sont

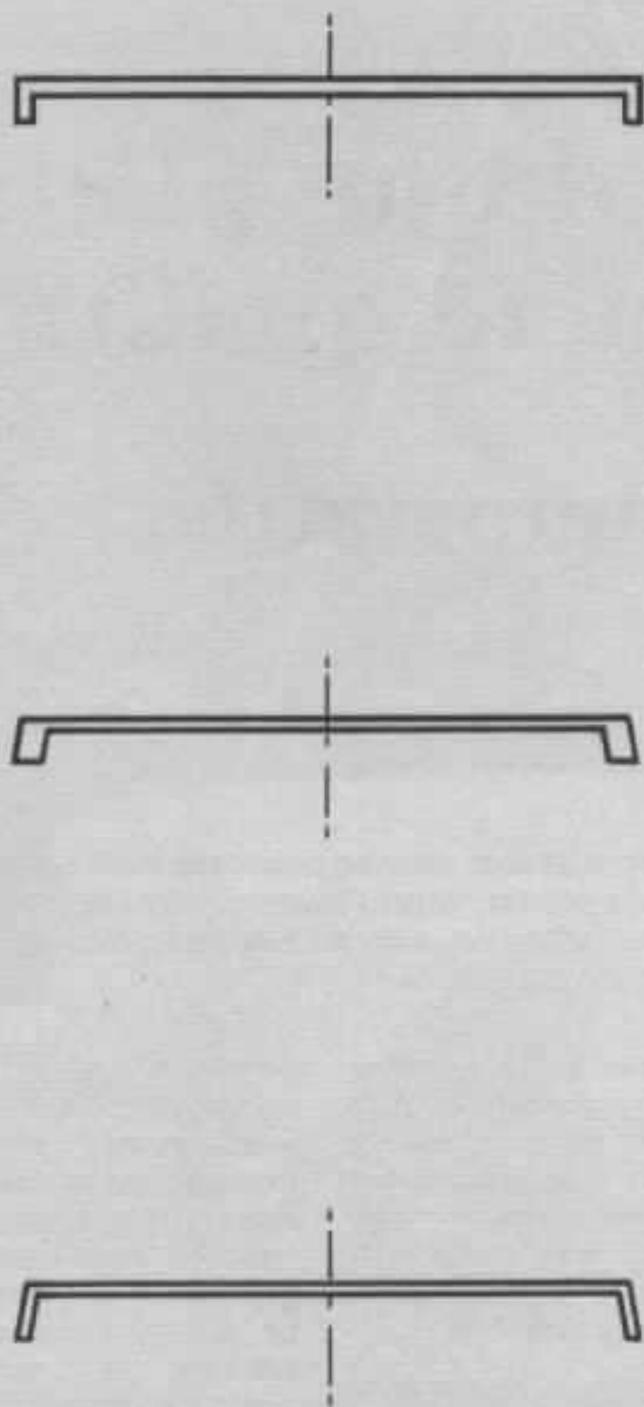


Fig. 1, 2, 3 : Profils de plateaux conventionnels

la preuve d'une très grande maîtrise de la matière.

Réalisés par moulage sous pression, puis usinés seulement aux endroits visibles, ils tournent avec un voilage apparent compris entre  $\pm 0,1$  mm.

Cela constitue une authentique prouesse technologique qu'il faut renouveler avec la même précision pour chaque plateau produit. La maîtrise dans la fabrication du plateau distingue les véritables fabricants des quelques fantaisistes qui sous couvert de prétentions esthétiques ont présenté des plateaux constitués de trois branches terminées par des masselottes supportant le disque, afin de contourner les difficultés de fabrications d'un plateau classique. Il faut ajouter que ce genre de dispositif est incapable par sa nature même de provoquer le couplage mécanique étroit qui doit exister entre le plateau et le disque ; c'est un problème sur lequel je reviendrai plus tard.

Compte-tenu de tout ce que nous savons, le plateau le moins mauvais possible sera doué d'une grande inertie, exempt de résonance propre et parfaitement équilibré. Pratiquement, pour me mettre à l'abri des mauvaises surprises, j'ai choisi de copier les proportions des plateaux qui équipent les machines de gravure de disques soit une épaisseur de 60 mm pour un diamètre de 300 mm.

Reste le choix du matériau employé. On utilisera du bronze ou du laiton pour un plateau de masse importante, un alliage d'aluminium pour une masse moyenne et pourquoi pas du bois si l'on est téméraire et que l'on se contente d'un plateau relativement léger. Dans tous les cas l'usinage fera l'objet de soins tous particuliers.

## L'axe du plateau

L'axe du plateau remplit plusieurs fonctions. La plus évidente est de permettre la rotation de ce dernier. La solution adoptée par la grande majorité des constructeurs (fig.4) pour suffisante qu'elle est, n'est pas la meilleure possible car elle cumule les erreurs angulaires (très faibles certes) de deux assemblages en rotation. La liaison entre le plateau et l'axe se fait par un emmanchement conique démontable ou un emmanchement cylindrique à force. La liberté de rotation est assurée par l'axe dans l'alésage, avec le jeu de fonctionnement indispensable (quelques 1/100 de mm). De surcroît, la bille qui termine l'axe est placée plus bas que la masse qu'il supporte.

La disposition inverse (fig. 5) élimine les deux inconvénients cités plus haut. Il n'y a plus qu'un seul assemblage tournant entre le plateau et l'axe. Le centre de gravité est situé très en-dessous du point d'appui constitué par la bille placée au sommet de l'axe, déterminant ainsi un équilibre indifférent du plateau.

L'axe doit par ailleurs assurer une liaison rigide entre le plateau et la platine qui supporte à son tour le bras de lecture. Cette rigidité ne peut s'obtenir que par un guidage de l'axe au travers du plateau suffisamment long et un diamètre d'axe suffisamment important. D'autre part il faut savoir qu'un excellent guidage ne peut être obtenu que lorsque la longueur de l'alésage vaut cinq fois le diamètre de l'axe. Pratiquement pour la maquette réalisée, l'alésage aura une longueur de 90 mm pour un diamètre d'axe de 20 mm, ce qui constitue un compromis satisfaisant aux trois conditions énoncées.

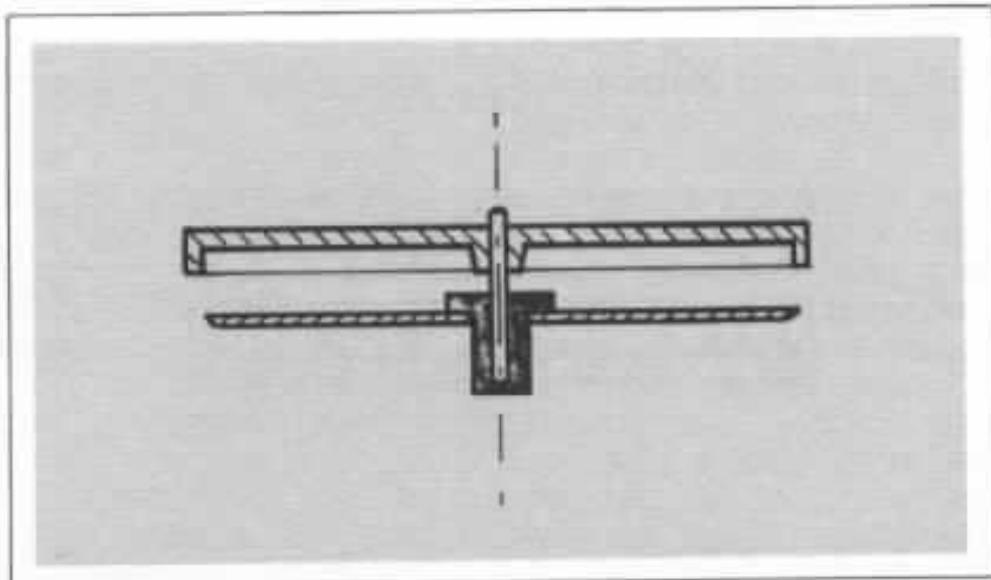


Fig. 4 : Disposition classique de l'axe de pivotement d'un plateau

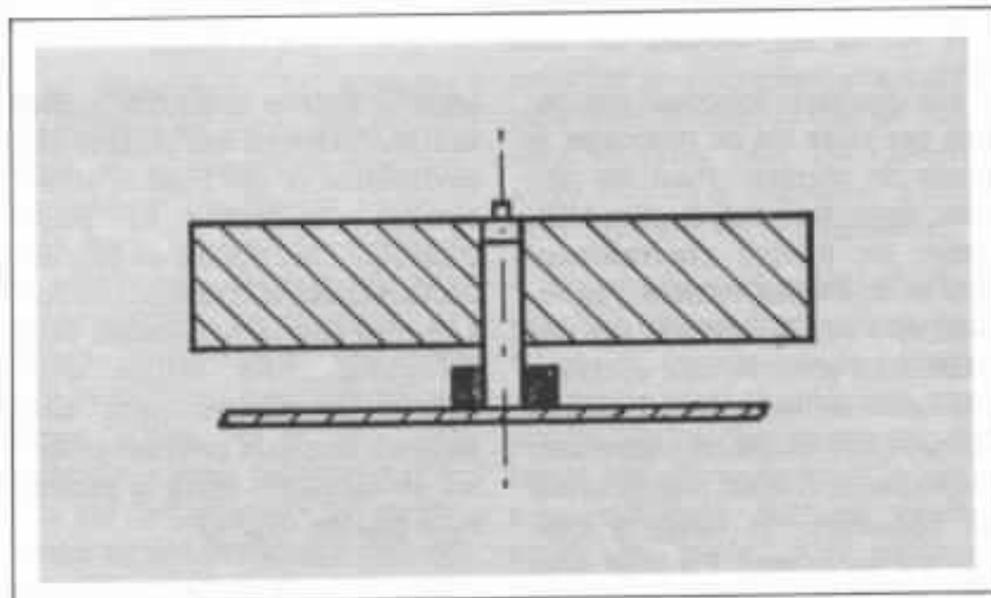


Fig. 5 : Disposition inversée de l'axe du plateau permettant un équilibre indifférent

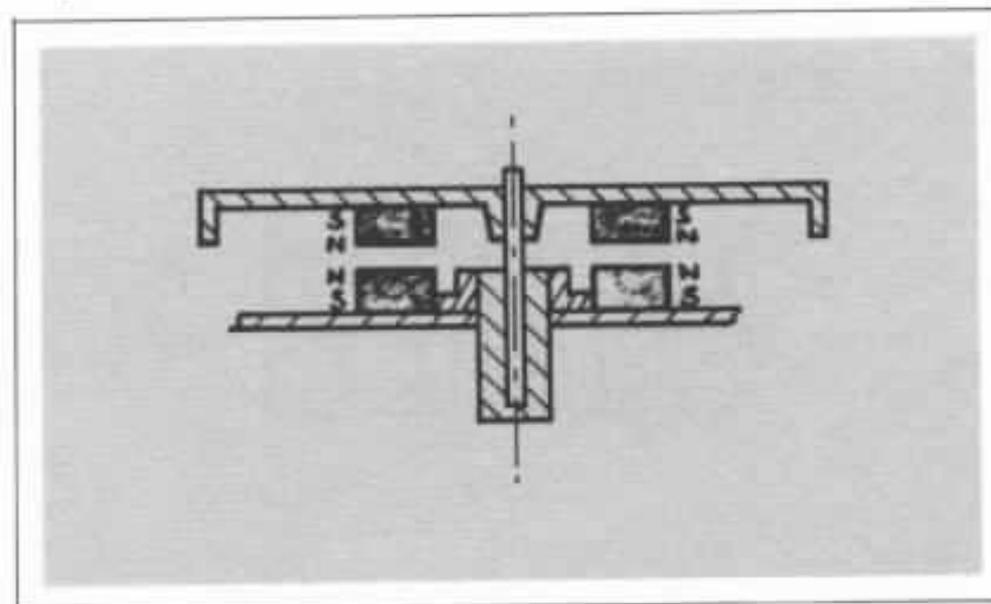


Fig. 6 : Disposition des aimants annulaires provoquant la sustentation

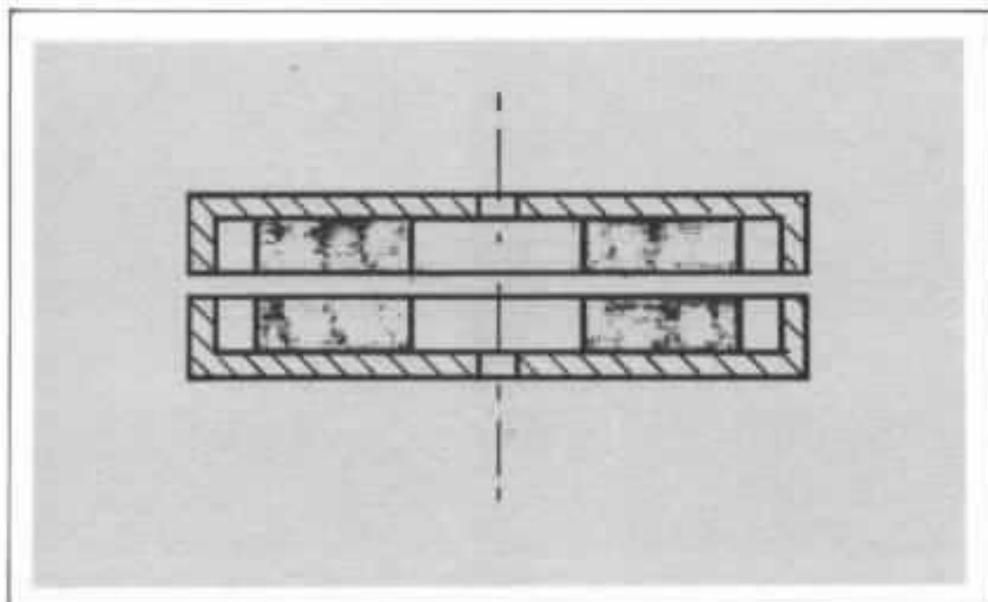


Fig. 7 : Bouclage du circuit magnétique par l'extérieur

La dernière fonction accomplie par l'axe est de supporter le poids du plateau. Pour un plateau léger, cela se fait sans difficulté, on adopte généralement une bille d'acier sertie à l'extrémité de l'axe et reposant sur une pastille en acier rectifié et traité. Malheureusement, mon projet comportant un plateau de masse importante, il n'est plus possible de considérer la butée à bille comme suffisante. En effet sous l'action de la pression, le contact presque parfaitement ponctuel

entre la bille et la pastille traitée se transforme en une surface non négligeable et qui l'usure aidant devient génératrice de bruits (rumble). Une platine de fabrication américaine nous montre fort à propos comment éliminer cette difficulté. Elle utilise deux aimants annulaires pour haut parleurs disposés avec des polarités antagonistes entre le plateau et la platine (fig. 6).

Par ce procédé, il est possible de régler la force d'appui sur la

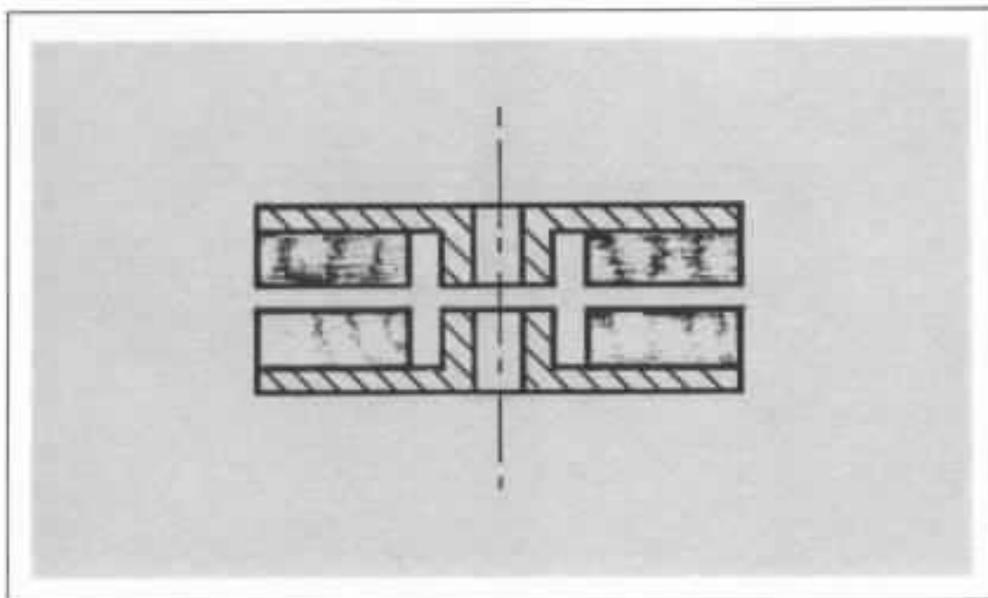


Fig. 8 : Bouclage du circuit magnétique par l'intérieur

bille et éventuellement de l'annuler complètement.

### Sustentation du plateau

Il est possible d'utiliser les aimants tels quels en les disposant l'un sous le plateau, l'autre sur la platine, tous deux centrés par rapport à l'axe. C'est bien sur la disposition la plus simple mais elle n'est pas sans présenter quelques inconvénients. Les fuites magnétiques sont importantes et peuvent modifier le fonctionnement de la tête de lecture quand elle s'approche du centre du plateau. La force répulsive est loin d'égaliser ce que l'on peut obtenir avec un circuit magnétique en acier enfermant et canalisant le flux des deux aimants.

A titre expérimental, j'ai construit un circuit magnétique démontable permettant de réaliser les configurations des figures 7, 8 ou 9 avec des aimants de 120 mm de diamètre. En 7, le circuit magnétique est refermé seulement par l'extérieur, en 8 par l'intérieur, en 9 intégralement refermé. Les forces répulsives suivantes ont été obtenues.

- Cas de la figure 7 : 4,5 kg
- Cas de la figure 8 : 3 kg
- Cas de la figure 9 : 6 kg

En dehors du gain important sur la force répulsive, obtenu par un circuit magnétique complet, il est notable que les fuites magnétiques sont extrêmement réduites : la lame d'un tourne-vis est à peine attirée par le circuit fermé alors qu'on la décollait avec peine des aimants nus.

Toutefois la force répulsive de 6 kg atteinte dans le meilleur des cas ne sera pas suffisante pour soutenir le plateau du tourne-disque décrit dans ce projet. La maquette réalisée utilisera donc

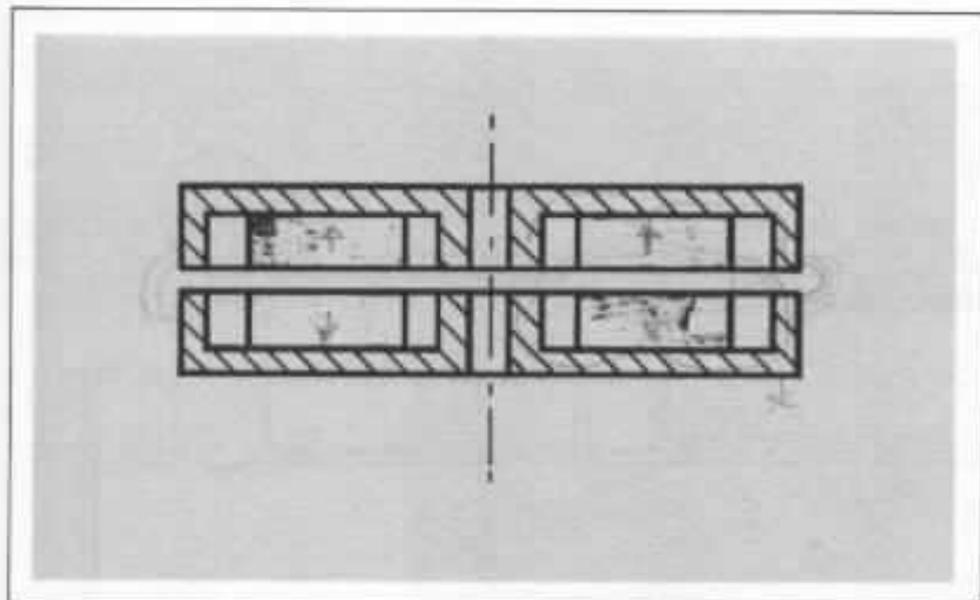


Fig. 9 : Circuit magnétique entièrement refermé. C'est le cas qui a été retenu pour notre réalisation

des aimants de 180 mm de diamètre capables de développer une force répulsive de 17 kg constituant ainsi une réserve de sécurité suffisante pour le plateau envisagé dont la masse évoluera de 12 à 14 kg suivant les accessoires dont il sera équipé.

#### L'entraînement le moteur et la suspension

Il n'est pas possible d'aborder séparément chacun de ces points. C'est la judicieuse disposition de ces composants l'un par rapport à l'autre qui détermine la philosophie d'un tourne disque. La conception décrite ici est celle adoptée par Edgar Vilchur pour son tourne disque Acoustic Research à la fin des années 50.

Il s'agit bien entendu de la contre platine suspendue, cette conception a largement fait école depuis : Thorens, Braun et ERA dans les années 60 et tout dernièrement Linn et Ariston. Le peu de succès de ce système pour les tourne disques haute fidélité bon marché d'aujourd'hui s'explique facilement. Le plateau suspendu exige impérativement un équi-

brage rigoureux, le moindre déséquilibre est perçu par l'utilisateur et se manifeste par un balancement régulier du plateau et du bras. De plus au moment du démarrage certains de ces tourne disques étaient animés de curieux soubressauts extrêmement inquiétants pour l'acheteur moyen (dans 99 % des cas l'acheteur n'était même pas prévenu du principe de la contre platine et des avantages qui, en découlaient). C'est ainsi que peu à peu les matériels ont évolué

vers une qualité bien inférieure. Je citerai seulement le cas de la firme française ERA qui a connu le succès et la consécration à l'échelle européenne, le jour où parallèlement au modèle de base est apparu un modèle d'apparence absolument identique mais dont les ressorts étaient remplacés par de gros blocs de caoutchouc mousse pratiquement sans efficacité mais possédant le gigantesque avantage de ne pas effrayer la clientèle. Il convient donc de féliciter les firmes anglaises qui ont su avec courage remettre à la mode un procédé fabuleusement efficace et surtout lui donner ses lettres de noblesse en proposant des matériels d'une haute qualité de finition et d'un prix suffisamment élevé afin de se consacrer à une belle clientèle de connaisseurs.

Je rappelle rapidement le principe du tourne-disque Acoustic Research. Le plateau et le bras de lecture sont montés sur une contre platine, suspendue par de longs ressorts coniques à la platine principale formant également le socle. Le moteur d'entraînement, synchrone à vitesse lente est monté à sec sur

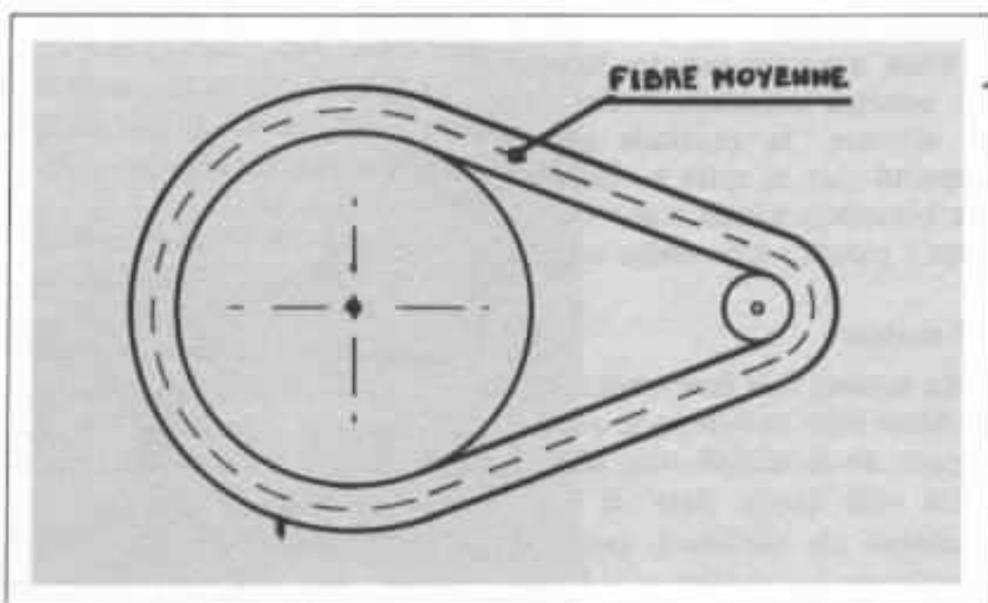


Fig. 10 : Représentation, très exagérée, de la notion de fibre moyenne

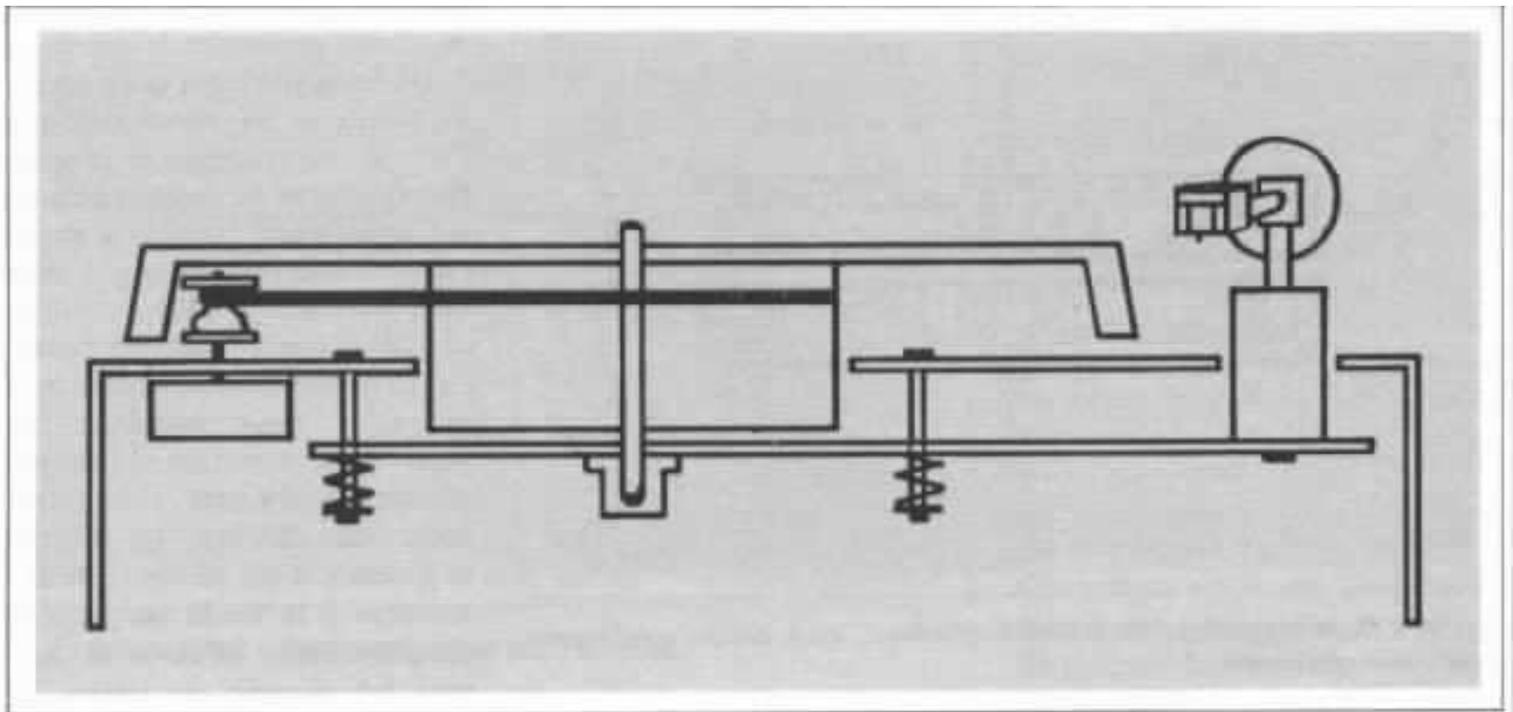


Fig. 11 : Dispositif à contre-platine suspendue

cette même platine principale. L'entraînement se fait par l'intermédiaire d'une courroie plate en caoutchouc joignant la poulie moteur à une couronne intérieure du plateau (fig. 11). L'avantage est évident, les vibrations ramenées par le support de la platine et le moteur sont filtrées en même temps par la suspension. La protection contre la réaction acoustique (effet Larsen) et les bruits de moteur est presque parfaite.

Voilà dans ses grandes lignes un principe étonnamment simple et efficace, la pratique nous apprend que sa mise en œuvre est beaucoup moins naïve qu'il peut y paraître à première vue.

### Le moteur

Le moteur doit être synchrone à vitesse lente de telle sorte que le rapport de démultiplication nécessaire soit faible dans le but d'obtenir de meilleures performances sur la précision et la fluctuation de vitesse.

Prenons un exemple chiffré

pour démontrer la nécessité de ce choix :

1- Le moteur tourne à 250 tours/minute, la poulie du plateau fait 200 mm de diamètre, la courroie à une épaisseur de 1 mm. Sachant que c'est la « fibre moyenne » de la courroie qui détermine le rapport de démultiplication (fig. 10), on peut calculer le rayon convenable pour la poulie du moteur. Pour 33 tours 1/3 la démultiplication doit être :  $250/33,33 = 7,5$ .

Le rayon utile de la poulie du plateau sera en tenant compte de la fibre moyenne de la courroie :  $100 + 0,5 = 100,5$ .

D'où découle le rayon utile de la poulie  $100,5/7,5 = 13,4$  et son rayon réel  $13,4 - 0,5 = 12,9$  mm.

Supposons maintenant que par suite d'une fabrication défectueuse, l'épaisseur de la courroie varie de  $\pm 1/100$  de mm entre son point le plus épais et son point le plus mince et d'une manière régulière sur toute sa périphérie. Ce défaut va provoquer une variation du rapport de

démultiplication croissant et décroissant une fois par tour de courroie. Le rapport maximum sera :

$$\frac{100,5 + 0,01}{13,4 - 0,01} = \frac{100,51}{13,39} = 7,506$$

Le rapport minimum sera :

$$\frac{100,5 - 0,01}{13,4 + 0,01} = \frac{100,49}{13,41} = 7,493$$

Soit une fluctuation de vitesse de :

$$\frac{7,506 - 7,493}{7,5} = 0,0017 = 0,17 \%$$

2- Reprenons le calcul avec un moteur tournant à 1500 tours par minute sans faire varier les autres paramètres.

Rapport de démultiplication  $1500/33,33 = 45$

Rayon de la poulie moteur  $100,5/45 = 2,2333$

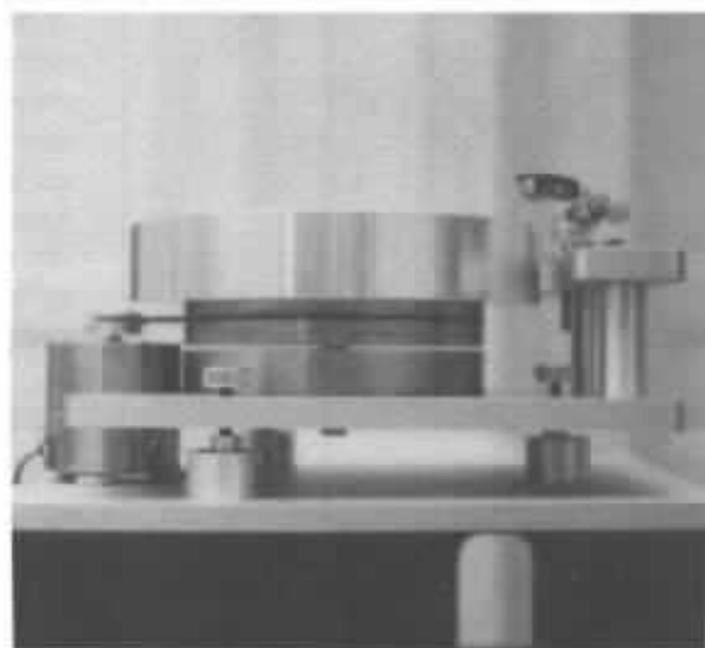
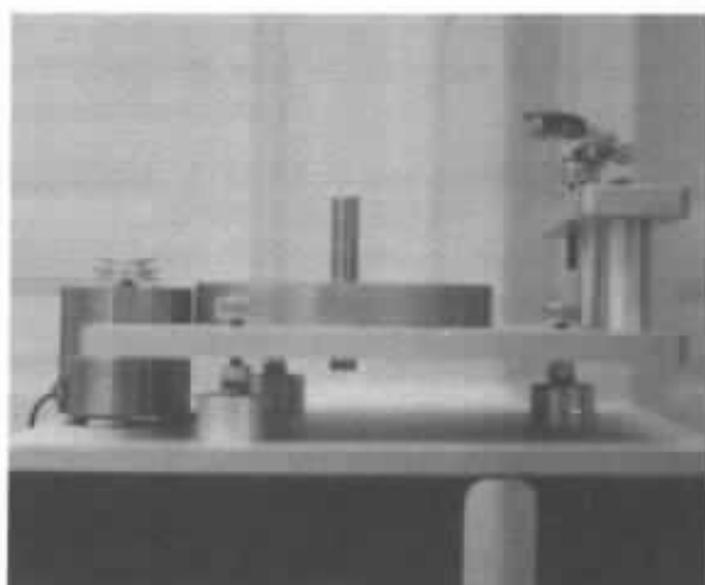
Soit un rayon réel de  $2,2333 - 0,5 = 1,733$

Rapport minimum :

$$\frac{100,5 + 0,01}{2,23 - 0,01} = \frac{100,51}{2,24} = 45,274$$

Rapport maximum

$$\frac{100,5 - 0,01}{2,23 + 0,01} = \frac{100,49}{2,24} = 44,861$$



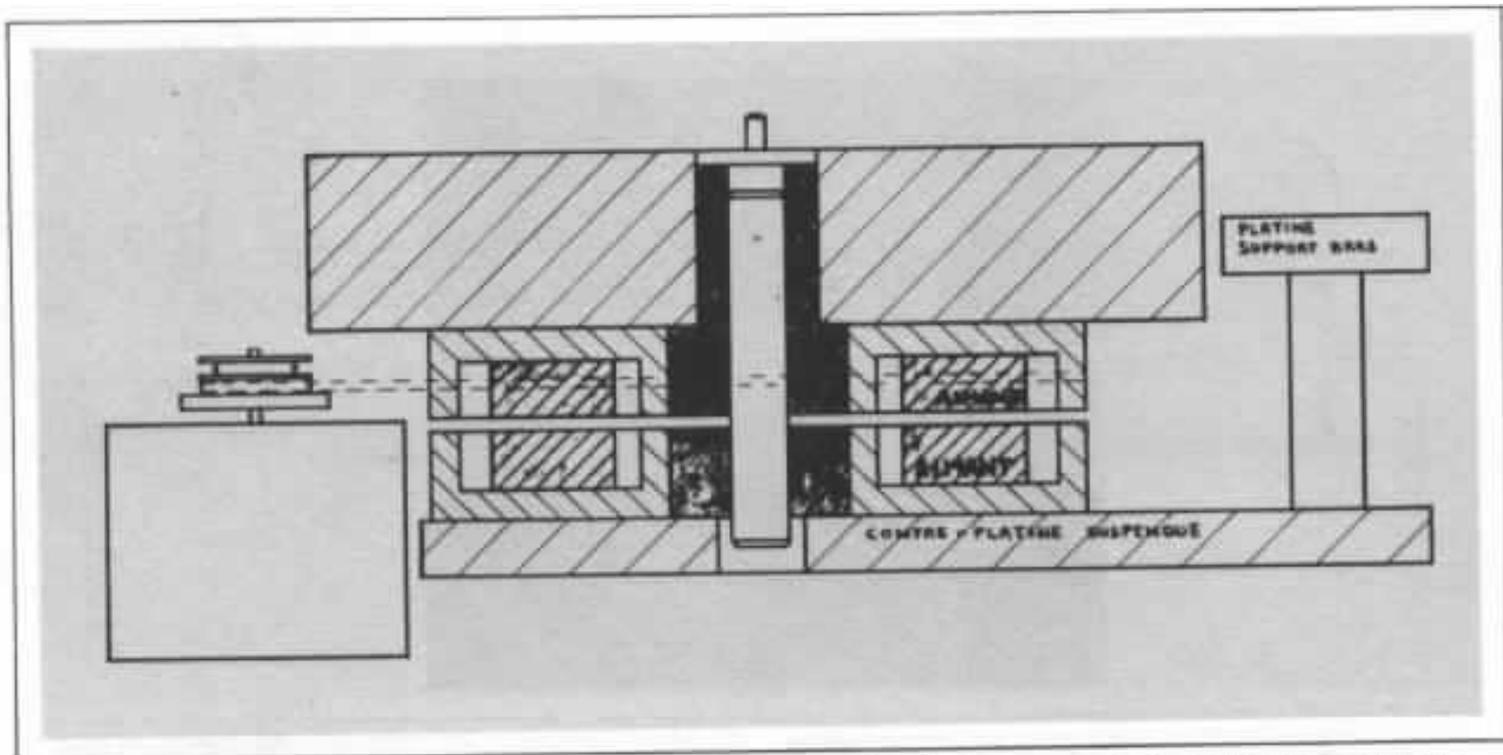


Fig. 12 : Vue en coupe de notre premier prototype. La suspension de la contre-platine n'est pas représentée

Soit une fluctuation de vitesse de :

$$\frac{45,274 - 44,861}{45} = 0,0091 = 0,91 \%$$

Ainsi, le taux de pleurage déterminé par les seuls défauts de la courroie est inversement proportionnel à la vitesse de rotation du moteur d'entraîne-

ment, il faudra la choisir la plus basse possible.

Pratiquement, ce choix s'établira entre les modèles à 18 pôles donnant une vitesse de 375 tours par minute et les modèles 24 pôles pour 250 tours. Pour mon projet, j'ai choisi le plus puissant modèle de la gamme RTC, il

s'agit du SR 27111 dont le couple important (30 milli Newton par mètre) entraîne sans effort le plateau au démarrage, malgré sa grande inertie.

Ce moteur, ainsi que tous les moteurs du même genre vibre d'une manière importante au rythme du courant à 50 Hz qui l'alimente. On constate qu'il suffit de le relier mécaniquement à une masse présentant une certaine inertie pour supprimer ces vibrations. Il s'agit d'une masse critique. Le choix du montage du moteur ne peut être déterminé qu'à la suite d'essais et de tatonnements. Dans l'état actuel de ma maquette la masse rapportée au moteur atteint 3 kg et s'avère encore insuffisante.

### La courroie

A propos du choix du moteur, les problèmes relatifs à la courroie n'ont été que partiellement évoqués. Toutes les caractéristiques dimensionnelles de la courroie ont une grande importance

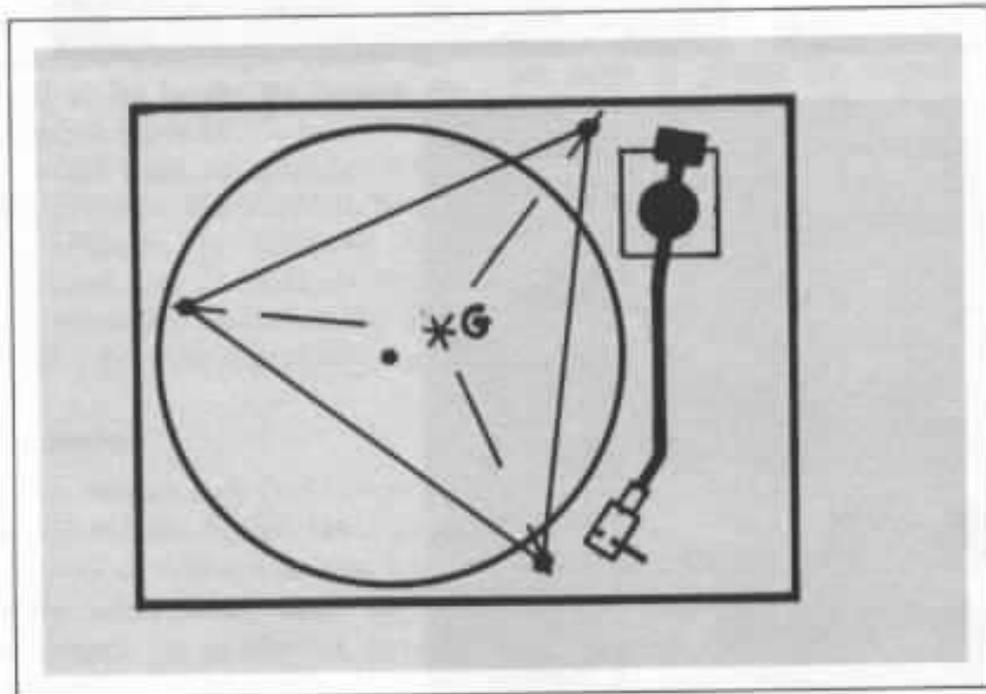


Fig. 13 : Disposition des points de suspension de la contre-platine autour du centre de gravité G

et le choix du matériau utilisé pour la fabriquer découle avant tout de cette considération. Avant d'obtenir des tolérances de largeur et d'épaisseur convenables (de l'ordre de 5 micromètres) les fabricants avec qui j'ai eu l'occasion de travailler ont essayé bien des mélanges de caoutchoucs naturels et d'élastomères de synthèse pour parvenir au compromis le plus satisfaisant. Compromis sans cesse remis en question d'ailleurs par les contrôles qualité mettant en lumière les nombreux aléas de la fabrication des courroies. Je suis donc incapable de livrer ici la recette infallible ; seuls des tests sévères au fluctuomètre permettent de trier les courroies présentant le moins de défauts.

#### **La suspension**

L'ensemble du bras et du plateau doit être mis à l'abri des

vibrations provenant du retour acoustique par le sol ainsi que des bruits résiduels du moteur.

L'interposition des ressorts convenablement amortis est la meilleure solution. La disposition de ces ressorts ne peut être laissée au hasard car il faut conserver la maîtrise de leur comportement vibratoire. En particulier les ressorts devront être identiques et supporter la même charge chacun. Cela conduit à disposer les ressorts à chaque sommet d'un triangle équilatéral dont le centre se confond avec le centre de gravité de l'ensemble suspendu (fig. 13). Plus les dimensions du triangle équilatéral seront grandes, meilleure sera la stabilité.

L'emploi de quatre ressorts ne se justifie pas, bien au contraire, il rend pratiquement impossible l'équilibrage du poids sur chaque

ressort par des moyens simples. Les caractéristiques des ressorts seront déterminées expérimentalement afin d'obtenir une fréquence de résonance basse et très différente de celle du bras de lecture. Une fréquence de 1 ou 2 Hz semble a priori un bon compromis pour le prototype en construction. La fabrication des ressorts est rendue facile par ce choix et leur amortissement par de petits cylindres de caoutchouc mousse donne satisfaction.

Pourtant, je ne considère pas ce montage comme définitif et je procède actuellement à des essais sur une suspension plus performante, composée de ressorts plus souples couplés à des amortisseurs à air. La figure 12 donne une idée des proportions et de la disposition du prototype actuel dont la description fera l'objet d'un prochain article.

**Page non  
disponible**

# Une vue d'ensemble du système de lecture

## 1<sup>e</sup> partie

*John Bicht*

*Traduction Gérard Chrétien*

*La réalisation de John Bicht, ancien ingénieur mécanicien de la compétition automobile, en matière de système de lecture, nous semble du plus grand intérêt. L'approche résolument nouvelle des problèmes et leur mise en évidence par des mesures très originales, méritaient d'être décrites dans les colonnes de l'audiophile. Voici la première partie.*

La définition des performances d'un maillon se limite à la cotation de quelques spécifications. La plupart des mesures traditionnelles ont été poussées quasiment à leur limite, nous laissant avec des matériels qui sonnent encore différemment, sans que l'on sache réellement l'expliquer. Il y a maintenant des critères supplémentaires que l'on doit prendre en compte, si l'on veut faire des jugements précis.

Ces dernières années, l'évolution de certains matériels vers de très hauts standards d'écoute a élargi le champ d'investigation vers de très intéressants phénomènes allant dans le sens d'une évaluation objective et partant de critères subjectifs. Il est cer-

tain que le domaine est vaste et que nous avons de nombreuses voies d'investigation.

Même s'il semble y avoir encore beaucoup de mystères dans l'industrie Hifi, concernant les cellules, bras, platines, de profondes lacunes existent également dans la connaissance du processus de la perception auditive, en particulier son comportement face à des signaux sur lesquels viennent se greffer diverses déformations. Nous sommes persuadés que les distorsions d'ordre mécanique sont beaucoup plus importantes qu'il y paraît, et nous n'en sommes pas encore au seuil inférieur de leur perception.

Il existe plusieurs domaines

spécifiques dans lesquels nous pensons qu'il y a de fortes perturbations dans le son de la musique reproduite. Citons la réponse transitoire, la gamme dynamique et la réponse en basses fréquences. Ces termes sont utilisés car ils se réfèrent à la perception et non à des mesures traditionnelles.

Beaucoup de déboires proviennent de la source, du bras de lecture et de la platine. On pourra objecter que les disques sont bien déficients. Cependant, il est possible d'en extraire beaucoup plus d'informations qu'on ne pourrait le penser. La plupart des problèmes proviennent des vibrations générées par le système de lecture lui-même. Les

déficiences en matière de dynamique, réponse transitoire et réponse en basses fréquences sont liées dans le sens où le système mécanique les affecte. Notre objectif dans cet article est d'apporter quelques éclaircissements sur les problèmes inhérents à la lecture des disques, bras de lecture et platine en particulier, et de démontrer que la majorité des différences subjectives perçues entre produits sont en fait explicables et mesurables.

### Degré de distorsion

Qualifier un type particulier de distorsion est une tâche difficile. Les méthodes de mesure de distorsion sont de plus en plus nombreuses. Toutefois, elles ne sont pas comparables dans la plupart des cas. Notre propos n'est pas d'établir des comparaisons entre les travaux de recherche publiés dans cet article et les mesures plus conventionnelles, bien que nous pensions que ces travaux sont plus révélateurs que les niveaux de rumble, de pleurage et scintillement ou de distorsion harmonique. Il y a beaucoup plus à découvrir sur la façon même dont est affecté le signal par les vibrations parasites. La réduction du niveau de ces vibrations est le critère à satisfaire en priorité. Les figures 1 et 2 donnent les résultats obtenus avec deux systèmes. Le premier est constitué d'un bras et d'une platine caractérisée par des performances excellentes ; la platine est réputée pour ses qualités subjectives et possède un très bon isolement à l'accrochage acoustique. Le second est de notre conception ; la platine n'est qu'un prototype, à l'heure actuelle, et le bras est distribué par Mission, sous la référence 774.

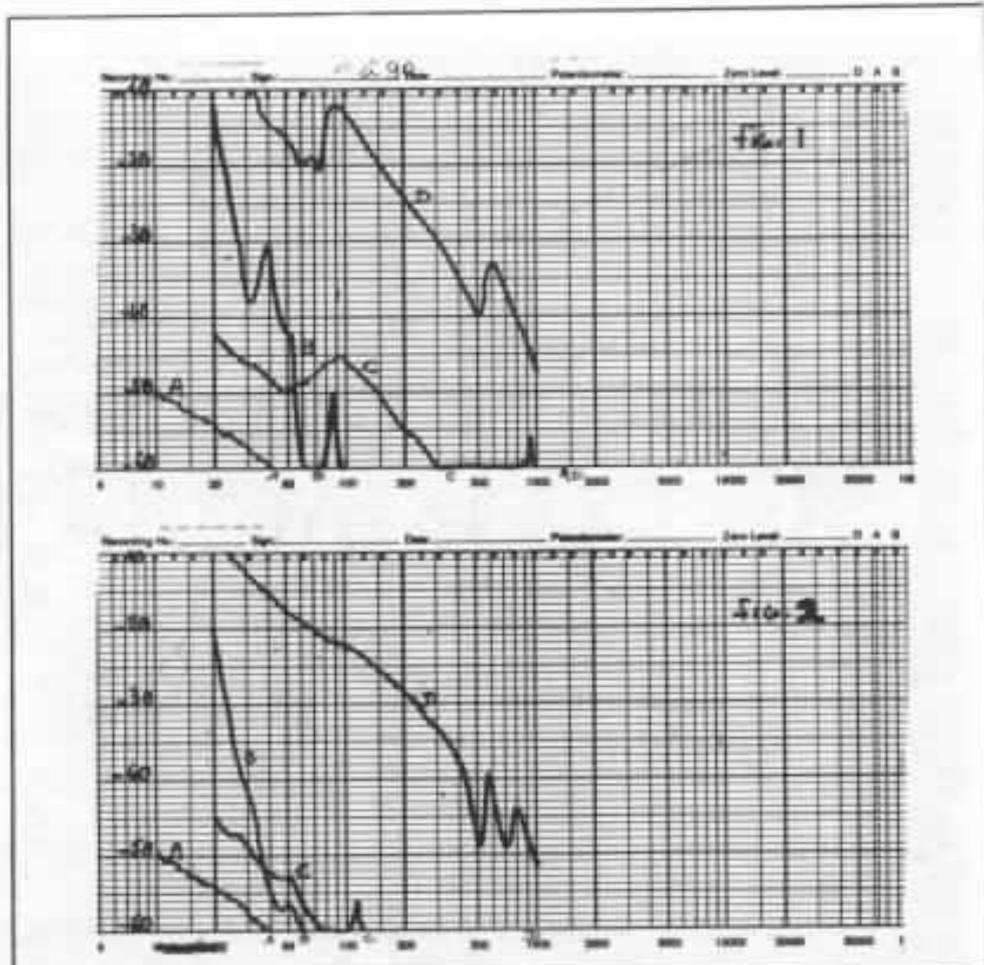


Fig. 1 et 2 : Niveau de vibration recueilli pour deux systèmes, en figures 1. Il s'agit d'un ensemble de haute réputation. La figure 2 concerne notre réalisation.

- A : bruit de surface.
- B : Accrochage acoustique.
- C : Vibration disque + platine.
- D : Vibration bras de lecture.

Le signal d'excitation a un niveau équivalent à une vitesse de 5 cm/sec., après la correction RIAA. Cela correspond au signal maximum à 20 Hz, et à -14 dB du niveau maximum, toléré à 1 kHz selon la norme RIAA. Un niveau de pression acoustique de 100 dB peut être obtenu au niveau de la platine. Ces conditions préalables permettent d'extrapoler d'autres situations.

Les amplitudes indiquées sont des niveaux de vitesse. Elles sont introduites par l'accrochage acoustique relevé par capteur accélérométrique. Comme on peut le voir, l'amplitude obtenue atteint des valeurs très élevées. Il faut noter qu'en utilisation réelle, le signal

se trouve affecté de la sorte, bien que la perturbation varie avec le caractère dynamique spécifique de l'élément qui la génère. Non seulement l'attaque et l'extinction du signal sont altérés, mais également le signal lui-même. Le signal perturbateur contient diverses structures harmoniques avec une phase relative qui varie par rapport au signal principal, mais il excite aussi la cellule selon des directions qui n'ont aucun lien avec la gravure du disque. Ce dernier point, d'ailleurs, constitue un très bon critère de détermination de l'efficacité d'un ensemble bras-platine. La qualité de l'image sonore est très affectée par les vibrations parasites atteignant la cellule. Le début

d'une note musicale est dénaturée par le simple fait que tout oscillateur requiert quelques cycles avant de trouver son régime établi. La partie médiane du signal, elle, est perturbée par l'ajout d'un signal parasite en « vague » relation. Enfin, l'extinction du signal original sera suivie de quelques oscillations dont la réponse est en accord avec la valeur du Q du système. Le résultat de tout cela, en considérant les variations de phase relative du signal parasite par rapport au signal original, est que le signal composite est soit amplifié, soit atténué. Le caractère de l'image sonore est dispersé, l'équilibre tonal est modifié, et de nombreux détails sont masqués.

Examinons plus en détail l'origine de ces vibrations parasites : il y a deux sources principales. La première provient du rayonnement acoustique dans le local d'écoute réintroduit dans le système de lecture. Les résultats sur des systèmes performants, en figure 1 et 2, montrent qu'il ne s'agit en rien de perturbations minimales. La seconde est plus délicate à apprécier et à résoudre ; elle a trait à l'impédance mécanique de la cellule.

Détaillons cet aspect. En-dessous de 1 kHz, cette impédance est contrôlée en large part par la compliance de la suspension de la cellule, ce qui fait qu'elle décroît lorsque la fréquence augmente. L'effet combiné entre la résonance masse du bras-compliance de la cellule d'une part, et de la relativement lente décroissance de la transmission lorsque la fréquence augmente d'autre part, fait que de nombreuses vibrations en opposition de phase sont introduites dans le bras. Le disque est naturellement à l'origine des diverses

forces. Il y a cependant une réaction en phase de la part du disque lui-même. Toutes les résonances apparaissant dans le bras et la platine introduisent des perturbations de phase à la lecture, lesquelles, aussi faibles qu'elles puissent paraître, ne peuvent être ignorées.

## Conception

Nous commencerons par recenser les critères auxquels doit satisfaire le système de lecture. La plage de déplacement de la cellule constitue l'un des facteurs élémentaires. Le stockage de l'information sur le disque occupe une plage de 8 cm environ. Les irrégularités rencontrées imposent une flexibilité de montage de la cellule. La plupart des irrégularités répétitives rencontrées surviennent à des fréquences inférieures à 20 Hz. Au-delà de cette fréquence de 20 Hz, la cellule doit être quasiment solidaire du sillon, de façon à extraire le plus d'informations possible. Pour satisfaire cette seconde condition, il faut relier la cellule et le disque à une impédance infinie, telle une terre. Naturellement, le disque et la cellule seront rattachés à cette impédance par l'intermédiaire d'une structure. Celle-ci se comportera comme un ensemble de masses et de ressorts, dont dépendront les performances du système global.

Aucune des masses en présence ne peut être considérée comme infinie. Aussi, est-il impératif de répartir au mieux les masses et les élasticités pour préserver notre liaison. On pourrait penser qu'un amortissement peut améliorer l'impédance. Cependant, cette dernière n'est pas linéaire en fréquence. L'amortissement ne peut donc

pas être utilisé dans cette optique. Il sera, bien sûr, utilisé, mais pas dans ce but.

Ces quelques investigations préalables nous montrent vite qu'aucune réalisation pratique ne peut satisfaire cet idéal théorique. En fait, on peut séparer le système en deux moitiés, avec une isolation intermédiaire, de façon à compenser la perte de masse par une rigidité très élevée. Aussi, la partie principale, qui supporte l'ensemble du système, peut être très rigide et posséder une masse élevée, agissant ainsi comme une terre « miniature ». Cette partie devient le cœur de notre système. Revenons dans le détail de notre étude en analysant les trois domaines suivants : le bras, la platine et l'isolation.

## Les bras de lecture

La tâche est doublement complexe en basses fréquences. Elle résulte de la combinaison de la correction RIAA et des caractéristiques d'impédance de la cellule. La distribution idéale des masses et des rigidités en est affectée. L'accroissement de la masse fixée sur un élément flexible a pour effet d'abaisser la fréquence de résonance de l'ensemble. Aussi, devons-nous avoir idéalement le minimum de masse allié à une grande rigidité. Cependant, la conception commence par la cellule, et beaucoup d'entre elles ne sont pas fabriquées selon les critères que nous avons mentionnés. Elles sont toutes plus ou moins inadaptées pour canaliser l'énergie à leur support, cela pour des raisons diverses tenant souvent à une certaine tradition.

Nous devons imaginer un ensemble solidaire cellule-bras-platine, plutôt qu'un ensemble

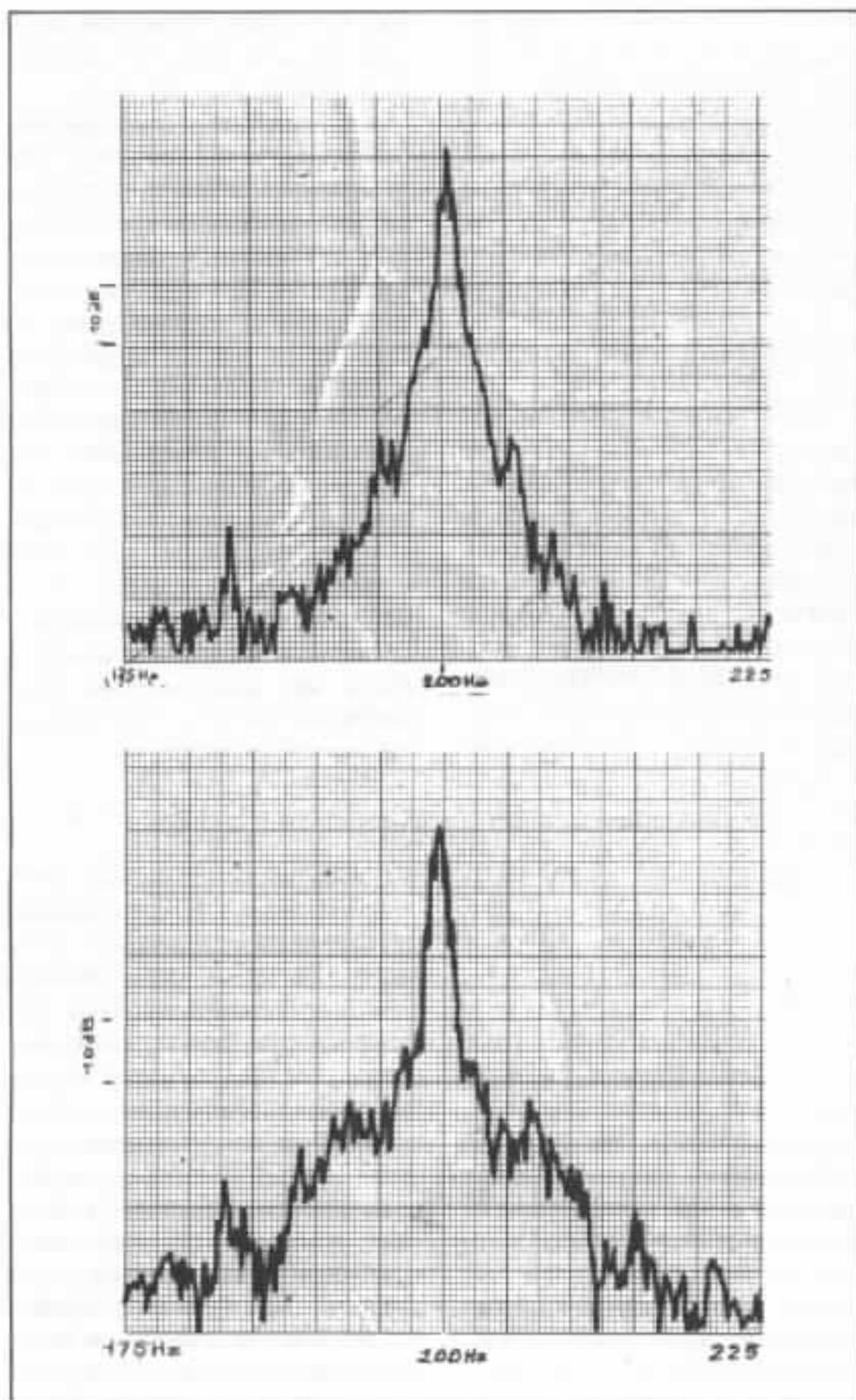


Fig. 3 et 4 : Analyse en bande étroite pour les deux systèmes précédents, réalisée avec disque CBS STR 112. Bande 200 Hz, un seul canal de l'analyseur a été utilisé.

d'éléments séparés et « so-disant » interchangeables, ce qui résoudrait bien des problèmes. Pour l'instant, nous supposons disposer d'une cellule parfaite, n'ayant aucune résonance parasite propre et transférant toute

son énergie mécanique à sa fixation standard de 12,7 mm.

La conception d'un bras passe par l'examen du rapport rigidité/masse des divers matériaux envisageables et de leur forme. Les sections creuses, qu'elles soient

rondes ou carrées offrent d'excellentes caractéristiques, bien que chacune des formes diffère sensiblement. Disons que la section carrée est meilleure en flexion, alors que la section ronde est meilleure en torsion. La section ronde est vraisemblablement la meilleure, car les premiers modes de torsion sont plus difficilement contrôlables que les modes de flexion.

Dans les débats relatifs aux matériaux à utiliser, de nombreuses hérésies ont été rencontrées. Certaines substances sont réputées pour avoir le meilleur rapport résistance/masse, d'autres pour avoir le meilleur amortissement naturel. La résistance est certainement le facteur sur lequel les matériaux diffèrent le plus. Ce n'est pas un point décisif, si ce n'est au niveau de la résistance aux dommages accidentels.

Pour un métal donné, un bras suivant la forme, pourra avoir une résistance différente, bien que le module de Young reste identique. Ce module est caractéristique de la rigidité. C'est une constante pour un métal. Ainsi, un métal recuit aura une résistance maximale, sa structure interne sera immédiatement déformée. En réalité, la plupart des métaux affichent des rapports rigidité/masse très similaires et sont dans notre domaine peu critiques. Quant au choix des structures plastiques renforcées, elles sont quelque peu différentes. Ainsi, la fibre de carbone renforcée par un plastique moulé n'atteint pas le rapport rigidité/masse des métaux. Elle est, par ailleurs, limitée en longueur et en quantité de fibres. Son prix est toutefois inférieur à celui des éléments métalliques. Les tubes en fibres de carbone laminées sont supérieurs, mais ils

requièrent des techniques d'usinage délicates et coûteuses pour parvenir aux qualités du métal. Ainsi, avec des fibres de haut module de Young laminées, sous forte pression à 25° C, dans l'axe du tube, on parvient à gagner 10 % en performance de rigidité. Le coût est accru dans une bien plus forte proportion, et le premier mode de vibration n'est relevé que de 20 Hz environ. Les écarts peuvent être considérables pour ce qui est de l'amortissement, suivant les alliages.

La fixation bras-cellule la plus légère et la plus rigide est celle constituée par un petit bloc métallique massif, lequel doit entourer le tube pour un couplage optimal. La surface de fixation à la cellule doit être suffisamment grande pour les mêmes raisons. Toutefois, la coquille ne doit pas être trop grosse pour ne pas trop accroître la masse effective. Cela va à l'inverse de certaines idées selon lesquelles la masse doit être concentrée au niveau de la coquille, ce qui se traduit par une impédance élevée qui, en théorie, réduit les phénomènes de transmission dans le tube.

En effet, l'impédance est, en fait, relative à la masse effective de l'ensemble d'une part et d'autre part, une masse élevée placée à l'extrémité d'un tube léger abaissera notablement la fréquence du premier mode de vibration du tube. Au niveau du bras, le niveau de vibration peut être réduit par l'accroissement de la masse effective, mais il y a des limitations en raison de la fréquence de résonance, laquelle ne doit pas être trop basse. Les signaux parasites indésirables tels que voiles de disques, vibrations de la suspension de la platine, rumble, sont concentrés dans le bas du spectre, en-

dessous de 20 Hz, le maximum se situant à 3 Hz. L'excitation de l'ensemble bras-cellule sera d'autant plus forte que la fréquence de résonance se rapprochera de cette valeur. Les oscillations du bras causent un pleurage par modulation de fréquence, qui, combinée à la modulation d'amplitude, génère des bandes latérales, telles qu'on peut les observer sur les figures 3 et 4. Les résultats obtenus avec notre réalisation sont indiqués en figure 3, le signal d'excitation est une fréquence sinusoïdale de 200 Hz. A titre indicatif, la figure 4 donne les résultats obtenus avec un ensemble platine-bras-cellule japonais de prix très élevé. Bien que les performances en matière de pleurage et scintillement, de rumble soient exceptionnels, de nombreux autres problèmes se combinent pour dénaturer la clarté du message. L'une des raisons, et non des moindres, est d'utiliser un bras très lourd avec une cellule trop souple. Les résidus latéraux sont une illustration des modulations tant en amplitude qu'en fréquence, causée par des phénomènes de très basse fréquence. La fréquence de résonance de l'ensemble n'est qu'un compromis ; il n'y a pas de solution universelle, car le problème requiert l'examen des cas particuliers.

Le bras tangentiel, quant à lui, pose des problèmes de construction en matière de frottements. Il serait trop long dans ces pages de discuter ce cas. Nous pensons que le gain que l'on peut obtenir avec ce type de bras, en tracking latéral, en particulier, n'est pas décisif si l'on considère les pertes en matière d'intégrité de structure.

Les frottements sur les bras pivotants posent dans bien des

cas, les mêmes problèmes. Avant d'examiner les solutions possibles, voyons les sources de perturbations : les roulements à billes ont un jeu inhérent à leur nature, les billes devant avoir un débattement fonctionnel dans leur support. Les précisions en matière de fabrication étant ce qu'elles sont, il est impossible de s'affranchir complètement de ce jeu. A 1 kHz, - 40 dB correspond à 0,08  $\mu\text{m}$ , alors qu'une sélection sévère ne donne guère qu'un jeu meilleur que 2,3  $\mu\text{m}$ .

Les articulations montées sur rubis présentent, quant à elles, des problèmes sensiblement différents, car les éléments ne sont pas mobiles. Pour avoir une bonne rigidité, la pression requise ne permet pas d'obtenir des frictions suffisamment faibles. La rigidité d'une articulation est directement liée à la surface réelle de contact et à la force d'application.

Le cas de l'unipivot est un autre cas intéressant. Si le comportement vertical est satisfaisant, il n'en va pas toujours de même en latéral. La rigidité de torsion est limitée par l'aspect pendulaire et aucun amortissement visqueux ne peut l'améliorer (car les mouvements erratiques n'ont pas un caractère transitoire marqué). C'est certainement la raison pour laquelle ces bras sonnent plutôt « doux », le diamant dans son comportement est très faiblement maintenu dans le sillon.

Il n'y a qu'une solution pour résoudre le problème. Dans le cas de l'utilisation de roulements à billes, il faut les charger de sorte à limiter tout débattement entre la bague interne et bague externe du roulement. Une méthode consiste à appliquer un couple élastique sur la partie intérieure pour compenser le jeu,

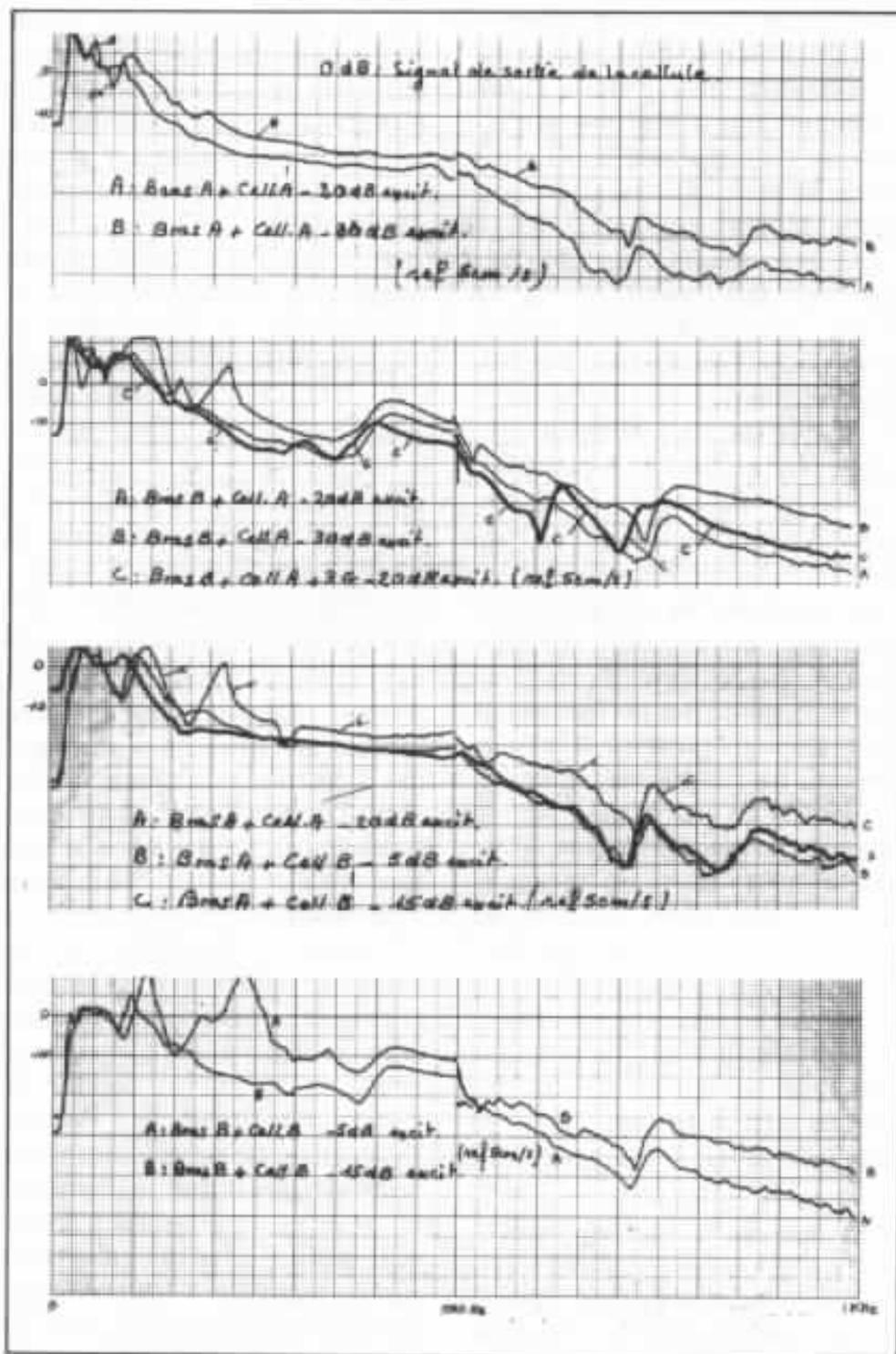


Fig. 5, 6, 7 et 8 : Pour ces quatre cas le bras était monté sur un support de masse élevé, isolé de sorte à réduire tous les risques de conduction solide par le support.

L'accéléromètre était placé sur la coquille entre les deux vis de fixation de la cellule.

Le diamant était soumis à un balayage lent en fréquence sinusoïdal par l'intermédiaire de l'excitateur. La cellule et l'accéléromètre étaient reliés respectivement aux canaux 1 et 2 de l'analyseur. En utilisant les possibilités de fonction de transfert, la sortie de l'accéléromètre (convertie en vitesse pour attaquer le préamplificateur était référencée au signal de sortie. Le résultat obtenu concerne les niveaux maximum relevés.

Le niveau du signal reste relativement constant alors qu'il devrait croître avec la fréquence.

Les résultats entre la cellule A et la cellule B ne sont pas directement comparables, les niveaux n'étant pas les mêmes. Les résultats avec la cellule B doivent être considérés meilleurs qu'ils ne sont en comparaison avec la cellule A.

sans perturber le mouvement général de l'ensemble. Lorsque les forces extérieures deviennent prépondérantes, tout le système de roulement avec sa compensation de jeu se met en mouvement. Ce type de compensation fait l'objet de nombreux brevets et il est utilisé dans de nombreux domaines.

Le contrepoids est un élément qui a une influence sur le comportement dynamique du bras. Il constitue une masse additionnelle que le tube du bras doit mettre en mouvement. Il apporte une inertie. Si le contrepoids est découplé, on peut réduire le Q du premier mode de flexion du bras de près de 30 dB. Même en haute fréquence, l'influence de ce découplage peut être bénéfique. Toutefois, celui-ci doit être suffisamment élastique, de façon à ne pas perturber le fonctionnement de l'ensemble à sa propre fréquence de résonance, qui doit être très basse. Très souvent, le contrepoids a une résonance placée trop haut ou un amortissement très insuffisant. Dans notre réalisation, nous avons eu recours à un polymère à haute élasticité.

L'amortissement du bras est un point essentiel. Certaines personnes pensent que la suspension de la cellule contrôle les mouvements du bras. En fait, il y a de nombreuses limitations.

L'amortisseur procuré par la cellule est faible, il est censé contrôler les mouvements de l'équipage mobile. De là à envisager son efficacité sur des masses de près de 1 000 fois supérieures à de très faibles fréquences, c'est une autre affaire. Au niveau de la cellule, si l'amortissement est accru, la réponse transitoire et les qualités de lisibilité dans le médium en souffrent. S'il est trop atténué, la lisibilité dans

l'aigu sera déplorable et les sollicitations au niveau du bras très marquées. En fait, si le bras est convenablement amorti, ainsi que l'équipage mobile, une légère réduction de l'amortissement peut être avantageuse. Néanmoins, il ne faut pas tomber dans l'excès inverse, comme certains qui avancent que l'amortissement dégrade les qualités subjectives d'un système de lecture. Pour notre part, nous sommes persuadés qu'un amortissement bien pensé améliore dans de fortes proportions la lecture.

Les figures 5, 6, 7 et 8 sont les résultats de mesures obtenues avec deux bras et deux cellules. Le bras A est notre réalisation, le bras B est une fabrication américaine. Les deux cellules sont de type à bobines mobiles. La cellule A a cependant une compliance relativement élevée et ne nécessite pas de transformateur ou de préamplificateur. Le signal est recueilli par un capteur placé entre les points de fixation de la cellule. Les résultats en dessous de 10 Hz ne doivent pas être pris en compte à cause des limitations de l'excitateur. En outre, les vibrations introduites par le bras se superposent, la courbe est une résultante. Le canal gauche est excité dans la bande 0-100 Hz, le canal droit dans la bande 100-1000 Hz. L'échelle en fréquence est linéaire. Les résultats sont riches d'enseignements. En particulier, on notera que les cellules ont une suspension qui n'est en rien linéaire et on remarque que le niveau de vibration recueilli augmente lorsque le niveau d'excitation diminue.

La fig. 9 donne le niveau relatif du signal de vibrations par rapport au signal de sortie en fonction du signal d'excitation (ref. 5cm/s) pour deux fréquences. L'emploi d'un

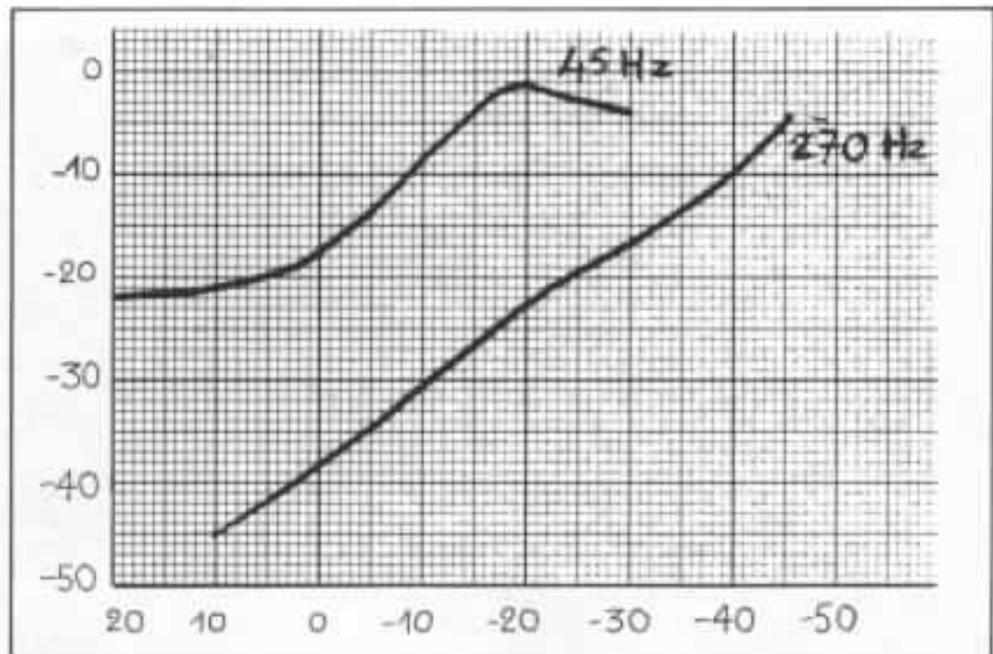


Fig. 9 : Niveau de vibration relatif au niveau de sortie en fonction du signal d'excitation pour deux fréquences.

excitateur à bobine mobile plutôt qu'un disque nous permettait de faire varier les niveaux d'excitation. Les résultats confirment que la suspension se comporte comme un ressort dont l'élasticité diminue quand l'amplitude augmente. Cet effet a déjà été mis en évidence par d'autres, en remarquant que la fréquence de résonance de l'ensemble bras-cellule varie avec le niveau d'excitation. Les bosses observées pour les faibles niveaux d'excitation, vraisemblablement dus à des résonances bras-cellule, sont particulièrement révélatrices des effets de transmission des vibrations sur les signaux de faible niveau.

La comparaison des performances des deux différents bras est assez éloquent. Le bras B possède un tube et une coquille moins rigides, des articulations par roulements à billes compensés par ressort, et un contrepoids légèrement découplé. Le niveau de vibration relevé avec ce bras se révèle supérieur à celui délivré par le bras A. Les perturbations les plus marquées se manifestent surtout dans le bas du spectre.

Subjectivement, le bras B paraît plus chaud et plus doux et gomme des détails.

La variation observée suivant la cellule employée est particulièrement intéressante. Elle montre qu'il n'y a pas de relation simple entre ces résultats et la compliance de la cellule. A priori, les phénomènes devraient être liés. Pourtant, la répartition des masses, l'amortissement, entre autre, font de chaque cas un cas particulier.

L'effet d'un accroissement de masse est mis en évidence en figure 6, où une masse additive de 3 g a été utilisée sur l'ensemble bras A - cellule B. La réponse est améliorée en basse fréquence comme on l'escomptait.

Les résonances inférieures ont naturellement une fréquence plus basse. Elles sont sensiblement accentuées.

Bien évidemment, si cette masse avait été répartie sur tout le tube, les résultats auraient été encore meilleurs.

Nous aborderons dans le prochain numéro les problèmes propres à la platine.

**Page non  
disponible**

# Deux conceptions des phonolecteurs

Gérard Chrétien

*Ces mois derniers nous avons eus la chance de rencontrer deux grands spécialistes, des phonolecteurs. Monsieur Konagaya, directeur technique de la firme Nagaoka et Monsieur Tominari, directeur de Dynavector, connu désormais de nos lecteurs.*

*Les divergences semblent nombreuses a priori. L'un est partisan du principe à noyau induit, l'autre est fervent de la bobine mobile. L'une des firmes est industrielle, l'autre est presque artisanale. Pourtant si la démarche peu sembler différente, en réalité chacun s'attache à résoudre les mêmes problèmes. C'est pour cela que nous avons tenu à regrouper ces deux entretiens.*

## Les conceptions de M. Konagaya

Le fonctionnement des firmes haute-fidélité n'est pas facile à appréhender, car il comporte tellement de ramifications. L'électronique est certainement le domaine le moins ambigu ce sujet. Par contre la fabrication des cellules phonoelectriques requiert des compétences spécifiques et diversifiées : taille des diamants micromécanique et microélectronique. Aussi dans la réalité peu nombreuses sont les firmes qui font tout et beaucoup sans traiter... le diamant, le

porte-pointe, l'équipage mobile ou même la cellule entière.

Nagaoka est l'un des plus gros sous traitant japonais avec un quasi monopole sur les diamants. (80 % des diamants de remplacement).

L'écoute, très appréciée de la Nagaoka HP 50, nous a donnée envie d'en savoir plus sur cette firme, et les techniques utilisées pour parvenir à ces résultats.

## La philosophie adoptée

M. Konagaya la définit comme

suit : « Extraire le maximum d'informations du sillon ». Remarque simpliste a priori, mais qui s'avère plus subtile qu'il n'y paraît au premier abord.

L'équilibre tonal et les qualités subjectives sont essentiels dans le choix d'un phonocapteur. Cependant, les comparaisons effectuées entre diverses cellules montrent qu'avec certains modèles, au demeurant très agréables, des informations sont littéralement gommées, éliminées. A ce niveau-là, il ne s'agit plus de quelques pourcents de distor-

sion, de déformation du signal, mais tout simplement de son élimination. Il ne faut pas non plus tomber dans le paradoxe inverse, qui consisterait à « hyper détailler » le haut de spectre par son accentuation en régime dynamique, par exemple. Cette dernière ne se manifeste pas sur la courbe de réponse statique, car les propriétés d'amortissement ne sont pas mises en évidence. Pour répondre à ce critère, M. Konagaya part du principe qu'il est nécessaire d'avoir recours à une masse de cellules élevée.

### Une masse de cellules élevée

Cette idée peut sembler à contre courant des tendances nouvelles qui veulent que l'inertie soit aussi faible que possible, de sorte à avoir un système mécanique bras-cellule, dont la fréquence de résonance se situe suffisamment haut, 10 Hz environ, pour s'affranchir des risques d'excitation provoquée par les voiles de disque, le larsen... Il ne faut pourtant pas oublier que la résonance du système bras-cellule n'est pas le simple fait de la masse, la compliance intervient pour la même part :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{mc}}$$

K : est la raideur,  $C = 1/K$  la compliance. A titre d'exemple, une cellule Nagaoka MP 50 pèse 9g, montée sur un bras de masse effective de 6g, compte tenu de la compliance dynamique de  $12 \times 10^6$  cm/dyne ( $24 \times 10^6$  cm/dyne en statique). La fréquence de résonance obtenue est de :

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{15 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^6}}$$

soit  $f = 12$  Hz, ce qui est tout à fait acceptable. On peut même

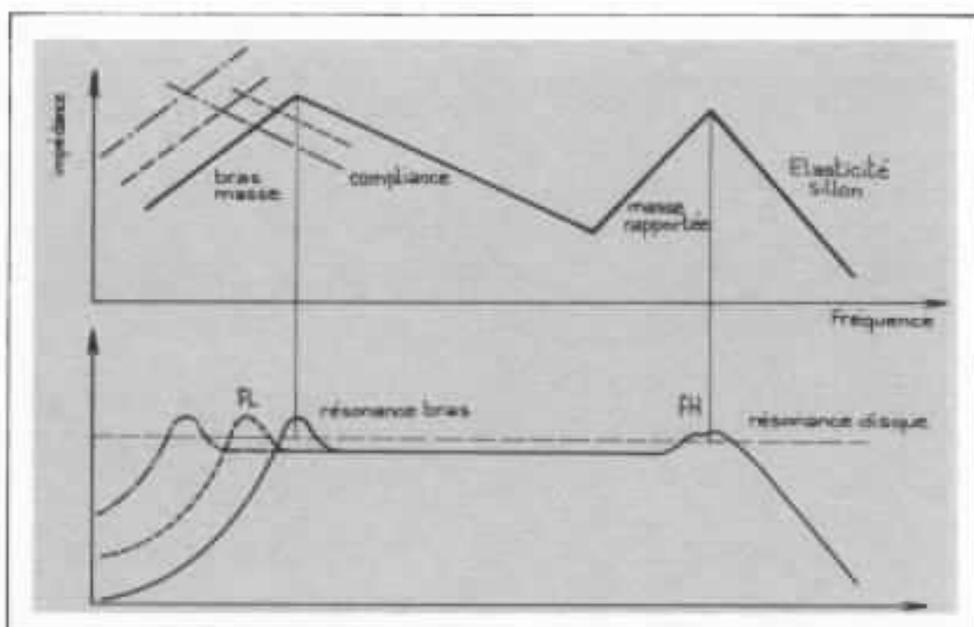


Fig. 1 : Evolution de l'impédance et de la courbe de réponse dans le bas du spectre en fonction de la masse effective du bras et de la compliance de l'équipage mobile.

envisager une masse effective de bras de 12g, ce qui conduit à une résonance, de fréquence de 10 Hz. On a trop tendance à considérer la cellule dans ces calculs, comme une masse inerte. Il n'en est rien ; la cellule est un transducteur, un capteur de vibrations. L'équipage mobile oscille par rapport au châssis de la cellule, qui constitue le bâti, la référence. Le problème est le même qu'avec un haut-parleur. La partie mobile, membrane

plus bobine, pèse quelques grammes, alors que l'enceinte pèse plusieurs dizaines de kg. A ce niveau, il est reconnu que le rapport de masses a une grande importance sur la qualité de restitution, dans le grave principalement. En fait, il s'agit d'une application directe du principe fondamental de la dynamique :

$$F = m \gamma$$

L'accélération prise par le châssis de l'enceinte doit être quasiment nulle, ce qui conduit à une masse élevée.

C'est la position prise par Nagaoka. La cellule MP 50 pèse 9g. Il est clair que ce choix impose des contraintes quant à la valeur de la compliance, qui doit être choisie relativement élevée.  $25 \cdot 10^6$  cm/dyne ( $25 \cdot 10^6$  cm/N) en statique. Rappelons que c'est cette valeur qui est mentionnée habituellement dans les notices de constructeurs.

La démarche est donc inverse de celle qui consiste à adapter la masse aux caractéristiques de souplesse de l'équipage mobile, ce qui est somme toute plus simple, car la partie mobile est celle



M. Konagaya

qui pose le plus de problèmes à la conception.

Il faut remarquer que l'approche théorique fait appel aux analogies électriques, l'analogie de Maxwell en l'occurrence faisant correspondre une force à une tension. L'application de cette méthode nécessite un véritable sens physique pour son utilisateur, car l'analogie électrique du bâti fixe mécanique n'a pas de signification, de même que l'analogie mécanique du potentiel nul n'existe pas. Il est impératif d'avoir une vision globale de l'ensemble bras-cellule, afin d'éviter de graves erreurs d'interprétation.

### Vibrations parasites

La transcription de la quantité maximale d'informations en provenance du sillon, impose un corps de cellule aussi inerte que possible. On conçoit aisément que la cellule est soumise à de très nombreuses excitations provoquées par l'équipage mobile en mouvement, mais aussi par la pression acoustique créée par les enceintes (effet de larsen), ainsi que par le bras qui, lui aussi, réagit à toutes ces stimulations. Les amplitudes mises en jeu peuvent paraître infimes, mais il ne faut pas perdre de vue que les micro-informations à extraire du sillon sont de l'ordre du  $\mu\text{m}$ . Toute résonance du corps de la cellule engendre inévitablement des colorations qui perturbent le message sonore.

L'importance de ce critère peut-être facilement mise en évidence. Il suffit pour cela d'enduire d'une résine très rigide le boîtier d'une cellule insuffisamment inerte. Le gain obtenu en clarté dans la restitution de masse orchestrale en particulier, peut être considérable.

Naturellement, le choix des matériaux est lié à la masse de la cellule. Nagaoka utilise pour cela des plastiques mélangés à de la fibre de verre et sur les modèles MP 30 et MP 50, le cadre de la coquille est réalisé en aluminium moulé par impact. La rigidité ainsi obtenue est d'environ 8 fois supérieure à celle des résines ABS utilisées habituellement. Le choix est rendu possible par le fait que la masse de la cellule est élevée. Une large semelle, en aluminium également, garantit un couplage mécanique excellent

tance. Les courbes de réponse conventionnelles, idéalement plates, peuvent être obtenues par un amortissement exagéré qui limite d'autant le comportement dynamique. Le système est «hyper» amorti, et il est «mou». Le rendu transitoire est déplorable et de nombreuses informations sont gommées.

La courbe d'impédance schématisée d'un phonolecteur se décompose de la façon suivante (cf figure) :

L1 : masse de l'ensemble bras-cellule.

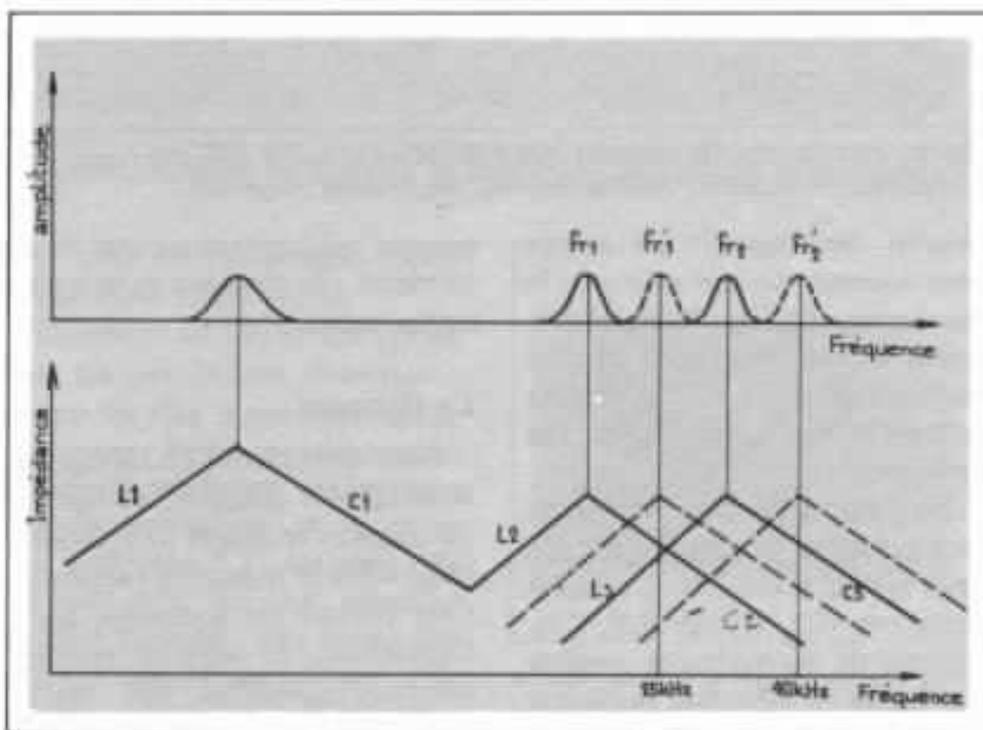


Fig. 2 : Les diverses fréquences de résonance dans le haut du spectre et leur évolution en fonction des paramètres de l'équipage mobile.

avec la coquille (sur les modèles MP 30 et MP 50).

### Impédance mécanique

C'est certainement la grandeur la plus significative du comportement effectif de l'équipage mobile. L'impédance mécanique fait intervenir les masses en mouvement analogues à des selfs, les rigidités ou compliances analogues à des capacités et l'amortissement analogue à une résis-

C1 : compliane dynamique de la cellule.

L2 : masse de l'équipage mobile.

C2 : compliane du stylet porte-pointe

L3 : masse rapportée à la pointe.

C3 : compliane du sillon.

Le comportement dans le bas du spectre a été abordé précédemment. Nous ne reviendrons pas dessus. Par contre, dans le haut du spectre, l'influence de

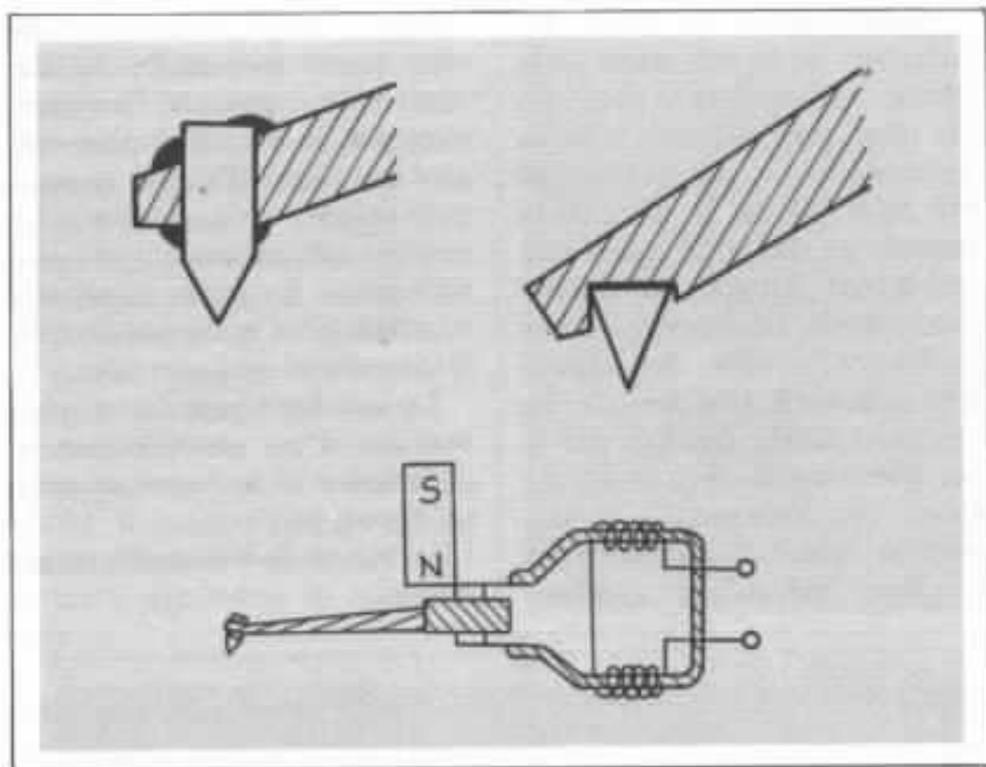


Fig. 3 : La réduction du diamant aide à diminuer la masse effective rapportée à la pointe. Principe de fonctionnement des cellules Nagaoka.

chacun des facteurs est moins bien connue, car elle relève de la fabrication de la cellule. L'utilisateur ne peut, en aucun cas, les modifier ou les adapter comme cela est le cas dans l'association bras-cellule.

En examinant le système de plus près, on remarque qu'il y a deux systèmes oscillants, couplés entre eux (L2, C2) et (L3, C3). Chacun de ces systèmes possède son mode de vibration propre et sa résonance. Le premier maximum est le résultat de l'interaction de la masse de l'équipage mobile et de la souplesse du porte-stylet. Le second est représentatif de l'interaction sillon-pointe, entre la masse rapportée à la pointe L3 et la souplesse du sillon C3. Il convient de reporter aussi loin que possible, vers les fréquences hautes, ces deux résonances. Pour cela, les masses qui sont l'analogie de selfs doivent être diminuées dans la mesure du possible, ainsi que les compliances, analogues à des capacités.

Quels sont les remèdes ? Ils

portent principalement sur deux éléments : le diamant et le levier porte-pointe.

### Le diamant

Pour des raisons de facilité de montage, le diamant comporte un corps cylindrique de fixation, taillé dans la masse ou rapporté. Cela permet un sertissage aisé. Cependant, ce volume supplémentaire constitue une masse importante pour l'inertie qu'elle

rapporte à l'équipage mobile. Dans ce sens, il est essentiel de limiter la pointe à son volume fonctionnel, c'est-à-dire sa partie usinée. L'attache requiert, dans ce cas, une technique plus délicate.

### Le levier porte-pointe

C'est un élément qui fait couler beaucoup d'encre. Il est vrai qu'il a la lourde responsabilité de transmettre, avec le minimum de déformations et donc de vibrations parasites, les oscillations communiquées au diamant par le sillon. La plupart des matériaux ont été essayés. Le tableau ci-joint indique les propriétés physiques essentielles des métaux couramment utilisés.

Pour faciliter la compréhension, indiquons que la rigidité est directement proportionnelle au module Young, et, inversement proportionnelle à la densité. Le module de Young caractérise les propriétés de transmission de vibrations dans le métal. Il doit donc être aussi élevé que possible.

Du tableau, il ressort que le bore est le matériau le plus performant. Il égale le beryllium en rigidité, mais le dépasse largement en module de Young.

Material	Boron	Beryllium	Aluminum	Titanium	Iron
Atomic Number	5	4	13	22	26
Atomic Weight	10.811	9.013	26.98	47.90	55.85
Melting Point (°C)	2300	1285	660	1660	1530
Boiling point (°C)	2550	2970	2450	3260	3000
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.3	1.84	2.69	4.54	7.86
Coefficient of Heat of Expansion (10 <sup>-6</sup> )	8.3	11.6	23.6	8.41	11.7
Specific Heat (cal/g°C)	0.247	0.425	0.22	0.12	0.11

Fig. 4 : Propriétés physiques des matériaux pouvant servir à la réalisation du stylet.

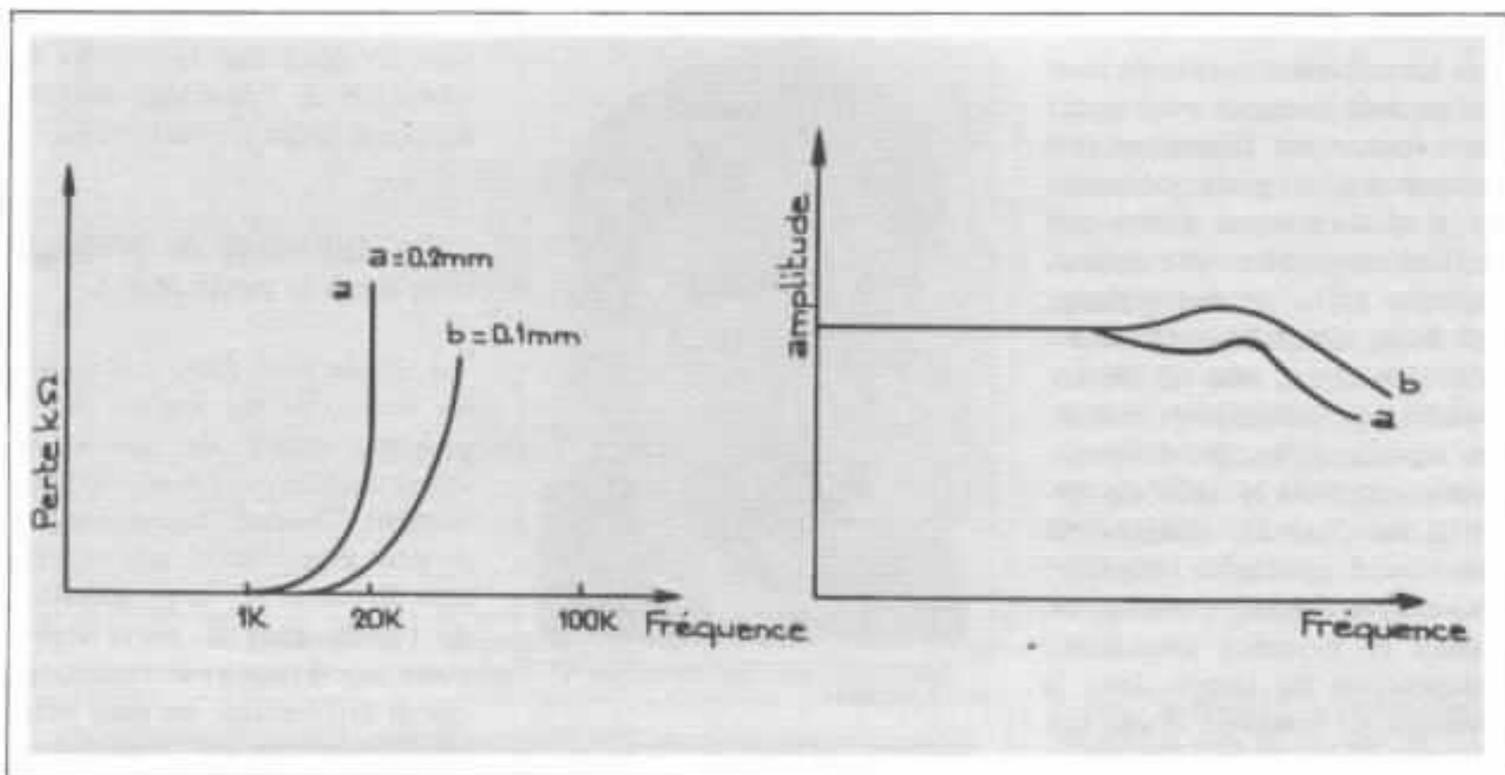


Fig. 5 : Perte des circuits magnétiques en haute fréquence en fonction de l'épaisseur des couches de Permalloy.

L'augmentation de la rigidité alliée à la diminution de masse, permet les résonances hautes à des valeurs de, respectivement, 25 kHz et 40 kHz. Pour cette dernière, l'emploi d'une taille à contact en ligne a pour effet de diminuer la compliance de l'interface diamant-sillon, la déformation étant limitée.

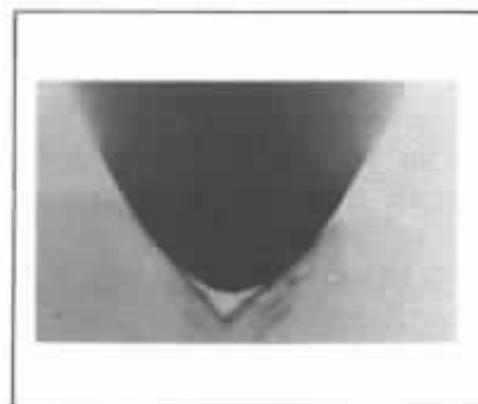
### Le circuit magnétique

Le schéma employé est classi-

que, mais les composants particulièrement sélectionnés.

L'aimant au samarium cobalt sans de très faibles dimensions assure un flux magnétique puissant. Les pièces polaires ; qui canalisent le champ magnétique sont en permalloy, la structure est pannisée, 3 couches de 0,1 mm pour les deux modèles les plus élaborés. Les pertes des circuits magnétique en haute fréquence sont liées à l'épaisseur des couches. Comme le montre le graphe. Les pièces polaires sont noyées dans un plastique mélangé à de la fibre de carbone. Cela dans le but de rejeter toutes résonances parasites, source de masque et de confusion dans le message sonore.

Voici donc les grands lignes exposées par M. Konagaya. On remarquera qu'il n'y a pas de solution miracle, les matériaux sont soigneusement choisis et la fabrication est exemplaire. Et puis le plus caractéristique est cet acharnement à combattre les vibrations parasites. C'est sans



aucun doute le grand point fort de ces cellules.

A ce sujet nous sommes persuadés que les problèmes « parasites » tels que les résonances de bras, de platine de transducteur constitue une des limitations des systèmes actuels. Henning Moller dans sa remarquable publications à l'AES, « multidimensionnel audio » considérait ces perturbations comme l'une des trois ou quatre causes majeures de dénaturation du message sonore.

Dénaturations d'autant plus permicieuse qu'elles se superposent au signal à des niveaux moindres et se trouvent ainsi camouflées ».



## Les idées de M. Tominari

Si les cellules actuelles de haut niveau sont conçues pour avoir une réponse en fréquence très étendue et aussi plate que possible, il n'en reste pas moins vrai que leur caractère sonore diffère. Chacune offre un son typique. Nul ne le niera. Pour le théoricien cependant, cela est dérangeant. Une réponse plate et étendue signifie qu'aucune déformation n'entachera le signal de sortie. Il ne s'agit là, malgré tout que d'une approche simpliste. Une analyse théorique plus poussée met en évidence un facteur indépendant du temps dans la fonction de transfert d'une cellule à aimant mobile comparée à la fonction de transfert d'une cellule à bobine mobile. Néanmoins il semble très surprenant d'avancer que les bobines mobiles typiques ont des qualités sonores conventionnelles bien qu'au vu des caractéristiques. Aucun critère ne les différencie radicalement. En fait la conception des cellules fait appel à la



M. Tominari

méthode analogique, mécanico-électrique basée sur la physique des vibrations élémentaires. Chaque élément mécanique est représenté par un réseau de capacité d'inductance et de résistance.

Ainsi l'analyse de la réponse en fréquence devient aisée, c'est une analyse d'électronique et non de mécanique. Par ailleurs

la méthode matricielle renseigne plus en détail sur les modes de vibration de l'équipage mobile; du poste stylet en particulier.

## La dispersion de propagation dans le porte stylet.

L'étude peut donc être détaillée mais elle est limitée par le principe même du calcul, de l'approximation, au régime permanent. Aucun renseignement ne peut être obtenu par ce principe de calcul sur la propagation de l'onde dans le porte stylet. Pour cela il faut avoir recours au calcul différentiel, on peut obtenir l'équation de propagation dans laquelle le temps intervient.

$$\frac{EI}{m} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \rho \frac{EI}{m} \left( \frac{1}{E} + \frac{\gamma}{G} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \dots + \frac{\rho^2 \gamma}{mG} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \dots \text{III}$$

- E : Module d'Young
- I : Moment d'ordre 2 par élément de surface
- G : Module de cisaillement
- m : Masse par unité de longueur du stylet
- f : Densité du matériau constitutif du stylet
- x : Distance totale du stylet
- y : déplacement en flexion du stylet
- r : Constante
- t : Temps.

On peut en déduire l'expression de la vitesse C de propagation d'une onde sinusoïdale, sous la forme d'un développement en série.

$$C_B = \alpha \sqrt{2\pi f} \left[ 1 - \frac{1}{4} \beta \frac{2\pi f}{\alpha^2} + \dots + \frac{1}{4} \delta (2\pi f)^2 + \dots \right] \dots \text{II}$$

$$\alpha^4 = \frac{EI}{m} \quad \beta = \rho \alpha^4 \left( \frac{1}{E} + \frac{\gamma}{G} \right)$$

$$\delta = \frac{\rho^2 \gamma \alpha^4}{EG}$$

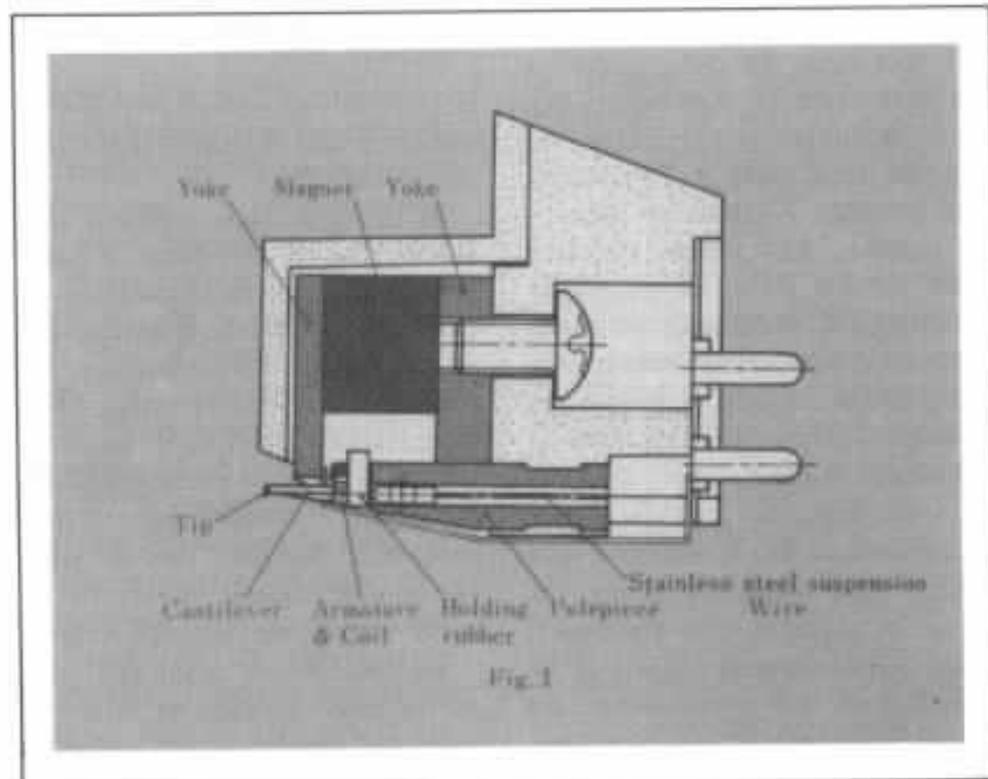


Fig. 1 : Coupe d'une cellule DV Karat.

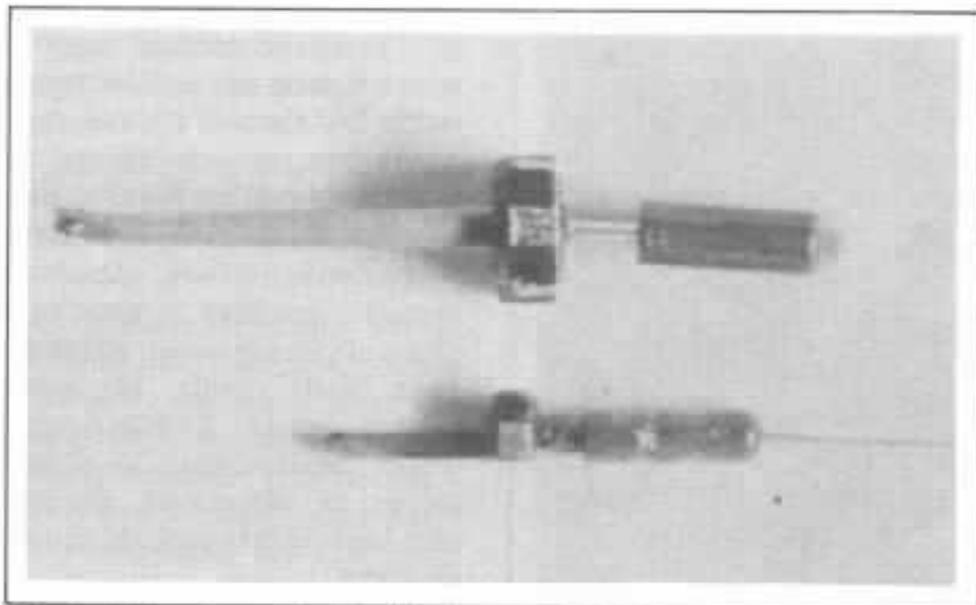


Fig. 2 : Ordre de grandeur de l'équipage mobile des nouvelles cellules Dyna-vector avec un équipage conventionnel. La réduction est très importante.

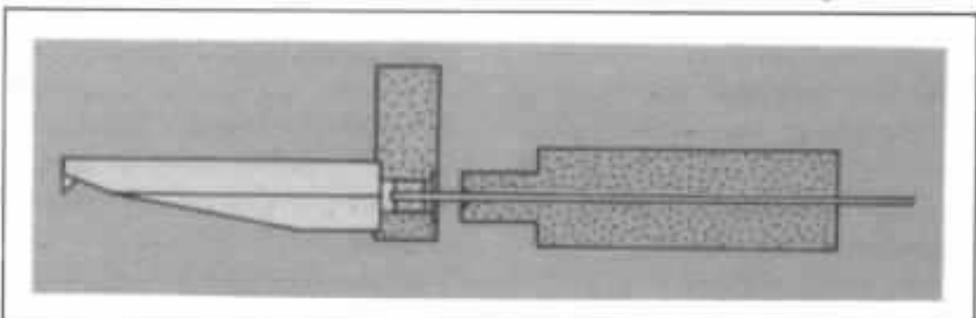


Fig. 3 : Coupe de l'équipage mobile montrant la forme particulière du levier porte-pointe.

C'est naturellement la solution la plus exacte, où les effets de rotation et de cisaillement, dans la flexion du porte stylet, sont exprimés. Sans pousser les investigations aussi loin on peut obtenir une bonne approximation de cette vitesse de propagation :

$$C_B = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{EI}{m}} \dots \dots \dots (3)$$

Il ressort immédiatement que cette vitesse n'est pas constante, elle est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Si l'on considère qu'un signal impulsionnel peut être décomposé en une série de sinusoïdes de différente fréquence. (c'est la décomposition de Fourier qui n'est applicable qu'aux systèmes linéaires répétons-le). Chacune des ondes se propagera dans le porte stylet avec une vitesse de

propagation particulière, liée à sa fréquence. Il se créera une dispersion dans le temps et le signal d'excitation impulsionnelle sera détérioré en extrémité du porte stylet. Seul un signal purement sinusoïdal ne sera pas affecté par la propagation.

Malheureusement le message musical quel qu'il soit n'a que très peu, voire aucun lien de parenté avec une sinusoïde. Il y a donc une dispersion, une différence de temps de propagation entre les diverses harmoniques. Le message sonore sera donc déformé. Cette déformation est inhérente au principe même de lecture du disque utilisant un effet de levier et qui impose un couple de torsion à l'équipage mobile.

Dans la majorité des cas, seul le rapport  $E/\rho$  est considéré dans

le choix et la conception des phonocapteurs. Celui-ci n'a trait qu'à la vitesse de propagation longitudinale dans le milieu. Cette vitesse n'a malheureusement rien à voir avec les phénomènes de vibration du levier porte-pointe; car il vibre en flexion dans une direction transversale et non longitudinale. Les équations (2) ou (3) révèlent que la vitesse de propagation peut-être améliorée en augmentant la module de Young E, caractéristique de la rigidité, d'une part et d'autre part en réduisant le rapport  $m/l$ .

Cette dernière considération implique que la forme du porte pointe est un facteur important. Le cas idéal étant constitué par un tube de grand diamètre, au parois très fin dans un matériel très dur et très rigide.

Aussi même si l'on a recours à un stylet d'un diamètre inférieur dans un matériau très léger, de sorte a diminué la masse effective pour accroître la fréquence de résonance de l'équipage mobile; la vitesse de propagation n'est pas améliorée dans une aussi forte préparation. La densité et un critère, le facteur de forme en est un autre qui a son importance, C'est un point qui la plupart du temps est négligé par les constructeurs. Cette lacune se traduit, comme nous le mentionnions plus haut, par une dispersion.

Dispersion qui est d'autant plus critique que les signaux musicaux sont d'une complexité telle qu'ils couvrent une très large bande de fréquence. L'effet de dispersion se traduit par lissage, une intégration des subtilités du message musical, le son est « doux » mais il y a perte d'information.

Naturellement l'obtention de

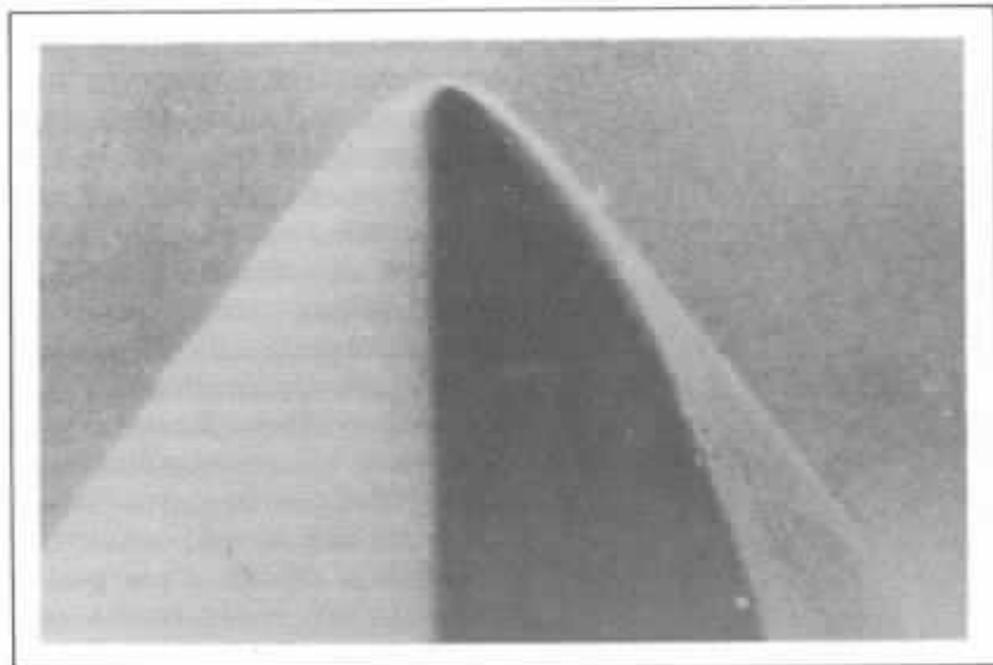


Fig. 4 : Vue de la pointe. Les parties les plus claires sont celles qui sont en contact avec le sillon. Le contact est en ligne.

stylet porte-pointe de très petite dimension et de forme cylindrique pose des problèmes de fabrication. Par ailleurs la réduction de masse qui en découle, repousse la fréquence de résonance supérieure au-delà de 50 kHz. Si bien que le problème de l'avertissement de l'équipage mobile est moins critique car il se situe à très haute fréquence et ne risque pas d'entacher le spectre audible de distorsion.

Il faut dire que les caractéristiques des substances élastiques utilisées dans l'amortissement sont très complexes, voire embarrassantes.

Car le coefficient d'amortissement de tels matériaux n'est en rien constant avec l'amplitude et la fréquence. Cela fait que si la repousse est uniformisée par l'usage de l'amortissement, en l'accroissant par exemple, le comportement en régime musical est contrôlé par les caractéristiques de l'amortissement. Avec les non-linéarités en régime dynamique en particulier sans parler de l'influence de la température et du vieillissement. Ce qui signifie que l'élastomère ne

doit être employé que dans le simple but de maintenir en position l'équipage mobile, il ne faut pas en attendre une action compensatrice.

### La fabrication

Le développement de nouvelles conceptions doit être suivi du développement de technologies capables de les mettre en œuvre.

Ainsi la réduction des éléments de l'équipage mobile dans la nouvelle série des cellules Dyna-vector DV Karat et DV Diamant n'arrange pas les choses en matière de fabrication. Pas plus que l'usage de matériaux aussi peu conventionnel dans ce domaine que sont le rubis et le diamant pour la construction du levier porte pointe. Matériaux retenus par M. Tominari pour limiter au maximum les phénomènes de dispersion, évoqués plus haut de propagation au sein du stylet.

Le diamant est de type contact en ligne, le polissage est particulièrement soigné par l'usage de grain de diamant naturel de type octaédron. La partie supérieure du diamant vient s'enchasser dans une perforation de section carré de 0,1 x 0,1 mm; effectué au laser.

L'armature des bobines a une taille extrêmement réduite de 1 X 1 mm pour une épaisseur de 0,5 mm. Le bobinage s'effectue par procédé automatique, il se compose de 40 tours par canal. Le fil utilisé est en argent, il a une section de 11 $\mu$ .

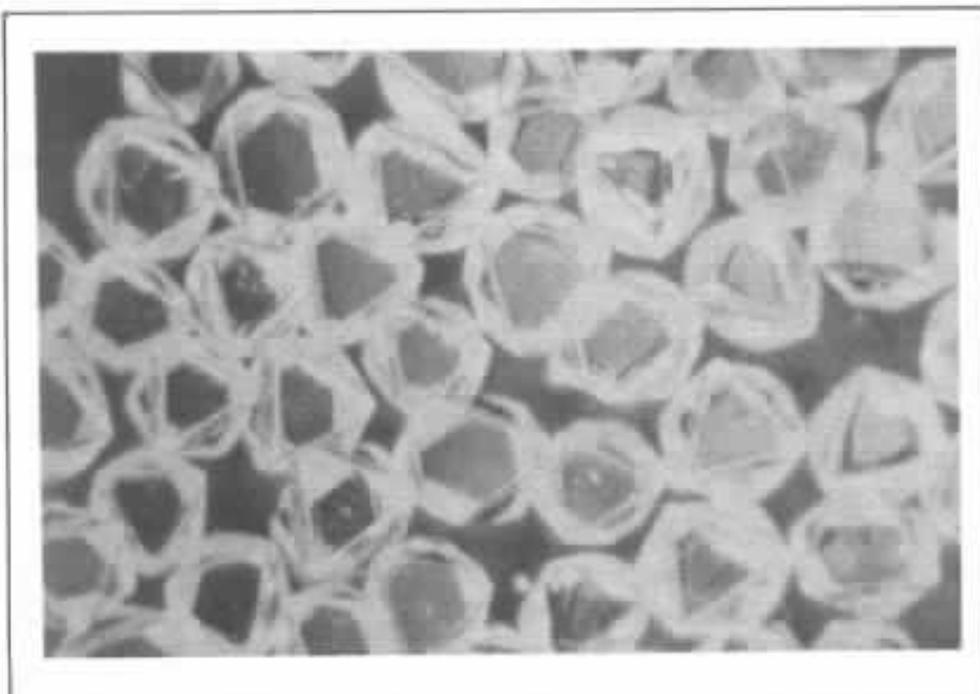
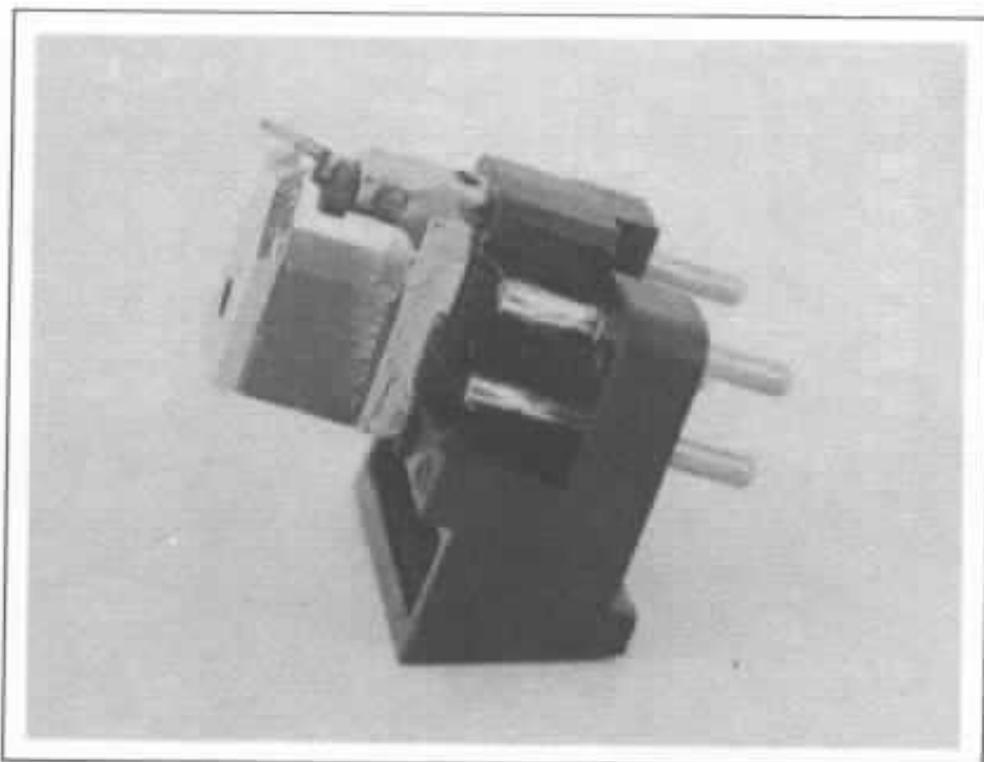


Fig. 5 : Grossissement de grains octaédrons.

Le corps de la cellule est réalisé en polyester renforcé de fibre de verre de sorte à concilier la légèreté et la dureté. Les vibrations parasites sont ainsi fortement atténuées. La masse de la cellule est faible, elle n'est que de 5,3g.

Voici donc deux avis sur le problème des photocapteurs. On remarquera que si le concept à la base est différent, aimant mobile et bobine mobile, l'un et l'autre s'attachent à résoudre en priorité des phénomènes que l'on pouvait qualifier d'annexes il y a encore très peu de temps. Nous voulons parler des phénomènes de vibrations parasites développés par ailleurs dans ce numéro.

L'écoute des cellules de l'une et l'autre firme, met en évidence des similitudes, même si l'équilibre tonal et l'image sonore sont différents. Similitudes venant d'une large gamme dynamique



*Fig. 6 : La fabrication extrêmement compacte participe à limiter les vibrations parasites.*

allié à très peu de colorations. Ces cellules donnent l'impression d'extraire beaucoup plus d'information du sillon qu'il n'est habituel. N'est ce pas une

preuve de grande qualité ? Aussi l'une et l'autre s'affranchiront beaucoup mieux de pressages anciens. C'est un test qui en vaut la peine.

**Page non  
disponible**

# Prédétermination des courbes de réponse de systèmes à évent accordé du 4<sup>e</sup> ordre

Jacques Mahul

*La charge d'un haut-parleur de basses fréquences par un résonateur à évent accordé, plus communément appelée le bass-reflex, peut se vanter d'avoir une existence aussi longue que celle du simple haut-parleur électrodynamique. Depuis la naissance de ce dernier, les concepteurs d'enceintes acoustiques ont toujours eu à cœur de pouvoir récupérer le rayonnement arrière de la membrane pour une meilleure linéarisation ou extension de la réponse. Une utilisation judicieuse de cette énergie qui, dans d'autres circonstances, serait perdue, peut, en outre, permettre de pallier au mal redhibitoire de ce type de transducteur : la faiblesse du rendement.*

En effet le dispositif du baffle infini n'utilise que la moitié de la puissance sonore potentielle et le rendement général en souffre.

Le système de charge « par évent accordé » est, tout simplement, constitué d'un résonateur de Helmholtz, accordé sur la fréquence propre, et couplé au haut parleur. A cette fréquence le haut parleur débite essentiellement dans le baffle dont l'ouverture appelée « évent » se substitue en quelque sorte au diaphragme.

Il y a donc renforcement de l'onde principale émise par le

cône de part et d'autre de cette fréquence tant que la pression sonore à l'endroit de l'évent n'a pas de composante en opposition avec la pression sur le cône. En résumé, le résonateur agissant comme inverseur de phase constitue un véritable court-circuit à l'arrière du diaphragme, les débits volumiques se répartissent en raison inverse des impédances. Le principe de fonctionnement de ce système et les calculs qui lui sont attachés ont été étudiés dès avant la guerre par Olson puis par Beranek. Jusque dans les années 70 le bass-reflex

était essentiellement associé à la seule notion de rendement. Avec l'apparition des enceintes à charge dite « infinie » (enceinte close) il était alors possible de reproduire une bande passante raisonnablement étendue dans les basses fréquences dans des volumes faibles grâce à l'utilisation de haut parleurs à grande compliance par équipages mobiles lourds et à champ magnétique faible. Le rendement général de l'enceinte tombait dans de fortes proportions. Le « bass reflex » ou le système de charge par évent fut en partie discrédité et rejeté

pour être cantonné à des systèmes de sonorisation ou de haute puissance.

Avec l'introduction des mesures des paramètres propres des haut-parleur il a été possible d'aller beaucoup plus loin dans la compréhension et dans l'étude.

En effet, Small et Thiele, les premiers, ont donné des méthodes de prédéterminations des courbes de réponse et des optimisations de volumes des charges possibles, à partir de mesures faites sur les haut-parleurs.

A partir de ce jour, le « bass-reflex » n'est plus apparu comme un seul dispositif générateur de rendement mais aussi comme un dispositif d'optimisation et d'extension de la courbe réponse. Nous démontrerons qu'il est possible, si le haut-parleur le permet, d'obtenir des réponses très étendues dans les basses-fréquences dans un volume aux dimensions raisonnables et ceci avec un rendement correct. L'enceinte close n'a pas, le monopole de la miniaturisation.

Nous allons montrer qu'il est possible d'optimiser les volumes et les courbes de réponses dans les basses fréquences ainsi que de prédéterminer avec exactitude celles-ci. La mesure des différents paramètres du haut-parleur est donc capitale et nos lecteurs pourront se référer au précédent numéro, à ce sujet. Thiele a mis au point une méthode de calcul « loudspeakers in vented boxes » (AES juin 1971) dite « des alignements » qui conduit à une prédétermination des courbes de réponse dans le grave. Keele est allé plus loin et a fourni des éléments précieux sur la sensibilité des alignements de Thiele aux variations des paramètres des haut-parleurs. Snyder de la

société américaine « speaker-lab » a publié à l'AES un article passionnant que nous allons analyser en détail et qui reprend les études précédentes de Thiele Keele et Small. Snyder redéfinit les paramètres fondamentaux des haut-parleurs. Il se distingue de Thiele par le choix d'un  $Q_b$  (coefficient de surtension de la boîte), de valeur finie  $Q_b = 7$  alors que ce dernier l'a considéré comme infini : le coefficient de surtension de la boîte à la fréquence d'accord  $F_b$ , recouvre la résonance de la masse d'air dans l'évent et la compliance du volume d'air dans la boîte.  $Q_b$  est associé à toutes les pertes possibles de la boîte, manque d'étanchéité etc... Thiele avait considéré que la boîte était idéale.

Nous allons résumer dans les pages qui vont suivre les travaux de Snyder et qui permettent de prédéterminer les courbes de réponse de système du 4<sup>e</sup> ordre. Celui-ci a abordé également le 6<sup>e</sup> ordre mais nous n'en parlerons par ici. Cela fera l'objet d'une nouvelle étude par la suite.

### Les Travaux de Snyder

L'objet des recherches de Snyder est de fournir des formules pour la conception de systèmes accordés du 4<sup>e</sup> ordre pour un woofer donné. La fréquence d'accord de la boîte est calculée d'après les seuls paramètres du haut-parleur. Le concepteur a le choix des volumes de la boîte ainsi que des différentes fréquences de coupure. Il sera possible de déterminer la courbe de réponse (la forme, la régularité) à l'aide d'un ensemble de graphes proposés par l'auteur. Ceux-ci sont gradués en unité de  $F_s/Q_{TS}$  pour la fréquence et en décibels pour la pression ; cha-

que courbe est pondérée par un volume qui est exprimé en unités de  $V_{AS} Q_{TS}^2$ . Ces graphes sont applicables à un grand nombre de boomers et de volumes de boîte. Nous parlerons aussi d'un alignement optimum pour la meilleure linéarisation de la réponse en basses fréquences ; l'existence d'un optimum ne signifie en rien qu'il ne faille pas s'en écarter et choisir une autre formule et donc un autre type de courbe de réponse selon les désirs de chacun.

### Introduction

Comme rappelé précédemment, Snyder a démontré que Thiele avait simplifié le problème en prenant un  $Q_b$  infini. De plus celui-ci a basé son étude sur une analyse expérimentale : mesurant les propriétés des haut-parleurs de la société dans laquelle il travaillait, il a observé une variation assez considérable des valeurs des paramètres d'une unité à l'autre dans la production d'un même modèle. Cependant ces variations n'avaient que très faiblement les performances acoustiques des systèmes dans lesquels ils étaient utilisés. Cette analyse l'a conduit à penser que les systèmes de charge des haut-parleurs sont, en réalité déterminés par des caractéristiques relativement peu variables des woofers alors que les paramètres usuellement mesurés sont trop influencés par quelques facteurs qui ne troublent guère les résultats finaux.

### L'analyse mathématique

La réponse en fréquence  $E(s)$  est représentative du niveau de pression sonore relatif du haut-parleur chargé en fonction de la variable complexe  $s$ , (transformée de Laplace de la fréquence).

Cela signifie que le niveau de pression sonore aux fréquences élevées est sensé approcher l'unité. Cette fonction  $E(s)$  exprime le niveau des basses fréquences comparé à celui des hautes fréquences pour un même woofer monté dans sa boîte. Cette fonction de la réponse en fréquence est :

$$E(s) = \frac{1}{s^4 + \left(\frac{f_s}{Q_T} + \frac{f_b}{Q_b}\right)s^3 + \dots} \dots$$

$$\frac{\left(\frac{V_{AS} f_s^2}{V_b} + f_s^2 + \frac{f_b f_s}{Q_b Q_T} + f_b^2\right)s^2 + \dots}{1} \quad (1)$$

$$\frac{\left(\frac{f_b f_s^2}{Q_b} + \frac{f_b^2 f_s}{Q_T}\right)s + f_b^2 f_s^2}{1}$$

La réponse en fréquence est donc dépendante des six paramètres suivants, trois relatifs au haut-parleur, trois à la boîte.

$f_s$  = fréquence de résonance du haut-parleur, mesurée sur un baffle plan ;

$Q_T$  = coefficient de surtension total du woofer monté dans le système, à la fréquence  $F_S$ , incluant toutes les résistances électriques et mécaniques et que Snyder affirme être égal à  $Q_{TS}$ , le  $Q$  du haut-parleur ;

$V_{AS}$  = volume d'air ayant la même compliance acoustique, que la suspension du haut-parleur ;

$Q_b$  = coefficient de surtension total de la boîte à la fréquence  $f_b$  dû à toutes les pertes au sein de la boîte et qui est considéré comme ayant la valeur moyenne de 7 ;

$V_b$  = volume net de l'air à l'intérieur de la boîte ;

La fréquence de résonance  $F_S$  du haut-parleur est usuellement défini à l'air libre, cependant Snyder préfère effectuer cette mesure, le haut-parleur monté sur un baffle plan pour mieux approcher les effets de la charge de la masse d'air dans les conditions d'utilisation finale.

Dans certaines conditions  $Q_T$  différera de  $Q_{TS}$ . En particulier si un matériau amortissant est disposé dans l'enceinte à proximité de l'arrière du haut-parleur, la résistance acoustique supplémentaire au flux d'air peut affecter le  $Q$ . De même si l'impédance de source alimentant le haut-parleur est très différente de zéro en interposant par exemple une résistance de câble entre elle et lui, le coefficient  $Q$  sera modifié. Cependant si le câble de liaison est de forte section et si l'amplificateur possède un bon facteur d'amortissement, tout problème pourra être évité. Tout sauf un : celui du filtre passif associé au woofer.

Dans le cas (fréquent) d'une enceinte multivoies l'inductance (ou les inductances selon l'ordre du filtrage) en série avec le woofer modifiera le  $Q_{TS}$  de ce dernier dans des proportions non négligeables. Pour cette raison il est impératif d'utiliser des selfs très peu résistives. Dès l'instant où le filtrage est actif cette réserve disparaît. Ces mises en garde étant faites nous supposons désormais que  $Q_T = Q_{TS}$ .

Snyder fait deux hypothèses : toutes les pertes de la boîte sont assimilées à des pertes de manque d'étanchéité (toute autre perte de nature différente modifiera légèrement la forme de l'équation (1)), et le  $Q_b$  total de la boîte est égal à 7.

Ces deux choix donnent des résultats qui sont, à peu de chose près, en conformité avec les

méthodes actuelles d'assemblage des enceintes.

Les autres paramètres importants du haut-parleur tel que la tenue en puissance ou le rendement ne sont pas pris en considération tout au long de l'étude. Seuls sont utilisés les facteurs qui affectent la forme de la courbe de réponse en fréquence. Le dicton bien connu « les systèmes à évent ont plus rendement que les systèmes clos » signifie en réalité qu'un woofer optimisé pour un montage dans une boîte accordé possèdera plus de rendement général qu'un autre woofer qui, lui, sera optimisé pour être associé au même volume clos. Ceci est dû au fait que les systèmes à évent accordé peuvent faire appel à des woofers de  $Q_{TS}$  inférieurs à ceux habituellement nécessaires aux enceintes closes. Un  $Q_{TS}$  faible est, en partie, obtenu par la présence d'une énergie magnétique élevée. D'où le rendement supérieur. Mais le système à évent n'est pas plus efficace en lui-même, la boîte et, son évent n'étant pas des générateurs d'énergie. Il est bien évident que nous avons considéré que dans les deux cas les courbes de réponses étaient optimisées et linéaire.

Keele a observé que la compliance  $V_{AS}$  du woofer ( $V_{AS} = C_{AS} \gamma \rho_0$  et  $C_{AS} = C_{MS} S^2 D$ ,  $C_{AS}$  est la compliance acoustique correspondant à la compliance mécanique de la suspension du haut-parleur et  $V_{AS}$  le volume d'air qui lui correspond) a peu d'influence sur la courbe de réponse du système monté. Et Snyder a confirmé que parmi les paramètres physiques du woofer : compliance, masse de l'équipage mobile, champ magnétique, la compliance est de ceux qui varient le plus en production. Or on s'aperçoit que la fréquence de

résonance et le coefficient de sur-tension  $Q_{TS}$  sont directement liés à la compliance :  $f_s$  est déterminée par la masse du cône et la compliance.

$$\left( f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{MS} M_{MD}}} \right)$$

de même  $Q_{TS}$  est très sensible à la compliance du fait que sa mesure s'effectue à la fréquence  $f_s$ .

Il est possible de s'astreindre de l'influence de la compliance en faisant appel à un nouveau paramètre : le quotient  $F_s/Q_T$  en lieu et place de  $Q_T$ . Ce quotient peut être étudié de plus près en subsistant les paramètres mécaniques aux paramètres acoustiques :

$$\frac{f_s}{Q_T} = \frac{2\pi W_s}{W_s M_{MS}/R_{MS}} = \frac{2\pi R_{MS}}{M_{MS}}$$

$W_s$  est la fréquence de résonance en radians/seconde,  $R_{ms}$  est la résistance totale engendrée par la membrane du haut-parleur en unité mécaniques et  $M_{ms}$  est la masse du cône dans les mêmes unités. On peut constater que la fréquence et par conséquent la compliance s'élimine d'elle-même.

De façon similaire il est possible de concevoir un second nouveau paramètre du woofer. Snyder eut l'idée de remplacer  $V_{as}$  par le facteur  $V_{AS} f_s^2$ . Ce facteur n'a aucune relation avec la compliance et il est facile de le démontrer :

$$V_{AS} f_s^2 = V_{AS} \frac{1}{4\pi^2 V_{AS} M_{AS}} = \dots$$

$$\dots = \frac{1}{4\pi^2 M_{AS}}$$

dans lequel  $M_{as}$  est la masse acoustique du woofer. La compliance disparaît et ce nouveau facteur est tout à fait représentatif de la masse acoustique du woofer.

En conclusion, aux paramètres usuels du woofer  $f_s$ ,  $Q_T$  et  $V_{as}$  il est possible de substituer une nouvelle composition plus fondamentale :

$$\frac{f_s}{Q_T}, V_{AS} f_s^2, \text{ et } V_{AS}$$

Le paramètre  $V_{as}$  est indépendant des deux autres de sorte qu'il peut rester identique à lui-même. Le caractère fondamental de  $f_s/Q_T$  et de  $V_{as} f_s^2$  peut être confirmé par un nouvel examen de la courbe de réponse (1).  $Q_T$  apparaît trois fois et chaque fois dans le quotient  $f_s/Q_T$ . La compliance  $V_{as}$  n'apparaît qu'une fois et alors dans le facteur  $V_{as} f_s^2$ . Cela plaide en la faveur de cette redéfinition des paramètres fondamentaux du haut-parleur.

Supposons que vous ayez entre les mains un woofer magnétique déterminé mais dont la compliance diffère de celle qui est annoncée par le constructeur, les trois valeurs  $Q_T$  et  $V_{as}$  seraient affectées et différeraient notablement des spécifications d'origine. Ces erreurs s'annulent dès que l'on passe à  $f_s/Q_T$  et à  $V_{as} f_s^2$ .

Le calcul de ces deux composés, vous donnera toujours des résultats en concordance avec ceux du constructeur. Seuls seront pris en considération, dans la suite de l'étude, ces trois nouveaux paramètres.

### Des choix à confirmer

Une fois cette redéfinition des paramètres effectuée, Snyder

s'est tourné vers le tableau bien connu des alignements de Thiele. Il a découvert que pour les neuf premiers alignements des quantités approximativement constantes apparaissent :

$$\sqrt{\frac{V_{AS} f_s^2}{V_b f_3^2}} = 1,41 \quad (2)$$

$$\text{et } \frac{Q_T}{f_s} f_b = 0,39 \quad (3)$$

Ainsi donc, Thiele avait mis en avant deux relations simples liant  $f_3$  et  $f_b$  ( $f_b$  fréquence d'accord du système) aux trois paramètres du haut-parleur. Nous supposons tenir alors toutes les données nécessaires au calcul d'un système à évent accordé. Les équations précédentes exprimées en fonction des nouveaux paramètres deviennent :

$$f_3 = 0,84 \sqrt{\frac{V_{AS} f_s^2}{V_b}} \quad (4)$$

$$\text{et } f_b = 0,39 \frac{f_s}{Q_T} \quad (5)$$

Le processus de calcul est très simple :

- choisir une dimension de boîte appropriée  $V_b$
- calculer la fréquence de coupure basse à -3 dB,  $f_3$  à partir de l'équation (4). Si cela ne procure pas le résultat espéré revenir en arrière en choisissant un volume plus important.
- accorder la fréquence de réso-

nance de la boîte  $f_b$  à la valeur spécifiée en (5).

La hardiesse de ces suppositions réside en ce qu'il est alors possible de concevoir toute une gamme de systèmes accordés, utilisant des volumes différents et procurant des fréquences de coupure différentes pour un woofer donné. C'est toute la souplesse du système. La plupart des autres méthodes de calcul donne un seul volume possible et une seule fréquence de coupure basse pour un woofer donné.

### Courbes de réponse des systèmes accordés du 4<sup>e</sup> ordre

Il est possible de vérifier l'exactitude des formules (4) et (5) en substituant les valeurs des paramètres dans la fonction de transfert (1). A l'aide d'un ordinateur, les courbes de réponse résultantes des systèmes en accord avec les deux précédentes formules pourront être obtenues par cette même fonction.

La formule de  $f_b$  montre que cette valeur est une variable indépendante.  $Q_b$  n'est pas une variable car supposé égal à 7.

Il est possible de réduire le nombre des variables dans  $E(s)$  : la fréquence pourra être exprimée en unités de  $f_s/Q_T$  et le volume en unités de  $V_m Q_T^2$  ce qui conduit à deux nouvelles variables  $f/f_s Q_T$  pour la fréquence et  $V_b/V_m Q_T^2$  par le volume.

Les systèmes de haut-parleurs conçus pour de nombreuses combinaisons de  $f_s$ ,  $Q_T$ ,  $V_m$  et  $V_b$  auront des courbes de réponse qui peuvent être rassemblées en un nombre restreint de graphes.

Chaque figure est relative à une valeur de  $Q$  et possède plusieurs courbes pour différentes valeurs de volume de boîte  $V_b$ .

Ces volumes vont de  $2 V_m Q_T^2$  à  $16 V_m Q_T^2$ . Les échelles en fréquence sont graduées de  $0,2 f_s/Q_T$  à  $f_s/Q_T$ . Ces unités inhabituelles risquent de perdre le lecteur. Imaginez un woofer dont  $f_s/Q_T = 100$  Hz et  $V_m Q_T^2 = 1$  litre (un woofer dont  $f_s = 15,9$  Hz,  $Q_{TS} = 0,159$  et  $V_m = 39,6$  litres par exemple) l'échelle en fréquences est directement graduée en Hz de 20 à 200 Hz et les courbes pondérées directement en litres.

Pour une application à un autre woofer :

- Choisir la figure dont la valeur de  $Q_T$  est la plus proche de celle du woofer considéré.

- Calculer le quotient  $f_s/Q_T$  pour ce même woofer et multiplier les éléments de l'échelle en fréquence par ce quotient pour l'obtention de la vraie valeur en Hz.

- Calculer le facteur  $V_m Q_T^2$  du woofer et multiplier les valeurs de pondération des courbes par ce facteur pour l'obtention du volume en litres.

L'examen des ces courbes nous amène à quelques conclusions intéressantes. Tout d'abord, il est évident que pour un woofer donné il existe une gamme très large de volumes et de coupures basses plutôt qu'un seul volume bien déterminé et donc une seule coupure inférieure possible. Un optimum existe et il est en général situé à  $n = 5,7$ . Les autres courbes se déduisent les unes des autres par des ondulations par rapport à cet optimum. En s'autorisant une ondulation dans la courbe de réponse de seulement  $\pm 1$  dB les volumes couvriront alors une gamme assez large. Une grande flexibilité est ainsi obtenue dans le choix des volumes et cela au prix d'une ondulation mesurée

dans la courbe de réponse. Par exemple, un woofer avec un  $Q$  de 0,32 peut être utilisé dans des boîtes allant de 2 à 11,3  $V_m Q_T^2$  pour fournir des fréquences de coupure basse allant seulement de 0,35 à 0,63  $f_s/Q_T$ . La latitude est de 1 à 6 par les volumes alors qu'elle n'est que de 2 pour les coupures. On peut noter qu'il n'y a qu'une faible différence de courbes de figure en figure. Les courbes d'un woofer de  $Q = 0,159$  sont très proches de celles d'un woofer de  $Q = 0,20$ . Cela s'explique par l'absence de l'influence de la compliance dans les calculs. Il vous sera aisé de procéder par interpolation pour des valeurs intermédiaires de  $Q_T$ .

Les fréquences de coupure pour plusieurs combinaisons de  $Q$  du woofer et de volumes de boîte sont rassemblées dans le tableau n° 1. Les combinaisons fournissent au plus  $\pm 1$  dB d'ondulation.

Les courbes des figures et les valeurs du tableau sont calculées en accord avec l'équation (5). Cette équation est un excellent outil car elle conduit à des formes de courbes de réponse tout à fait plausibles. L'exactitude de l'équation n° 4 peut être prouvée en comparant les fréquences de coupure qu'elle préconise (fournies dans le tableau n° 2 avec les valeurs des fréquences de coupure calculées en utilisant la fonction de transfert  $E(s)$  (fournies dans le tableau n° 1).

En comparant les deux tableaux on s'aperçoit que l'approximation faite par l'équation

$$(4) f_c = \sqrt{0,84 V_m f_s^2 / V_b}$$

s'avère incorrecte. La raison principale réside dans le choix de Thiele d'un  $Q_b$  infini alors que le calcul de fréquences de coupure

**Tableau n° 1**

Fréquences de coupure  $f_3$  (exprimées en unité de  $f_s/Q_T$ ) des systèmes du 4° ordre accordé selon l'équation  $f_b = 0,39$  pour des combinaisons de  $Q_T$  et de  $V_b$  ne dépassant  $\pm 1$  dB d'ondulation. ( $V_b$  est en unité de  $V_{AS} Q^2$ ).

$Q_T$	$f_3/V_b$	2	2,8	4	5,7	8	11,3	16
0,159		0,61	0,53	0,46	0,40	0,37		
0,20		0,61	0,53	0,46	0,40	0,37	0,35	
0,25		0,62	0,54	0,46	0,40	0,37	0,35	
0,32		0,63	0,55	0,47	0,40	0,37	0,35	
0,40		0,64	0,56	0,48	0,41	0,36	0,35	
0,50			0,59	0,51	0,42	0,36	0,34	
0,63				0,57	0,47	0,35	0,34	

**Tableau n° 2**

Estimations des fréquences de coupure  $f_3$  (en unité de  $f_s/Q_b$ ) des systèmes du 4° ordre fournies par l'équation (4)

$$f_3 = 0,84 \sqrt{V_{AS} f_s^2 / f_b} \quad (V_b \text{ en unité de } V_{AS} Q^2_T)$$

$f_3/V_b$	2	2,8	4	5,7	8	11,3	16
$0,84 \sqrt{V_{AS} f_s^2 / f_b}$	0,59	0,50	0,42	0,35	0,30	0,25	0,21

**Tableau n° 3**

Estimations des fréquences de coupure  $f_3$  (en unité de  $f_s/Q_T$ ) des systèmes du 4° ordre fournies par la nouvelle équation (6)

$$f_3 = 1,0 \sqrt{V_{AS} f_s^2 / f_b} \quad (V_b \text{ en unité de } V_{AS} Q^2_T)$$

$f_3/V_b$	2	2,8	4	5,7	8	11,3	16
$1,0 \sqrt{V_{AS} f_s^2 / f_b}$	0,71	0,59	0,50	0,42	0,35	0,30	0,25

$f_3$ , du tableau 1 est fait avec  $Q_b = 7$

Un  $Q_b$  de la boîte fini aura pour effet une diminution du niveau de sortie aux alentours de la fréquence de coupure. En conséquence, la fréquence de coupure à -3 dB sera plus élevée.

Une meilleure estimation de la fréquence de coupure sera fournie par l'équation suivante :

$$f_3 = 1,0 \sqrt{\frac{V_{as} f_s^2}{V_b}} \quad (6)$$

Les fréquences de coupure fournies par cette formule sont rassemblées dans le tableau n° 3, mais ne sont vraies qu'avec une tolérance de  $\pm 15\%$ .

### Application pratique

Pour étayer son étude, Snyder prend l'exemple d'un haut-parleur Speakerlab référence W804 R de 210 mm de diamètre, utilisé généralement dans une boîte de 20 litres. La compliance de sa suspension est élevée et le volume équivalent à la compliance acoustique correspondant à cette compliance est  $V_{as} = 99$  litres.  $V_{as} = C_{as} \gamma \rho$  ( $\gamma \rho = 1410$ ) et  $C_{as} = C_{MS} S^2 D$  ( $S_D$  surface de la membrane).

La fréquence de résonance est  $f_s = 27$  Hz et  $Q_T = 0,32$ . ces éléments nous permettent de définir le nouveau paramétrage :  $f_s/Q_T = 84$  Hz,  $V_{as} Q_T^2 = 10$  l,  $f_b = 0,39 f_s/Q_T = 33$  Hz. nous supposons dans le cas présent que le filtre passif n'intervient pas et  $Q_T = Q_{TS}$ . Dans le cas contraire ou la résistance des selfs en série avec le woofer serait voisine de  $1 \Omega$ , il faudrait majorer  $Q_{TS} = 0,32$  de 10 à 15 % ( $Q_T$  serait de l'ordre de 0,36 à 0,37).

Les courbes de réponse pour un  $Q_T = 0,32$  apparaissent en

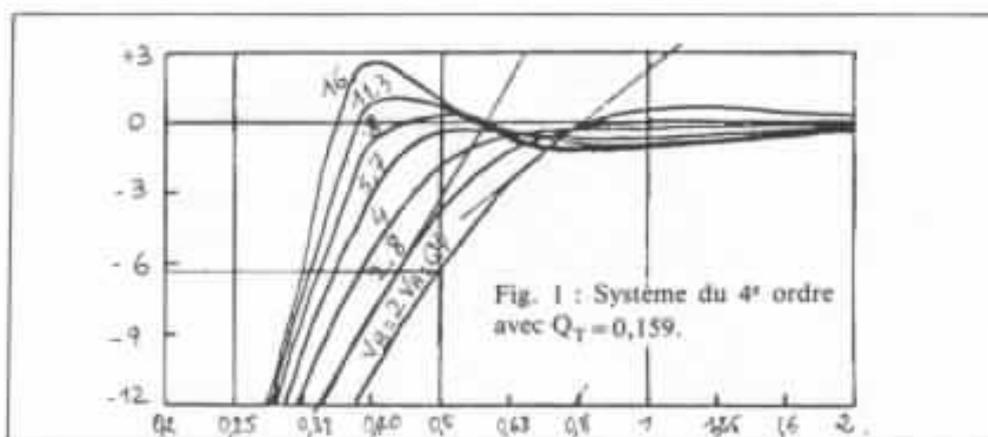


Fig. 1 : Système du 4° ordre avec  $Q_T = 0,159$ .

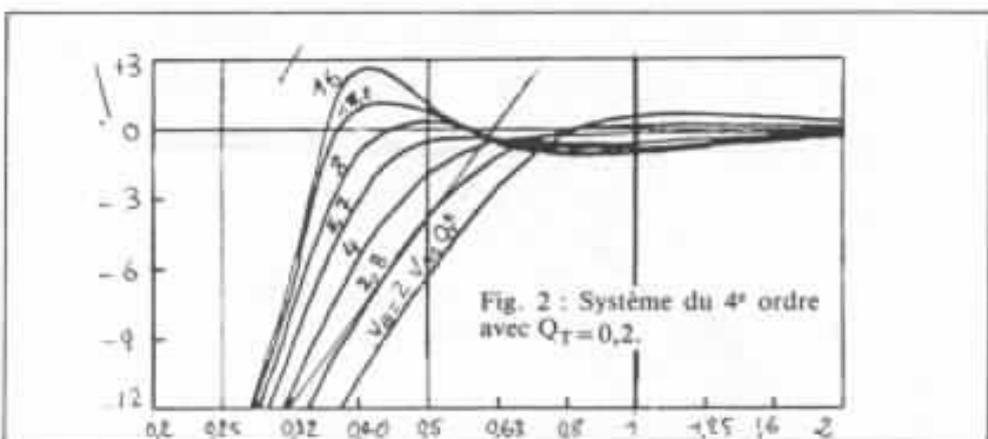


Fig. 2 : Système du 4° ordre avec  $Q_T = 0,2$ .

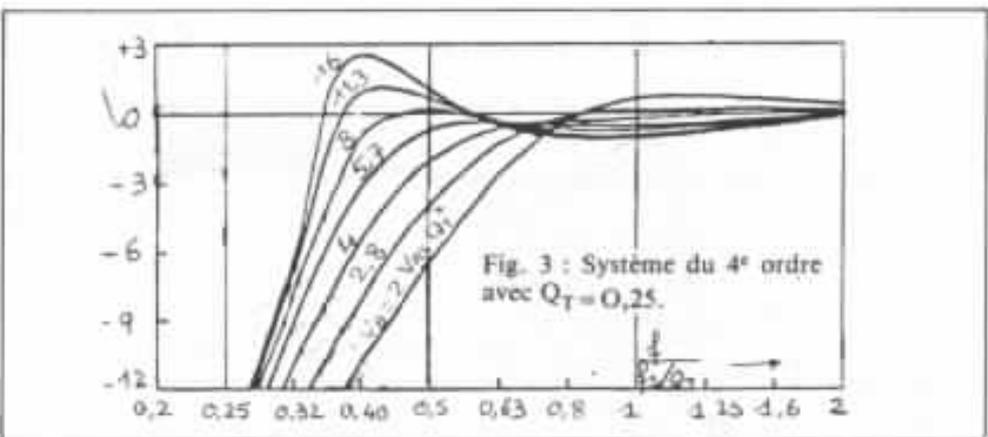


Fig. 3 : Système du 4° ordre avec  $Q_T = 0,25$ .

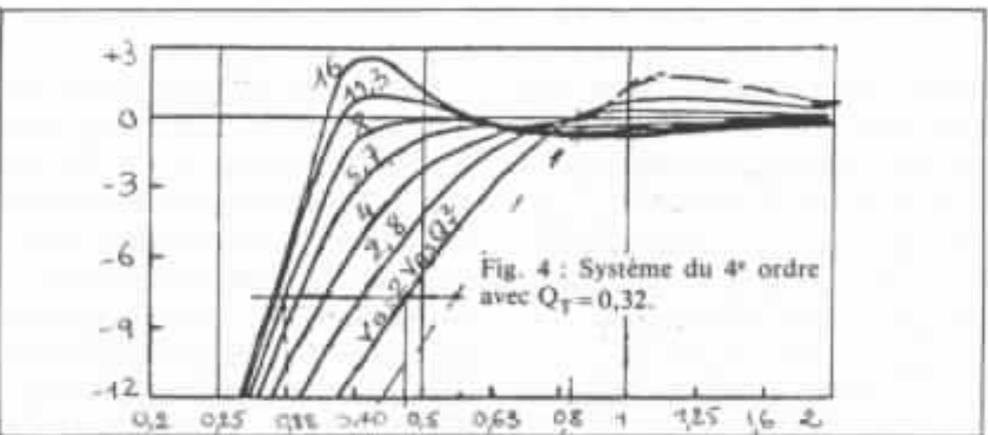


Fig. 4 : Système du 4° ordre avec  $Q_T = 0,32$ .

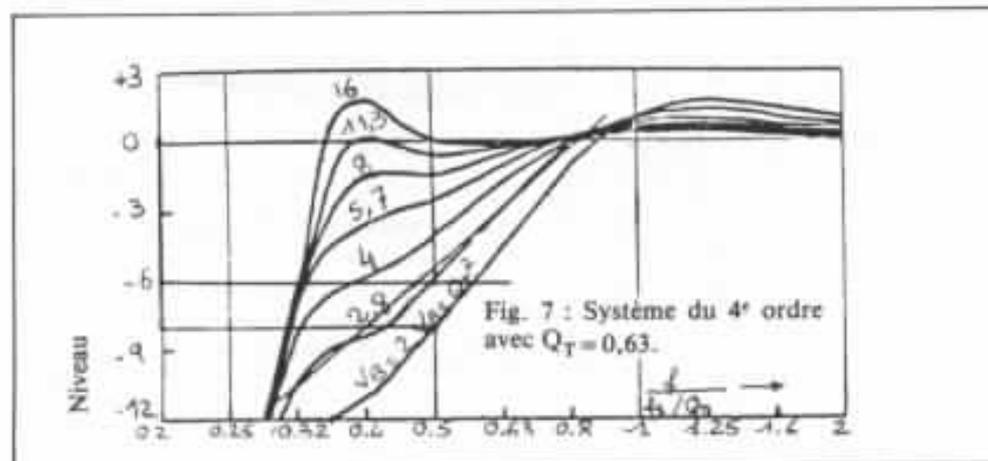
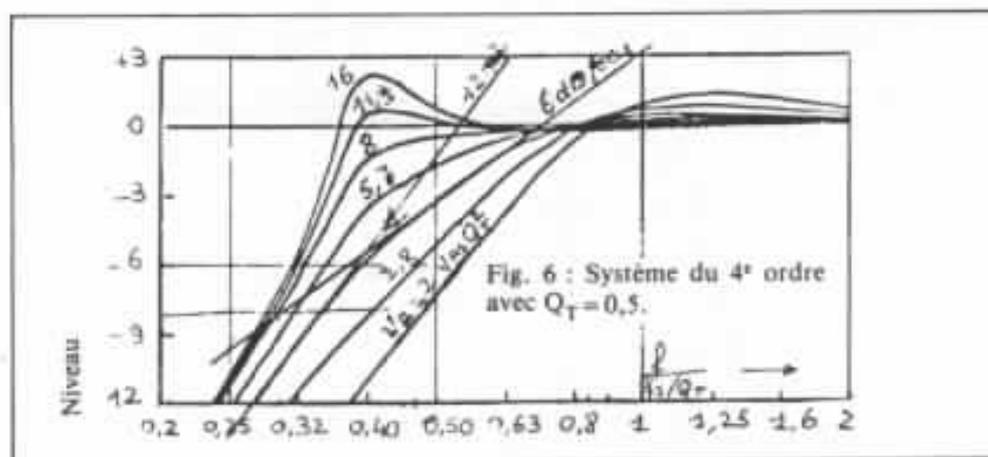
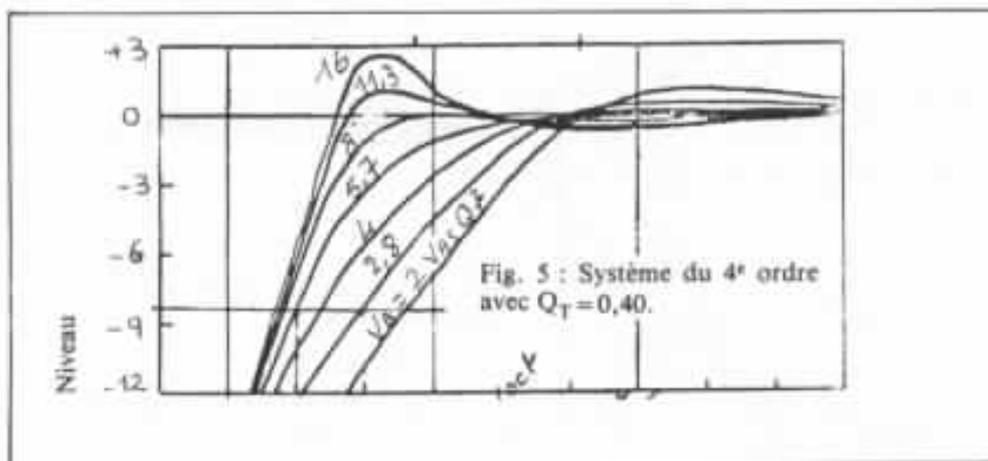


figure (4). La figure (8) ne fait que reprendre ces mêmes courbes mais avec les paramètres propres du W804 R. Comme  $V_m Q_T^2$  fait 10 litres. La courbe paramétrée 2 devient 20 litres etc... De la même manière, l'échelle de fréquence a été transformée en hertz : 84 Hz prend la place de  $1,0 f_s/Q_T$  etc...

La courbe la plus plate est celle de 81 litres qui donne une réponse inférieure à -3 dB de 31 Hz. En augmentant le volume à 114 litres, la fréquence de coupure sera largement inférieure : 30 Hz. Une diminution sensible du volume à 57 litres augmentera légèrement la coupure qui atteindra alors 34 Hz. Une petite boîte

de seulement 40 litres, fournira une coupure basse de l'ordre de 40 Hz ce qui est remarquable pour cette dimension.

En figure (8) apparaît la réponse en fréquence du W804 R selon l'alignement n° 4 de Thiele. Cet alignement correspond à un volume de  $3,7 V_m Q_T^2 = 53$  litres. L'alignement 4 prévoit, avec un  $Q_b$  infini une coupure à 37 Hz et avec  $Q_b = 7$  une coupure à 41 Hz.

Les alignements de Butterworth sont conçus pour prouver la réponse en fréquence la plus linéaire, ceux de Tchebycheff garantissent une égale déviation par rapport au niveau 0 dB.

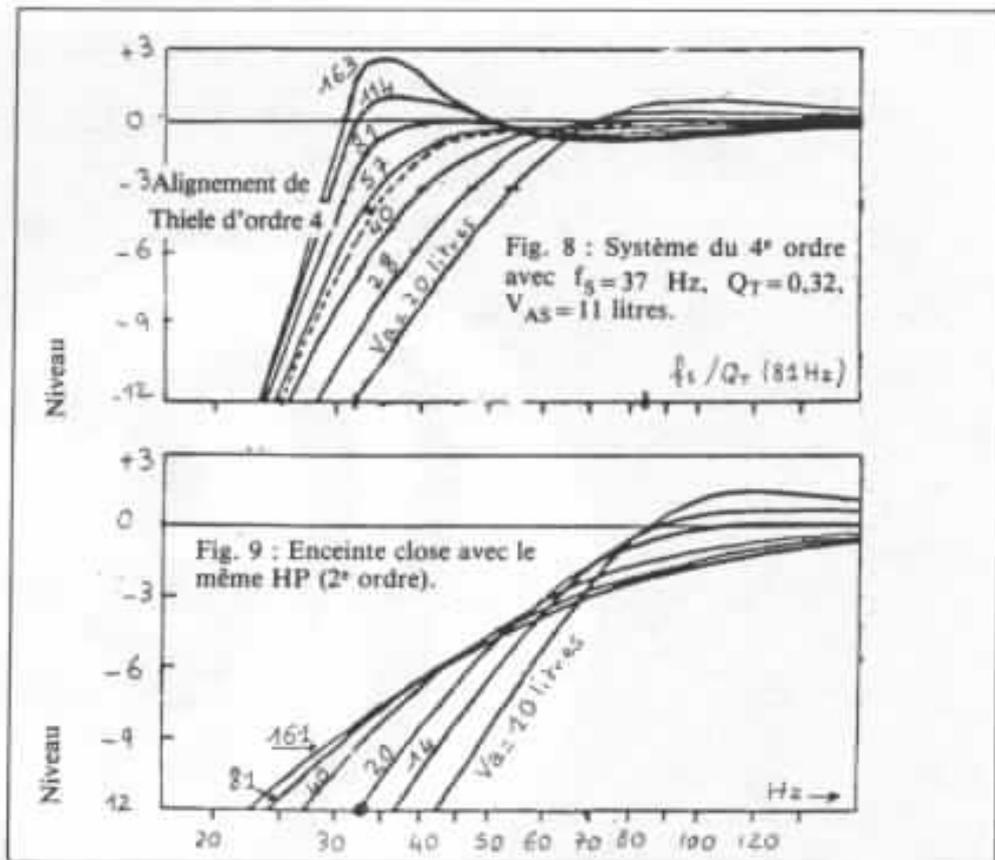
L'alignement n° 4 est un alignement quasi-Butterworth et avec un  $Q_b$  infini donnerait une réponse proche de 0 dB au dessus de 50 Hz. Mais avec un  $Q_b = 7$  la courbe se creuse et donne une dépression de 0,3 dB à 70 Hz. La figure (8) nous montre que les alignements de Butterworth ou de Tchebycheff ne sont pas les seuls à convenir. D'autres choix procurant des creux et des bosses d'amplieurs différentes peuvent être effectués.

La réponse en basse fréquence est souvent une question de coût de la boîte et le concepteur devra décider si une réduction faible de la fréquence de coupure vaut l'augmentation de volume qui lui correspond.

Des courbes de réponse du W804 R chargé par un volume clos sont données en figure (9).

La courbe la plus plate est donnée par un volume de 20 litres mais la coupure basse est à 60 Hz. La seule présence d'un évent accordé dans ce même volume fait descendre  $f_s$  à 53 Hz. On peut noter qu'un volume clos

plus important n'améliore que très faiblement les performances alors que dans 40 litres nous obtenions avec un évent accordé une réponse linéaire jusqu'à 40 Hz. Et dans ce même volume clos le niveau à 40 Hz est 6 dB inférieur. Il serait possible d'accroître ce niveau relatif et de régulariser la réponse dans le bas du spectre en augmentant  $Q_T$  (augmentant  $f_s$  et diminuant  $V_{AS}$  pour garder  $f_s/Q_T$  et  $V_{AS} Q_T^2$  constants), ceci peut se faire en réduisant le champ magnétique mais cette opération se fera au détriment du rendement. La ligne 0 dB diminuera même si la courbe de réponse se relève dans le bas pour être régularisée. C'est en cela que les systèmes à évent accordé ont plus de rendement que les systèmes clos.



**Page non  
disponible**

# Physiologie sensorielle

## Quelques caractéristiques de non-linéarité de l'oreille

Jean Hiraga

*Si l'on sait qu'un son n'a que trois dimensions, c'est-à-dire le niveau, la fréquence, le temps, eux-mêmes liés aux notions de dynamique, d'enveloppe spectrale d'enveloppe mélodique, la métrologie acoustique peut paraître assez simple si elle n'a pour outil qu'un microphone et un appareil de mesure.*

*Un autre univers, bien plus vaste et que les savants cherchent à mieux définir depuis des siècles, est la métrologie acoustique basée sur les réactions humaines de sensation auditive, science faisant donc intervenir la psychophysique acoustique.*

De très nombreux savants ont participé à cette recherche où il est bien difficile de définir, de mesurer exactement l'intensité, la valeur d'une sensation.

Citons par exemple Sauveur (1653-1716), Savart (1791-1814) Helmholtz, Robert Hooke, Fechner, ainsi que, plus récemment, les diverses équipes de recherches américaines de la Bell Laboratory et de l'université de Harvard.

Sans chercher à traiter en profondeur, ce qui serait impossible sur si peu de pages, les diverses caractéristiques de non linéarité de l'oreille, nous allons essayer de rappeler aux lecteurs quelques particularités intéressantes de

l'oreille. Celles-ci ne concernent pas la courbe de réponse de l'oreille, qui, elle-même, est très loin d'être linéaire. Nous allons plutôt parler de ces diverses « non linéarités » concernant la sensation d'intensité, de hauteur de son, ainsi que des « illusions auditives » auxquelles elle peut être sujette.

### Le niveau

Concernant le niveau, on sait depuis fort longtemps que l'intensité ressentie est un peu comme le logarithme de l'excitation ; c'est du moins ce que concluait Fechner qui avait, faute de mieux trouvé pour unité de gran-

deur (mesure subjective), le jnd, (de l'anglais Just Noticeable Difference) c'est-à-dire une unité correspondant à une « différence tout juste sensible ». Malgré ce que prétendait Fechner, c'est-à-dire que l'addition des « jnd » (que l'on pourrait appeler en français DTJS, différence tout juste sensible) était possible, beaucoup rejetaient cette théorie. Si les moyens de mesure utilisaient plus tard le décibel pour mesurer l'énergie sonore, il était facile de démontrer qu'un son de 100 dB n'était pas deux fois plus fort (subjectivement) qu'un son de 50 dB.

Fallait-il aussi ajouter les résultats de recherches de Flet-

Phons	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
20	0.25	0.27	0.29	0.31	0.33	0.35	0.38	0.41	0.44	0.47
30	0.50	0.54	0.57	0.62	0.66	0.71	0.76	0.81	0.87	0.93
40	1.0	1.07	1.15	1.23	1.32	1.41	1.52	1.62	1.74	1.87
50	2.0	2.14	2.30	2.46	2.64	2.83	3.03	3.25	3.48	3.73
60	4.0	4.29	4.59	4.92	5.28	5.66	6.06	6.50	6.96	7.46
70	8.0	8.60	9.20	9.80	10.6	11.3	12.1	13.0	13.9	14.9
80	16.0	17.1	18.4	19.7	21.1	22.6	24.3	26.0	27.9	29.9
90	32.0	34.3	36.8	39.4	42.2	45.3	48.5	52.0	55.7	59.7
100	64.0	68.6	73.5	78.8	84.4	90.5	97.0	104	111	119
110	128	137	147	158	169	181	194	208	223	239
120	256	274	294	315	338	362	388	416	446	478

Fig. 1 : Tableau de conversion des Phons en Sones

cher et Munson démontrant que la sensibilité de l'oreille n'était pas la même, suivant les fréquences, pour un niveau donné.

Ainsi après avoir tenté de définir et d'adopter des décibels « spéciaux » tels que les décibels A, les décibels B, les décibels C, les phons... on cherchait encore.

A l'université de Harvard de nombreuses expériences faites sur différents observateurs permirent d'établir une autre échelle, échelle d'intensité perçue, qui fut appelée SONE, correspondant à une intensité physique de 40 dB pour une fréquence de 1 000 Hz, ce SONE étant égal en énergie à  $10^{-6}$  microwatt/cm<sup>2</sup>.

Sur la figure 1 on peut voir un tableau de conversion très pratique de Phons en Sones, donnant le niveau acoustique subjectivement ressenti, en Sones, pour un niveau compris entre 20 Phons et 129 Phons. Ceci donne pour un niveau de 63 Phons, une sensation de 4,92 Sones.

Vu que le tableau est donné pour la fréquence de 1 000 Hz,

ici il est certain qu'il faudrait plusieurs de ces tableaux pour reconstituer le niveau de la sensation ressentie entre 16 et 20 000 Hz. Pour dire ici combien montrer l'oreille est loin d'être linéaire, disons par exemple que pour les fréquences inférieures à 50 Hz le niveau physique réel aurait besoin d'être augmenté

250 000 fois pour que l'on « ressent » un niveau identique à celui de 1 000 Hz.

En effet, pour 1 Sone à 1 kHz, soit 40 Phons ou une pression acoustique de 0,0002 microbar, cette même pression reportée à 30 Hz donnerait cette fois un niveau très inférieur.

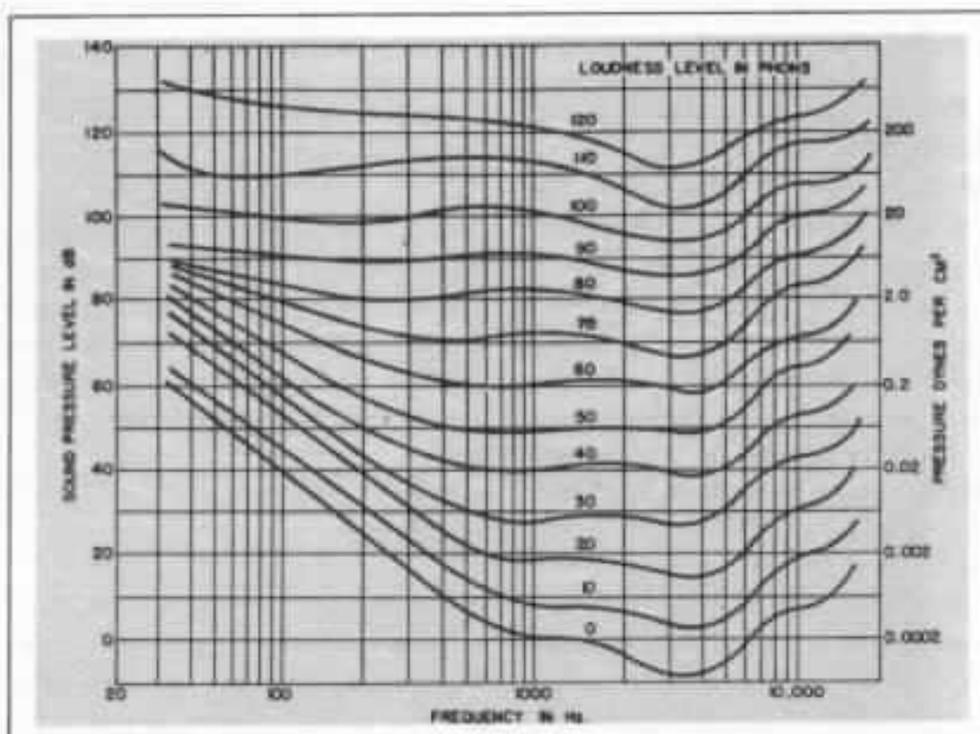


Fig. 2 : Caractéristiques de Fletcher et Munson, entre les limites du seuil de la douleur et la limite de perception.

## Niveau/Fréquence

La courbe de la figure 2 représente le groupe de caractéristiques tracées pour l'oreille humaine, ceci entre les limites maximum (seuil de douleur et limite de perception).

Cette caractéristique, encore utilisée comme référence, est la fameuse courbe d'intensité subjective définie par Fletcher et Munson, des laboratoires Bell.

Refaita plus tard en Angleterre par Churcher et King (fig 3), ceux-ci obtinrent des résultats légèrement différents. Noter cependant que dans les deux cas, les diverses courbes convergent dans le bas du spectre et que les divers niveaux de la courbe Churcher et King sont moins régulièrement espacés.

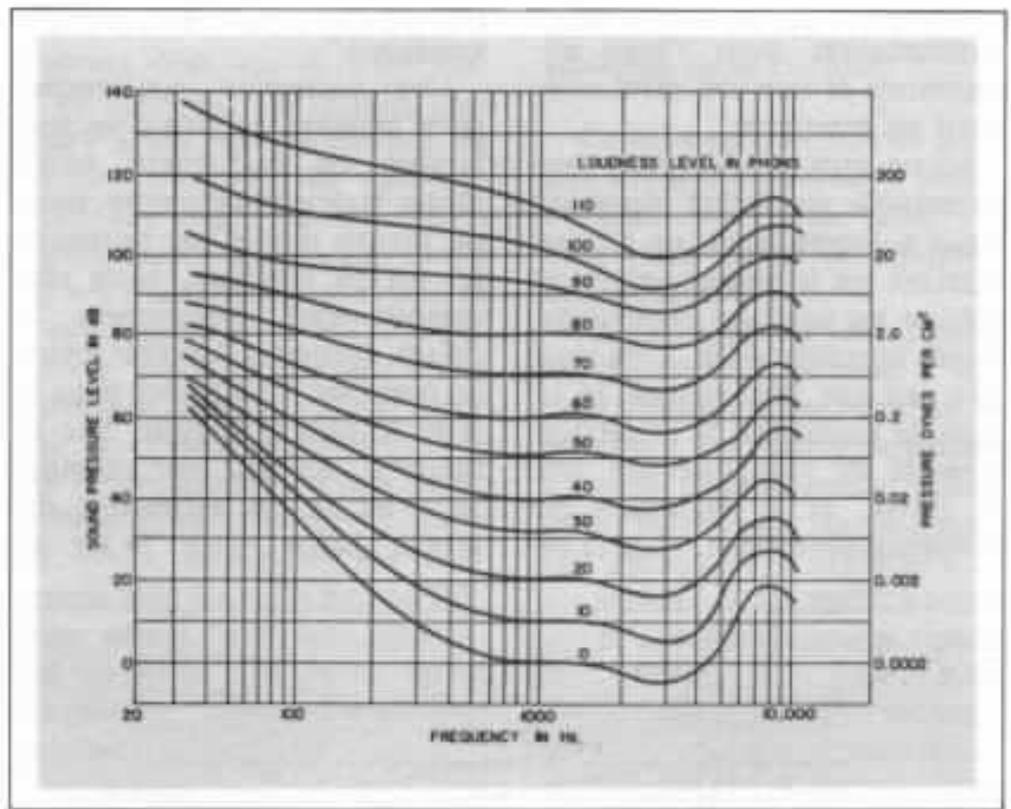


Fig. 3 : Caractéristiques de Churcher et King

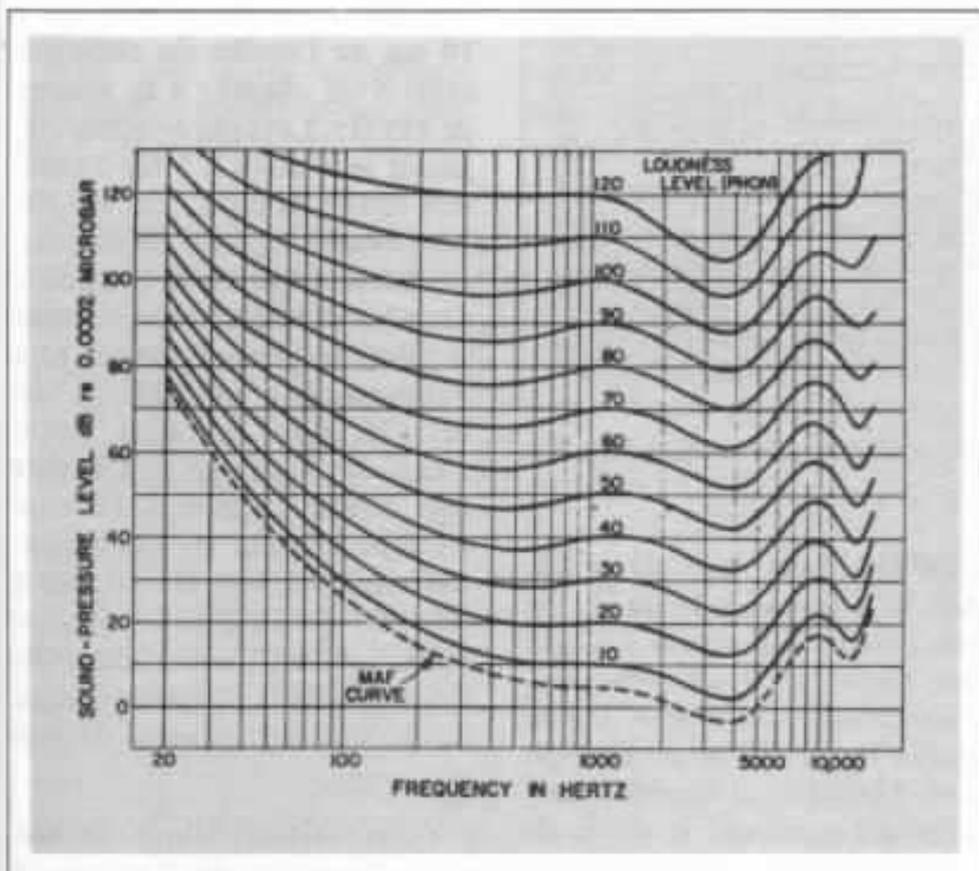


Fig. 4 : Réseau de Robinson et Dadson

Une autre courbe a été proposée encore, celle des anglais Robinson et Dadson (fig 4) où on pourra remarquer cette fois

que les niveaux respectifs en phons correspondent parfaitement aux niveaux en dB, à 1 000 Hz.

Dans cette courbe et par rapport aux précédentes, notons une remontée au-dessus de 12 000 Hz environ, remontée qui n'apparaît pas par exemple dans la courbe de Churcher-King. Une quatrième autre courbe (il y en a bien plus, en fait) existe, qui cette fois, bien qu'étendue sur une plage de fréquences moins large, a par contre l'avantage d'avoir été obtenue non pas à partir de sons purs mais de bruit filtré (fig 5), fut exécutée par le physicien Pollack.

Remarquons à propos de préamplificateurs que les divers correcteurs de « Loudness », de correction « physiologique » ne sont que très simplifiés par rapport aux courbes de compensations réelles, et que les diverses corrections ne font en fait que retoucher le secteur grave. De plus la remontée, correction à faire devrait s'amorcer à partir de 3 000 Hz environ, au lieu de 200 à 1 000 Hz pour la plupart des correcteurs. Mais quelques

essais montrent que la correction physiologique dans l'aigu est nécessaire et que son effet subjectif est prononcé.

Ici un gros problème est que l'éventuelle correction physiologique à commutateur ou à prise médiane sur le potentiomètre de volume ne tient pas compte du niveau acoustique réel. Cela veut dire, vu que l'on connaît ni le gain, la puissance, la sensibilité d'entrée de l'amplificateur qui va suivre, ni le rendement de l'enceinte acoustique, ni la taille

de correction physiologique, toutes variables).

Une correction continuellement variable, à l'aide d'un seul bouton de manœuvre serait idéale, et devrait permettre, pour un niveau donné, de retrouver un parfait équilibre. Mais ceci compliquerait sérieusement le circuit, surtout si l'on veut tenter de respecter des courbes dans le style Robinson-Dadson. Sur la figure 2, on voit par exemple qu'à 80 dB, la différence du niveau perçu entre 50 Hz et

majorité, de beaucoup, au-dessous de 100 Hz. A quand le progrès décisif dans ce domaine ?

### Fréquence/Hauteur du son perçue.

Il paraît normalement tout à fait évident que la sensation de hauteur d'un son dépend de sa fréquence. Comme pour l'intensité on obtient ici aussi une progression logarithmique. De là il pourrait sembler facile de passer de la mesure d'une fréquence à la mesure de sa sensation de hauteur relative. Ceci dépend en fait de la tessiture où se trouve le son en question, c'est-à-dire s'il s'agit d'un son grave, médium ou aigu.

Le paradoxe vient de la vieille expérience du diapason. Placé à 10 cm de l'oreille du chanteur, celui-ci va chanter à la hauteur de 435 Hz. Lorsque ce même diapason sera placé à 3 m, il chantera cette fois juste, soit 440 Hz. Autrement dit, pour les fréquences inférieures à 1 000 Hz, plus le niveau sera intense et plus, (pour la même fréquence) le sujet aura l'impression d'entendre un son bas. Si, donc les sons graves « baissent » au fur et à mesure que niveau augmente, l'inverse est à noter pour les sons aigus. Un son de 8 000 Hz produit à 40 et 80 dB va donner ainsi un écart subjectif important (voir fig. 6) laissant supposer que ce même son a « monté » de plus d'un ton.

Cette caractéristique de non linéarité de l'oreille à propos de la hauteur subjective vis-à-vis du niveau acoustique a été établie par S.S. Stevens, de l'université de Harvard, une importante autorité en matière de psychophysique.

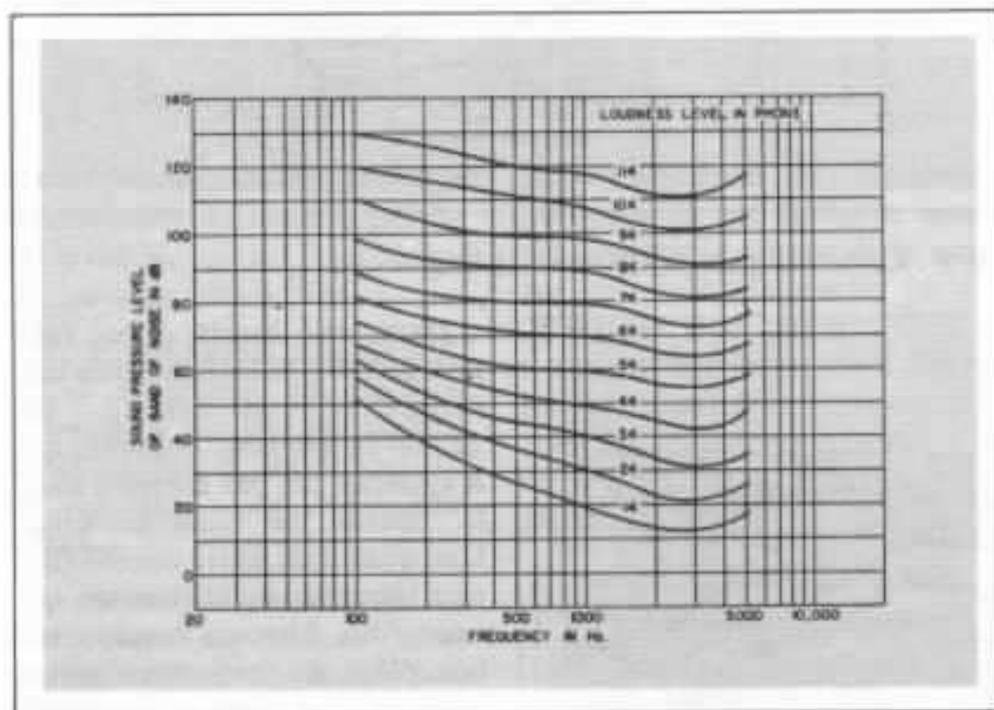


Fig. 5 : Réseau de Pollack exécuté sur la base d'un bruit filtré et non pas d'un son pur

de la pièce d'écoute, que cette correction ne pourra être faite que d'une façon très grossière. A cet effet, il est étonnant de voir qu'à l'heure actuelle aucun préamplificateur, même de très haut de gamme, ne possède de tel correcteur. Le seul préamplificateur permettant, à peu de choses près, de répondre à ces exigences en correction physiologique est le préamplificateur Taki, à tubes dont un défaut est par contre une manipulation peu aisée (plusieurs commandes pour la cor-

rection physiologique, toutes variables). Mais si le niveau à 1 000 Hz est réduit à 40 dB, le niveau à 50 Hz doit passer à 72 dB pour être perçu de façon identique. Sur la courbe de la fig. 4 et à 40 dB pour 1 000 Hz, il faudrait normalement remonter le grave de 57 dB à 20 Hz pour corriger « physiologiquement » bien. On voit donc que l'on est loin des niveaux de correction effectuée sur les appareils courants, d'autant plus que les enceintes acoustiques chutent, pour leur

A cette non linéarité fréquence/ hauteur perçue, il faut ajouter un autre facteur, celui du temps, qui va aussi intervenir dès l'instant où ces sons produits, à différents niveaux, donc déjà sujets à ces « illusions auditives », vont être cette fois raccourcis à moins de 0,1 seconde. Sur la figure 7 le son de 1 000 Hz sera donc perçu comme un son de 850 Hz s'il est réduit à une tranche de 0,01 seconde. Ceci a également été découvert par S.S. Stevens, et Ekdahl de l'université de Harvard. Ces deux découvertes ont été respectivement faites en 1935 et 1937.

Pour continuer sur cette question de linéarité il faut aussi penser, comme le dit Stevens, que ces courbes ne sont pas absolues mais peuvent changer selon l'individu et l'état psychique de celui-ci.

Mais une autre expérience nous montre encore qu'un générateur produisant un son de

4 000 Hz ne sonne pas du tout à l'octave d'un son de 2 000 Hz. C'est ainsi que fut établie, toujours grâce aux recherches de Stevens une nouvelle unité, le MEL (du mot « mélodie »). La figure 8 montre l'allure en forme de « s » que prend la correction fréquence/mels. A cela, l'explication physique venait d'une extension des recherches faites par Von Bekesy (dont les travaux sur le fonctionnement de l'oreille interne lui valurent le prix Nobel en 1961), recherches qui donnaient bien pour des hauteurs de sons perçus également espacés, des points de stimulation sur la membrane basilaire de l'oreille interne régulièrement espacés.

A ce propos il est à rappeler que ce qu'on appelle la « diplacoustie » signifie que certains sujets entendent une hauteur de son différente pour chaque oreille (de même que cela existe pour la vue et la perception des couleurs).

## Distorsion de direction ou de position dans l'espace

Ce sujet ne peut-être ici traité que très brièvement car il touche un autre sujet très vaste, très intéressant qu'est la reproduction binaurale.

A ce propos, en plaçant devant un sujet et côte à côte deux diapasons, dont l'un est de fréquence légèrement supérieure à l'autre, cette différence, provoquant entre autre un battement va, également « déplacer » la source sonore de gauche à droite (alors que les diapasons restent au centre). De nombreuses autres expériences, plus récentes, montrent également que certaines formes d'enveloppes sonores peuvent procurer des déplacements en direction ou en position. Toujours à propos de cette distorsion de position signalons un autre phénomène assez courant sur les disques stéréo : dans un opéra, un concerto, il arrive

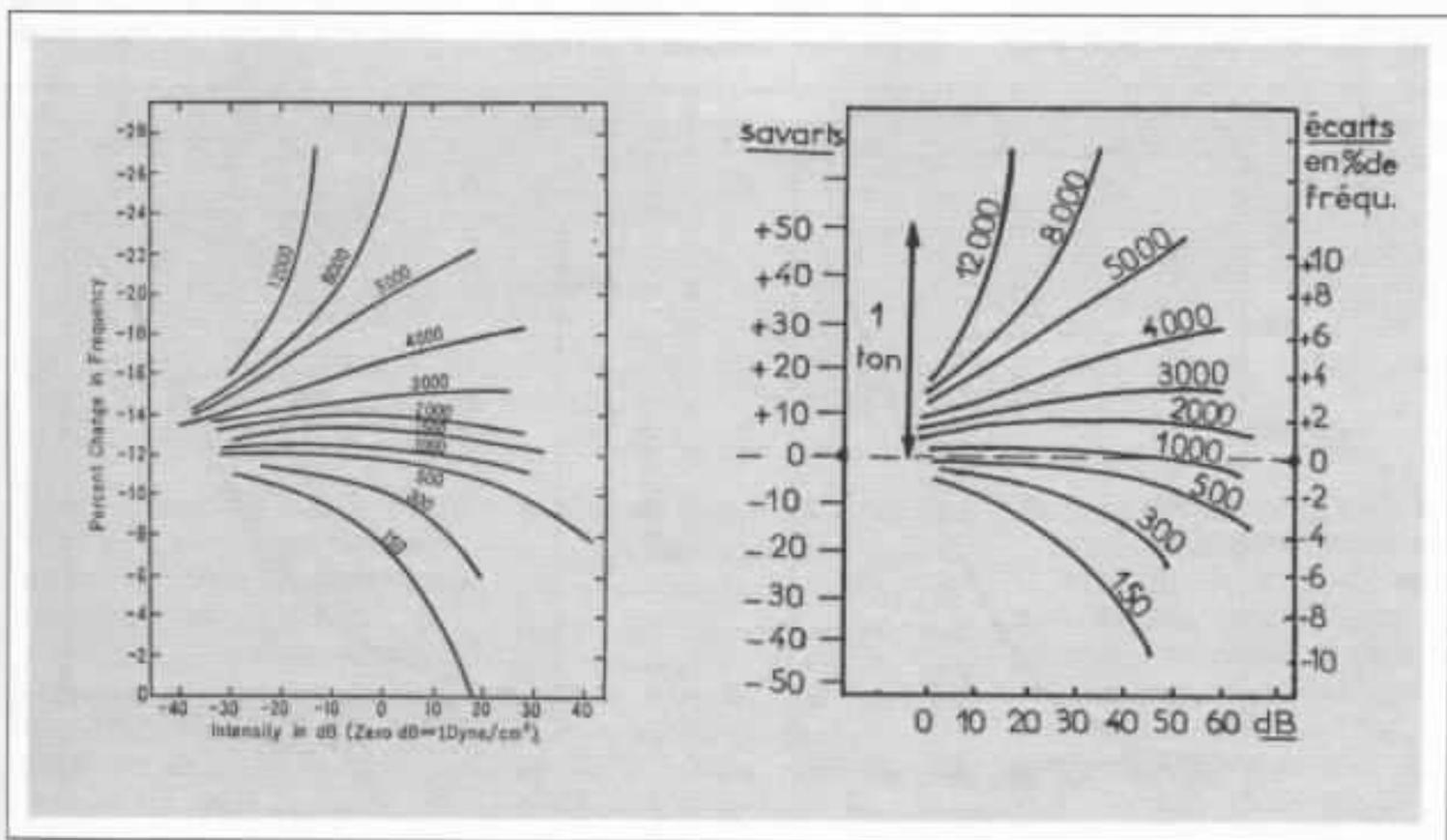


Fig. 6 : Hauteur subjective perçue en fonction du niveau acoustique

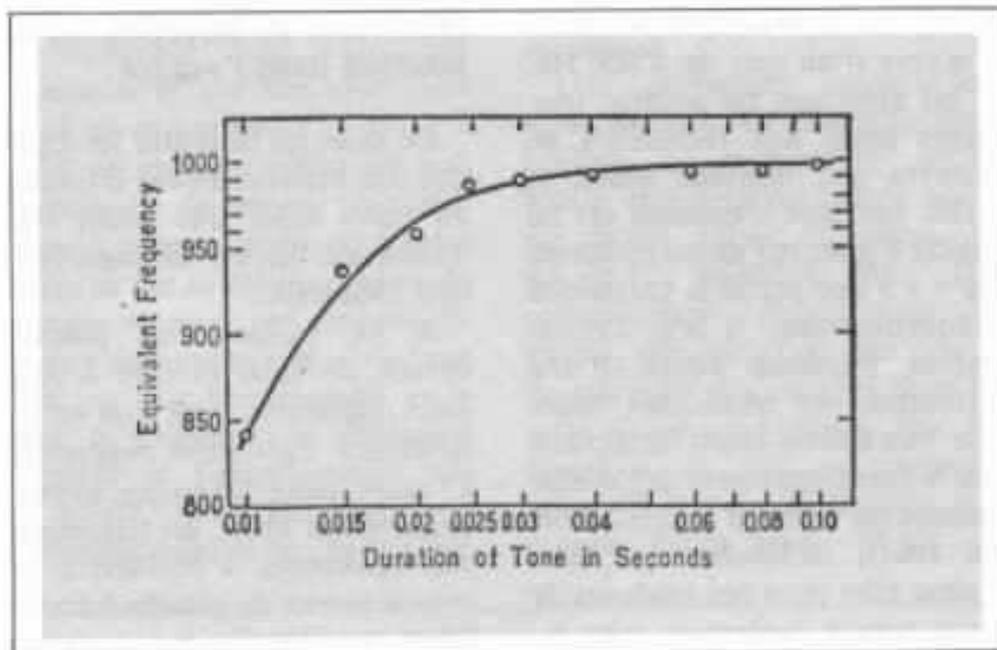


Fig. 7 : Fréquence perçue en fonction de la durée du signal

que le soliste soit enregistré en monaural et réinjecté sur les deux canaux. Pour une question d'esthétique sonore, il est alors très souvent fait appel aux chambres d'écho. Or on s'est aperçu qu'en augmentant l'intensité de cet écho, la source sonore (le soliste) qui était bien au centre, entre les deux haut-parleurs avait

tendance à « monter ». En déplaçant cette source sonore de droite à gauche (par mixage) cette source semble en effet monter, en suivant un arc de cercle vertical. Cet effet a été baptisé par José Bernhart et J.W. Garret « d'effet J ».

Mais bien que nous nous soyons tous habitués à la repro-

duction stéréophonique, il est bien normal qu'à ses débuts (1958 environ) tout le monde trouvait très étrange le fait de pouvoir entendre des « sources sonores fictives » entre deux haut-parleurs.

### Effet de masque

Lorsque deux personnes, dans un train bruyant essaient vainement de se parler, malgré l'élévation de leurs voix, ces personnes sont soumises à l'effet de « masque ». Autrement dit le son de la locomotive « absorbe » la voix en rendant celle-ci faible et incompréhensible.

Cet effet a été décrit en détail par Wegel en 1924. Un autre physicien, ami de Wegel, Lane participa lui aussi à ces expériences. Sur la figure 9, on voit par exemple un son de 80 dB (intensité subjective) (A) qui va masquer d'autres fréquences (B) et provoquer aussi des zones de battements

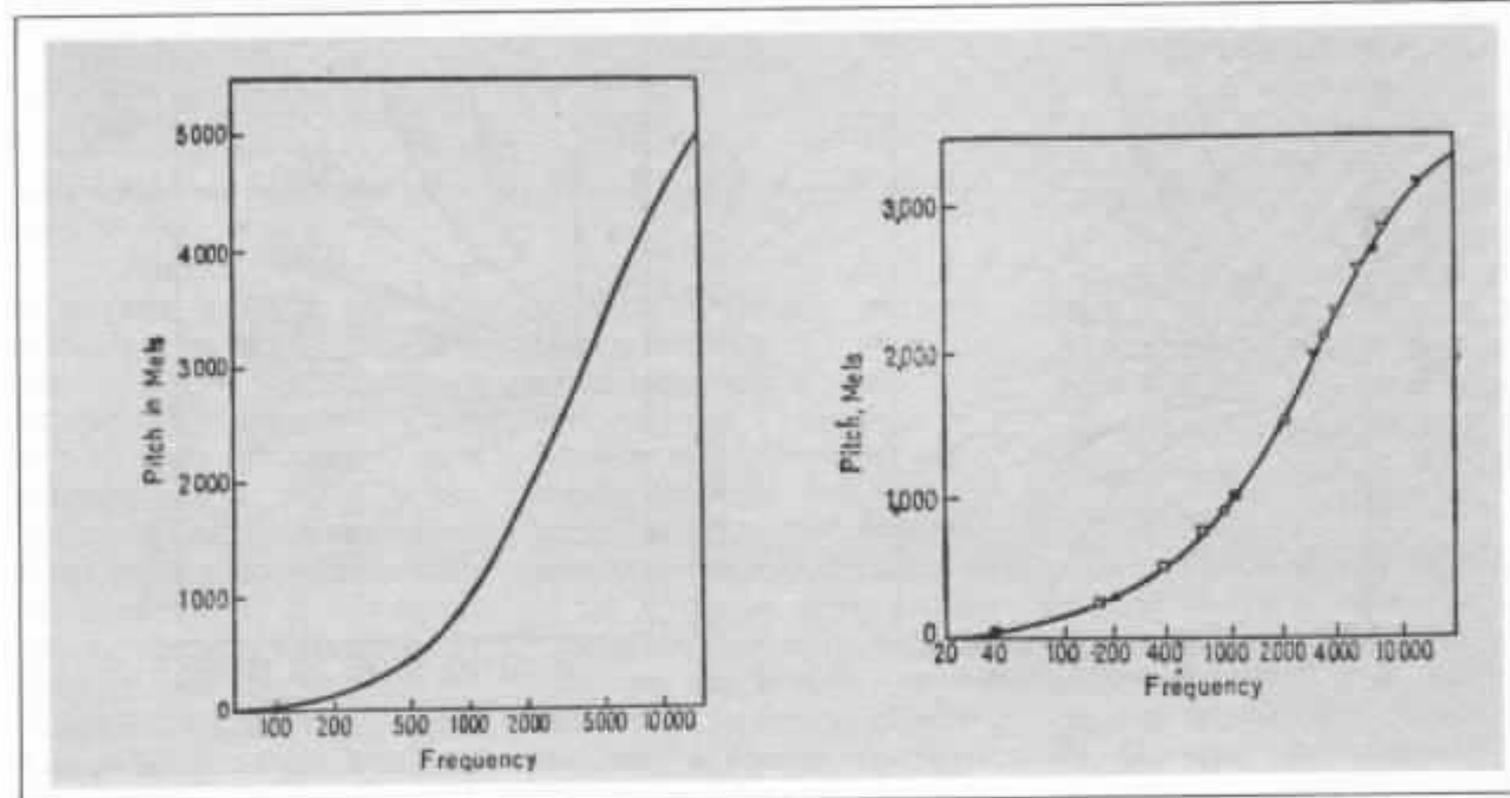


Fig. 8 : Relation Mels/fréquence, à gauche en 1937, à droite en 1940

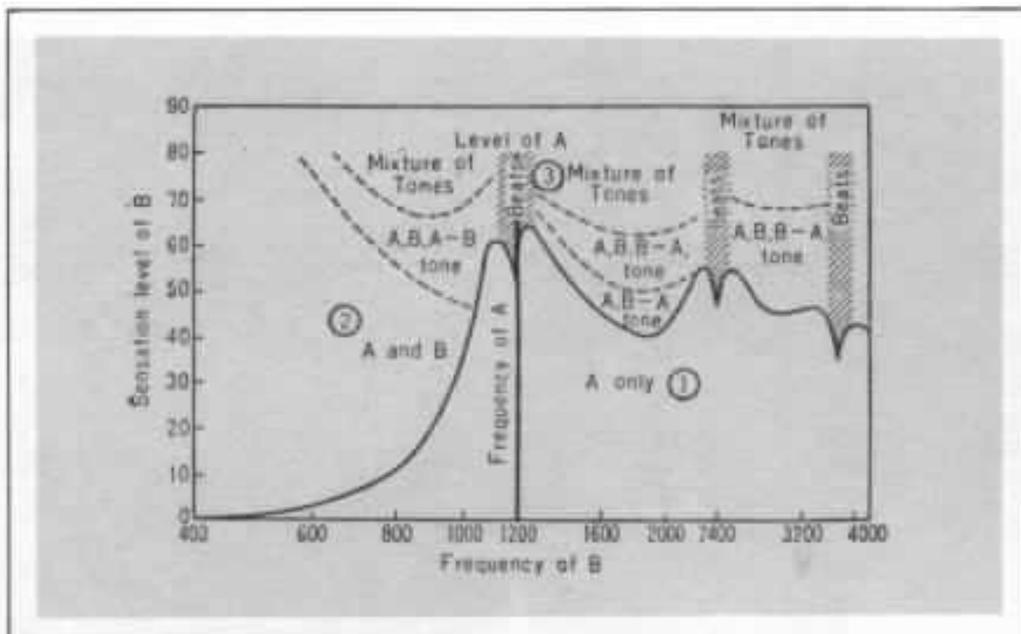


Fig. 9 : L'effet de masque, un son (A) de 1 200 Hz et de 80 dB provoque un masque sur les fréquences voisines ainsi que des battements zones hachurées

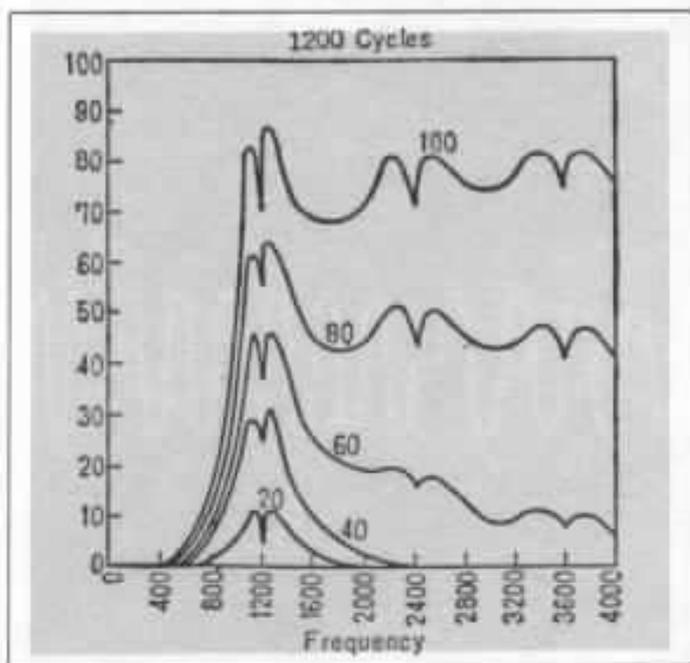


Fig. 10 : Effet de masque d'un signal de 1 200 Hz sur la bande de fréquence 400 - 4 000 Hz pour différents niveaux en décibels.

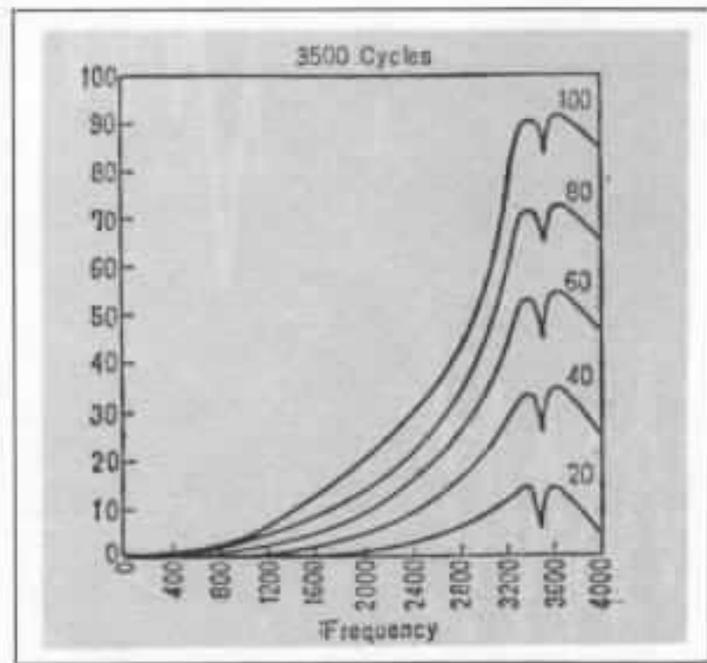


Fig. 11 : L'effet de masque varie avec la fréquence du signal, ici 3 500 Hz

(zones hachurées). Sur la figure 10 on peut voir l'effet de masque (en dB) provoqué par cette même fréquence de 1200 Hz, par d'autres fréquences comprises entre 400 et 4 000 Hz, ceci lorsque le signal de 1 200 Hz se situe à 100, 80, 60, 40 et 20 dB. Si cet effet n'est plus sensible au-dessous de 400 Hz, celui-ci est prononcé pour les fréquences

médium et aigues. Cela signifie, pour les haut-parleurs en particulier que les plus légères irrégularités de la courbe de réponse (en fréquence glissante, en réponse retardée) vont jouer un rôle prépondérant dans cet effet de masque. Noter que pour des fréquences différentes les courbes prennent une allure tout à fait différente, à l'exemple de la

figure 11 (fréquence A = 3 500 Hz).

Pour conclure ce court article, il est donc aisé de comprendre que les lois qui régissent ces notions « perçues » de hauteur, de fréquence, de niveau, ne sont pas définissables par des lois mathématiques simples, mais que l'oreille, bien que « peu linéaire » est malgré tout un instrument irremplaçable.

**Page non  
disponible**

# L'approche du subjectif

## Evaluation perceptive

### 1ère partie

*Gustavo Altieri*

*Il est désormais admis que les mesures dont on dispose pour évaluer la qualité d'un matériel audio ne sont pas suffisantes pour caractériser le rendu sonore de celui-ci. Il nous reste notre système perceptif...*

*Une équipe suédoise a dernièrement mis au point une méthode d'analyse extrêmement rigoureuse pour quantifier les impressions subjectives, d'un groupe d'auditeurs en écoute attentive.*

*Voici la première partie de cette étude. Nous essaierons dans le futur de l'adapter à nos expériences d'écoute.*

Dans notre rubrique «l'approche du subjectif», nous avons exposé les fondements du processus de perception auditive dans le but d'interpréter le fonctionnement d'un système de reproduction sonore sous l'angle du rapport stimulus-récepteur biologique. Nous sommes arrivés, maintenant, au traitement du problème de fond : la concrétisation d'une méthode systématique d'évaluation des qualités

d'un dispositif électroacoustique en utilisant le *récepteur humain comme élément unique d'appréciation*. Ce problème est posé sous des aspects divers :

- choix des stimuli.
- mode de présentation des stimuli.
- nombre et qualités des sujets participants.
- mode d'intervention des sujets.

- traitement des données.
- interprétation des résultats.

A ce sujet, notre recherche personnelle est orientée par les travaux de T. Koshikawa, Nakayama, Fisher, et surtout par les contributions plus récentes de Gabrielsson, Sjögren et Rosenberg.

Une équipe suédoise intégrant les compétences des psychologues, audiologistes et ingénieurs a mis au point un critère de choix

de stimuli qui mérite une étude en détail. La méthode est utilisée dans les tests de haut-parleurs et de casques.

Les stimuli correspondent à des morceaux de musique, de textes parlés et de bruits de l'environnement enregistrés sur bande magnétique. L'émission a une durée de 30 secondes et elle présente une homogénéité en ce qui concerne le niveau et le motif sonores.

Dans cette première approche, notre attention est centrée sur les haut-parleurs. Ceux-ci sont représentés par des réalisations de différentes dimensions et ayant des puissances admissibles, taux de distorsion et caractéristiques de réponse particulières.

Dans l'expérimentation de Gabrielsson et Sjögren, le nombre total de stimuli est donné par le produit du nombre de types de signaux par le nombre de systèmes de reproduction utilisés. Le niveau d'émission correspond approximativement au niveau d'enregistrement original et la diffusion est faite en monophonie.

### L'intervention des auditeurs

Pour chaque expérience de l'équipe suédoise, on a compté sur la collaboration d'un nombre assez important d'auditeurs, de 20 à 42. Parmi eux, deux ou trois participent ensemble à un essai. L'émission, présentée sous forme aléatoire, doit être appréciée sous trois aspects différents :

- jugement de l'écoute en donnant une valeur propre à des propriétés pré-établies.
- comparaison de systèmes.
- jugement libre de la qualité sonore.

Adjectives	Factors		
	I	II	III
Avlägsen ("distant")	0.88	0.21	-0.19
Balanserad ("balanced")	-0.74	-0.58	-0.01
Behaglig ("pleasant")	-0.70	-0.07	-0.11
Beslötad ("voiced")	0.92	0.09	0.21
Brusig ("noisy/hissing")	0.32	0.31	-0.22
Bullrig ("noisy/rumbling")	0.27	0.55	0.73
Detaljrik ("rich in details")	-0.91	-0.27	0.01
Diffus ("diffuse")	0.89	0.30	0.20
Dov ("dull")	0.55	-0.14	0.76
Dämpad ("subdued/moderated")	0.90	-0.31	0.20
Fyllig ("full/full-toned")	-0.85	-0.27	0.29
Genomskiallig ("transparent")	-0.01	0.31	-0.64
Grumlig ("muddy/confused")	0.80	0.48	0.28
Grötig ("mushy/thick")	0.75	0.55	0.25
Gäll ("shrill")	0.25	0.88	-0.29
Hård ("hard")	0.27	0.92	-0.09
Hölig ("hollow")	0.82	0.46	-0.16
Inslängt ("closed/shut up")	0.85	0.18	0.10
Jämn ("uniform/smooth")	-0.67	-0.63	-0.04
Klar ("clear")	-0.67	-0.40	-0.16
Kontrasteik ("rich in contrasts")	-0.04	-0.17	0.02
Kraftig ("strong/loud")	-0.66	0.47	0.47
Kylig ("chilly")	0.43	0.68	-0.50
Ljus ("bright/light")	-0.23	0.38	-0.83
Lufdig ("airy")	-0.91	-0.20	-0.16
Matt ("faint/freht")	0.98	-0.02	-0.11
Mjuk ("soft")	-0.39	-0.85	0.11
Mullrande ("rumbling")	0.17	0.40	0.88
Mustig ("juicy/succulent")	-0.79	-0.11	0.48
Mörk ("dark")	0.08	-0.21	0.93
Naturtrogen ("true to nature")	-0.94	-0.47	0.01
Nära ("near")	-0.82	-0.35	0.17
Punktformig ("confined to a point")	0.78	0.30	-0.18
Påträngande ("obtrusive")	0.26	0.90	0.17
Ren ("clean/pure")	-0.85	-0.41	-0.08
Rumakänsla ("feeling of room")	-0.90	-0.29	0.01
Skarp ("sharp")	-0.16	0.85	-0.35
Skrapande ("scraping")	0.61	0.60	-0.03
Särskrig ("screaming")	0.46	0.87	-0.11
Skrövlig ("rough/rancous")	0.75	0.53	0.19
Skrällig ("clashing")	0.48	0.85	0.00
Skränig ("yelling/voiciferous")	0.41	0.89	0.02
Spetsig ("pointed")	0.37	0.86	-0.35
Sprucken ("cracked")	0.67	0.67	-0.01
Stark ("loud")	-0.52	0.68	0.42
Sträv ("harsh")	0.75	0.49	-0.04
Suddig ("blurred")	0.86	0.41	0.18
Torr ("dry")	0.85	0.24	-0.20
Trång ("narrow")	0.80	0.37	0.04
Trötande ("tiring")	0.81	0.74	0.11
Tunn ("thin")	0.64	0.46	-0.52
Tydlig ("distinct/clear")	-0.80	-0.53	-0.19
Tät ("dense")	-0.39	-0.12	0.78
Vass ("sharp/keen")	0.24	0.88	-0.26
Vägen ("vague")	-0.92	-0.22	-0.12

Liste des 55 adjectifs utilisés lors des expériences de Gabrielsson et Sjögren. L'original suédois est suivi de la traduction anglaise. Nous travaillons à l'élaboration d'une liste de valeurs équivalentes en langue française. Les résultats seront discutés dans les prochaines publications.

Dans le premier type de réponse, le sujet doit établir une classification de 0 à 9 pour chaque adjectif qui lui est présenté lors de l'écoute. Le 0 signifie que la qualité désignée par l'adjectif correspondant est totalement inexistante, tandis que le 9 signale une présence imposante de la propriété en question.

Les adjectifs ont été choisis parmi l'éventail d'expressions couramment utilisées par les acousticiens et les audiologistes.

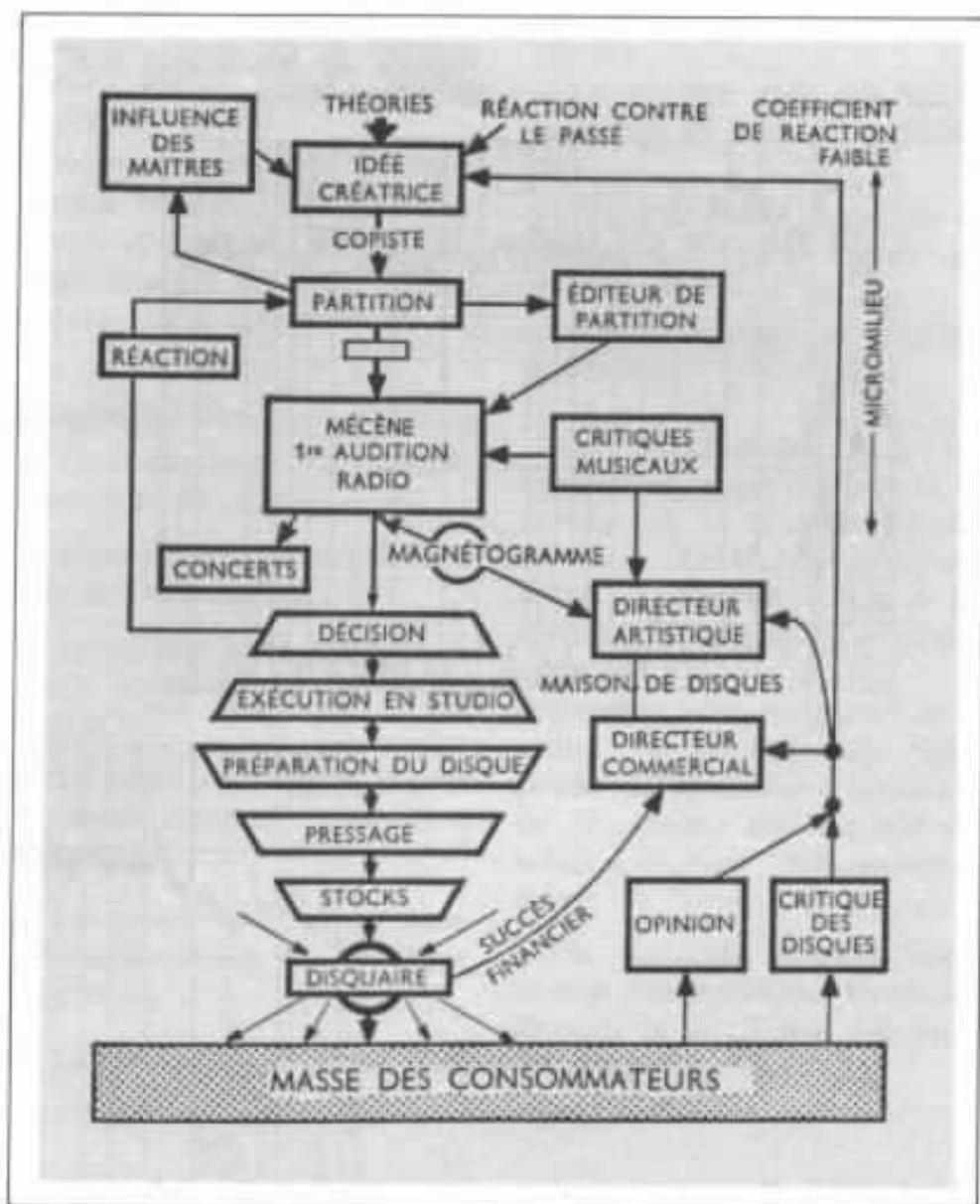
Nous reproduisons les expressions en langue anglaise, qui sont en même temps traduites du suédois. Nous estimons qu'une retraduction en français peut devenir une source importante d'erreurs. En même temps, il existe un risque de perdre (ou de rajouter) des nuances capables de défigurer le sens de la transposition de l'image acoustique en communication écrite.

Nous préférons aborder une voie originale qui consisterait à formuler une liste d'expressions françaises dans la même orientation que les travaux étrangers signalés. Faisant partie du développement de notre recherche, nous induirons dans nos publications futures les listes d'adjectifs en langue française s'intégrant aux évolutions des systèmes acoustiques.

Lors des tests de comparaison, les émissions sont présentées par paire, avec un intervalle d'une seconde entre elles. Les auditeurs doivent établir le degré de similitude entre les stimuli, selon une échelle de 0 à 100. Si on appelle «S» le nombre de systèmes à tester, il y a :

$$2$$

paires à comparer.



Il est important de signaler qu'il existe une différence fondamentale entre les essais de laboratoires et les évaluations de la qualité d'une chaîne haute-fidélité, dans les conditions d'écoute domestique.

L'expérience scientifique est réalisée à l'aide d'enregistrement étalon sur bande, tandis qu'un système normal est essayé avec des disques du commerce. C'est-à-dire que la comparaison du son obtenu avec la réalité, passe au travers d'un support de l'information (le disque) qui est loin d'être neutre.

La figure ci-dessus, représente un schéma élaboré par A. Moles (sociodynamique de la culture, Marton 1967) où sont indiqués les facteurs très divers, tels ceux d'ordre économique-culturel qui interviennent dans l'élaboration du disque en tant que produit commercial. Le schéma est valable pour la musique classique.

Si P est le nombre de stimuli diffusés, le nombre de tests à réaliser sera donc :

$$P = \frac{S(S-1)}{2}$$

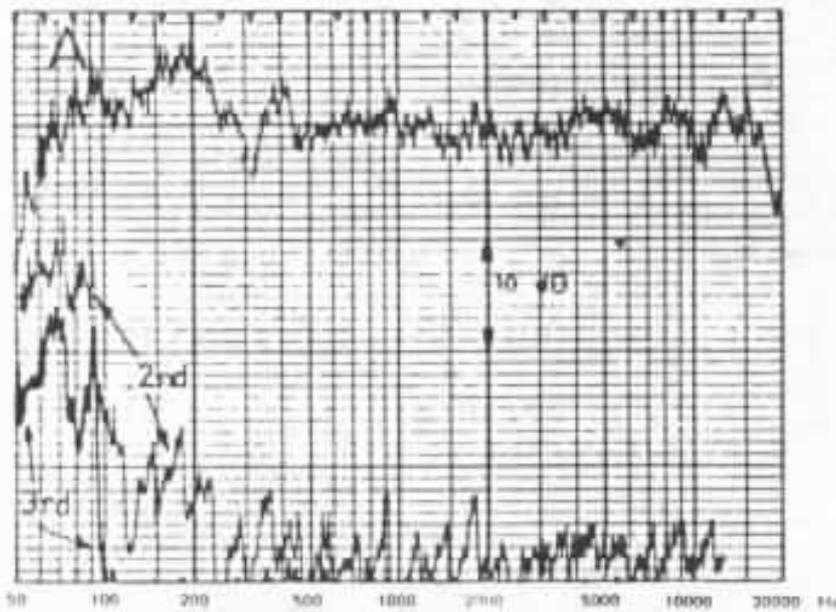
L'ordre des essais présentés est aléatoire et chaque paire est séparée de la suivante par un intervalle de 6 secondes. L'expé-

rience est, aussi, répétée plusieurs fois pour accentuer la fiabilité des résultats.

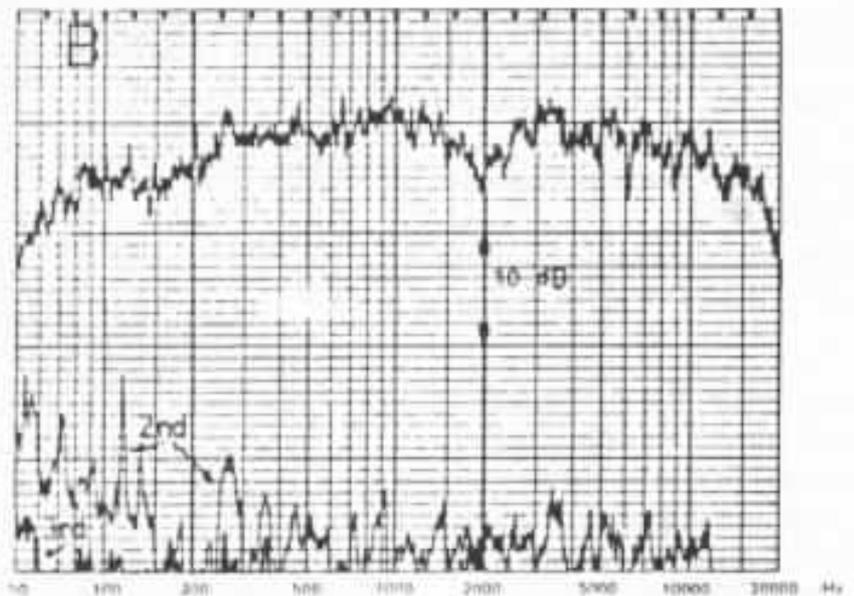
#### Le traitement des données

Les travaux de Winer (Statistical Principles in Experimental Design) constituent la base d'un type de calcul que nous n'expo-

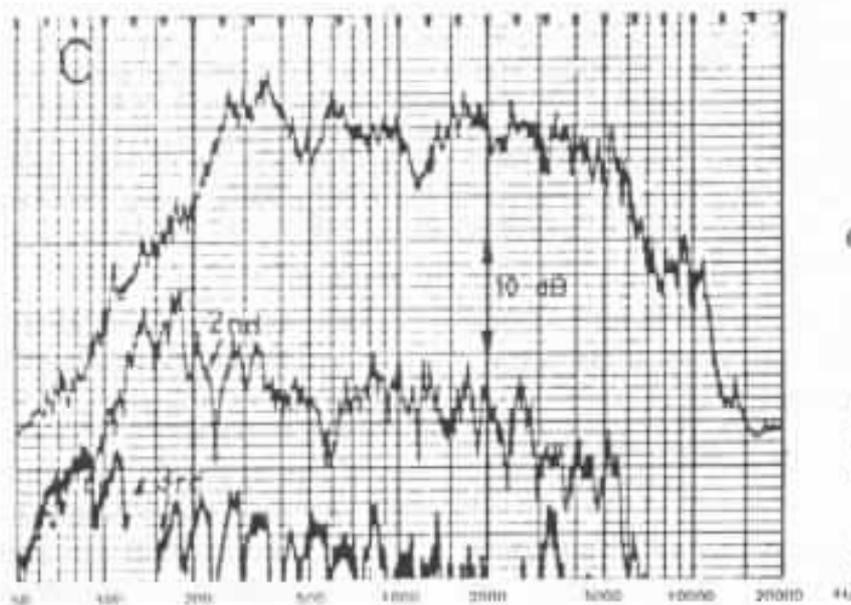
*Réponse des haut-parleurs dans une  
chambre réverbérante :*



*A : système électrostatique.*



*B : omnidirectionnelle.*



*C : radio-récepteur.*

*Les trois courbes représentent respectivement de haut en bas le premier, le deuxième et le troisième harmoniques de la puissance rayonnée totale.*

*Complémentairement, les auditeurs décrivent les conditions de réception sans aucune contrainte de langage.*

serons pas ici à cause de son faible intérêt général et du haut degré de spécialisation requise pour manipuler les éléments de travail. L'analyse factorielle qui suit le traitement des résultats a été développée par R. Gorsuch. Les publications de cet auteur ainsi que celles de Gabrielsson, Rosenberg, Sjögren et Frykholm (Reports from Technical Audiology - Karolinska Institutet, Stockholm) constituent une bibliographie fondamentale pour le lecteur intéressé par une étude plus détaillée de ce sujet.

#### **Déroulement des expériences.**

Les stimuli présentés aux auditeurs étaient les suivants :

- Blondahl : musique du ballet Sisyfos, orchestre philharmonique de Stockholm, Antal Dorati. Niveau moyen 95 dB SPL.

- Glazunov : «Prélude et Fugue» en do mineur, chorale. Orgue : Erik Lundkirst, église de Nätra. Niveau moyen 90 dB SPL.

- Honegger : sept pièces brèves, commencement de la septième pièce. Herta Fisher. Niveau moyen 90 dB SPL.

- Musique folklorique suédoise. Niveau moyen 85 dB SPL.

- Voix d'homme, texte lu dans une chambre sourde. Niveau moyen 65 dB SPL.

#### **Systèmes de reproduction utilisés**

— Haut-parleurs électrostatiques de haute qualité.

— Haut-parleurs omnidirectionnels de haute qualité.

— Le système précédent avec les aigus accentués de 6 dB à 10 000 Hz.

— Le même système, mais avec les aigus diminués de 6 dB à 10 000 Hz.

— Le système est modifié avec une accentuation de 10 dB à 100 Hz.

— Le système est modifié avec

une diminution de 10 dB à 100 Hz.

— Le système avec une incrémentation de 30% de la distorsion.

— Nouvelle modification de la distorsion : 50% autour de 300 Hz

— Radio-récepteur de qualité moyenne.

Les modifications dans les basses fréquences ont affecté le premier et le deuxième motif musicaux. Les autres modifications ont été utilisées lors de la diffusion de tous les types de stimuli.

Pendant les expériences, on a utilisé 55 adjectifs et, étant donné que le nombre d'essais est de 36, chaque auditeur (20 au total) a exprimé 1980 appréciations.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau. Ils seront discutés en détail dans nos prochaines publications.

**Page non  
disponible**

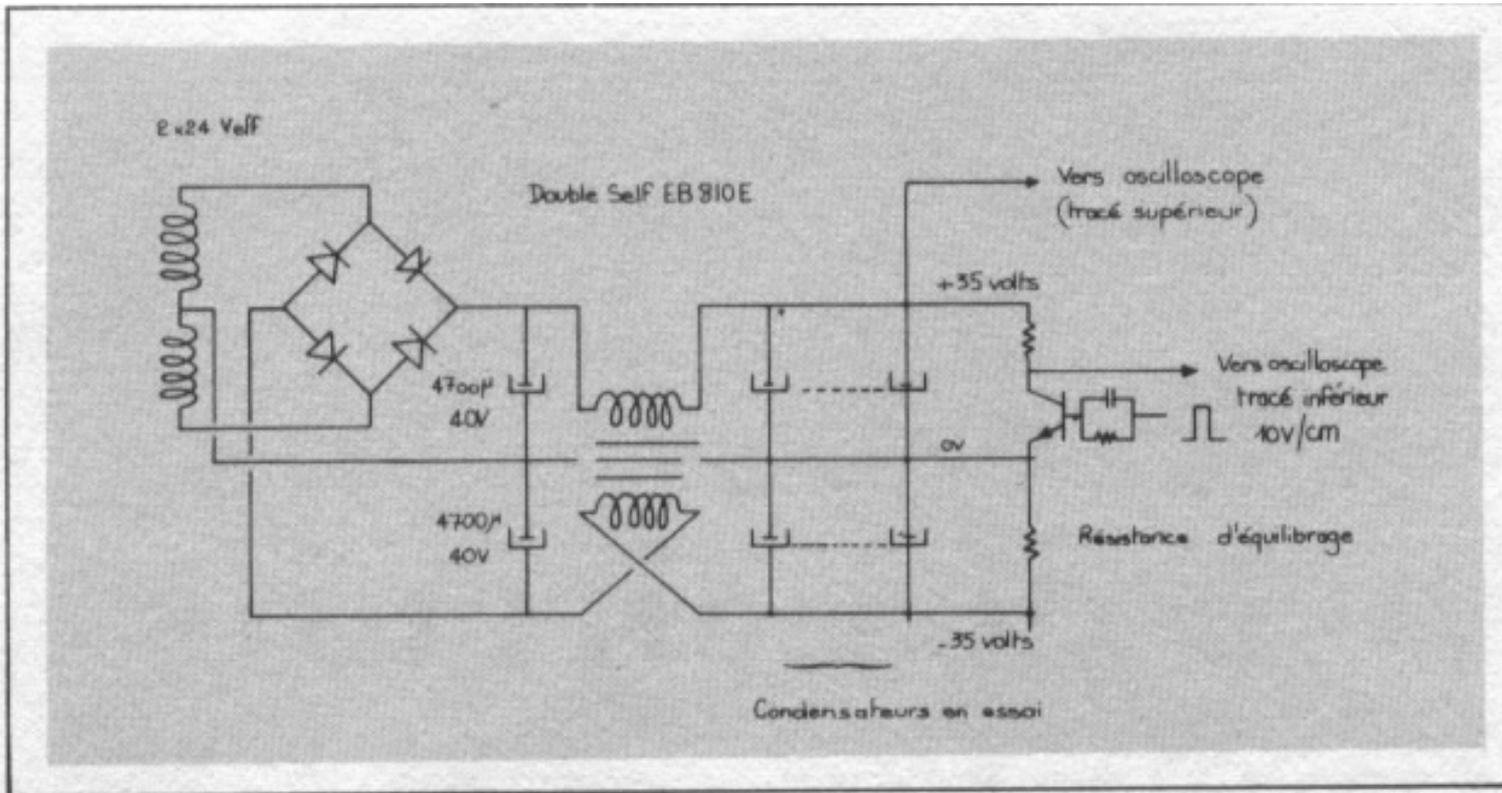


Fig. 1 : Circuit d'essai et circuit de charge