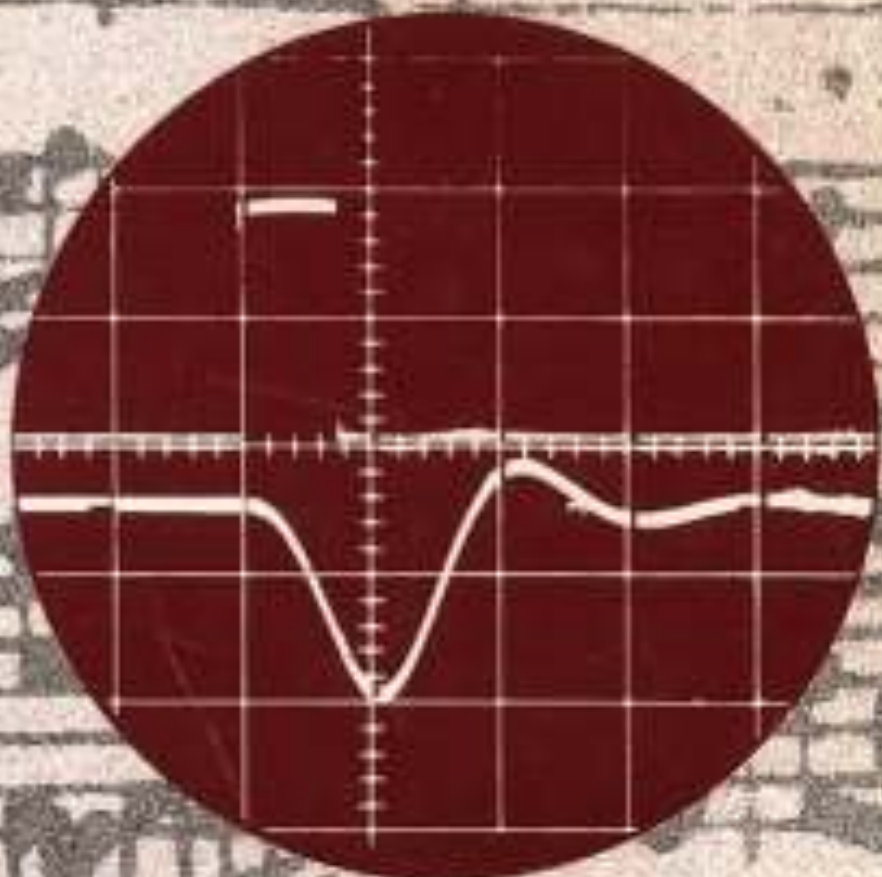
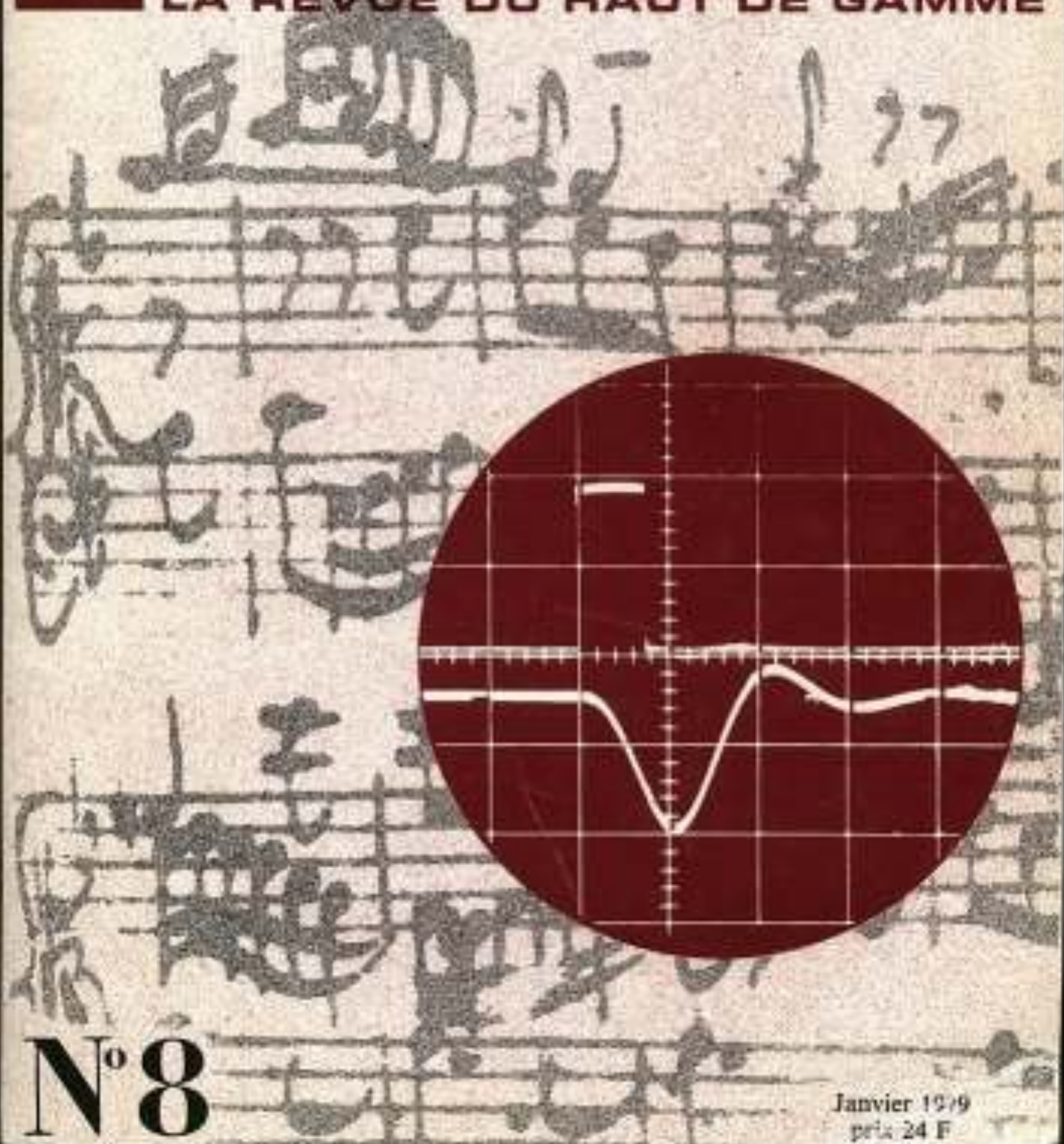


L'AUDIOPHILE

LA REVUE DU HAUT DE GAMME



N° 8

Janvier 1979
prix 24 F

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

Un égaliseur graphique

à dix fréquences réglables

Jean Hiraga

Le but de l'égaliseur dit « graphique » est de corriger les principaux défauts de linéarité de la pièce d'écoute, des haut-parleurs et des autres maillons présentant un défaut de non linéarité. On y arrive tant bien que mal, et en général très bien sur une chaîne de moyenne qualité dans une pièce d'écoute quelconque.

L'égaliseur « graphique », qui doit se mettre en série entre le préamplificateur et l'amplificateur « allonge » le circuit et ne peut donc améliorer les caractéristiques de distorsion ou de réponse transitoire, même si ces défauts restent presque inaperçus. Mais même sur les meilleures chaînes, on note que dans 90 % des cas, l'insertion d'un bon égaliseur oblige l'auditeur à se mettre, après de longues hésitations et essais de nombreux disques, sur une position des différents contrôles qui sera autre que linéaire.

Ceci ferait penser qu'un tel accessoire serait donc « indispensable » à une chaîne, même de très haut niveau. Oui et non. Oui, parce que c'est un bon moyen de mettre en évidence des défauts de linéarité qui n'étaient pas « ressentis auparavant », oui, parce que la détection de ces défauts permet, même si le temps consacré est long, d'en situer la ou les sources d'origine. Non, parce que, après avoir localisé ces défauts, il y a possibilité d'y remédier dans presque tous les cas. Y remédier veut dire que cet accessoire deviendra un jour inutile, sauf pour faire quelques compensations de linéarité de certains disques, qui peuvent sembler indispensables.

Un tel égaliseur, dont le véritable but serait d'être supprimé en fin de compte, doit donc répondre à des conditions précises : prix de revient peu élevé, simplicité du circuit, modification facile des fréquences d'égalisation, et si possible bonnes performances électriques et subjectives.

Les premiers circuits égaliseurs

Pratiquement tous les premiers circuits égaliseurs font appel à l'utilisation de nombreuses selfs, dont la combinaison L.R.C. dans un circuit de contre réaction permet de sélectionner la fréquence d'égalisation et de provoquer le « creux » ou la « bosse » que l'on pourra ajuster en amplitude grâce à un potentiomètre à zéro central. Un exemple est le circuit JVC S.E.A. (Sound Equalizer Amplifier) des années 1960, que l'on trouve en figure 1. Il ne comporte que quatre fréquences réglables par canal et demande donc déjà huit selfs devant avoir de faibles tolérances.

Mais quatre fréquences réglables est tout à fait insuffisant pour une chaîne de haute qualité. Une fréquence réglable par octave est souhaitable soit au moins un total de dix fréquences par canal. Deux fréquences réglables par octave serait un peu de trop et risque cette fois de compliquer fortement le circuit. La figure 2 montre comment se choisissent ces fréquences selon que l'on désire des réglages par tiers, par demi, ou par moitié d'octave.

Le choix fait est celui de dix fréquences, respectivement de 40, 80, 160, 320, 640, 1 250, 2 500, 5 000, 10 000 et 20 000 Hertz. Le réglage à 20 000 Hz est pratique notamment pour la correction des phonocroiseurs présentant une remontée dans l'aigu, au-dessus de 15 000 Hz. Dans le grave, 40 Hz est aussi un bon compromis si l'on doit tenir de la longueur de la pièce, du déplacement maximum de la membrane du haut-parleur de grave. En effet, en voulant corriger trop bas, soit vers 16 à 20 Hz, le haut-parleur ne suit plus le signal, même pour un niveau d'écoute moyen, car si l'on désire rendre toute la chaîne linéaire, et surtout compenser la forte chute de niveau de l'enceinte acoustique

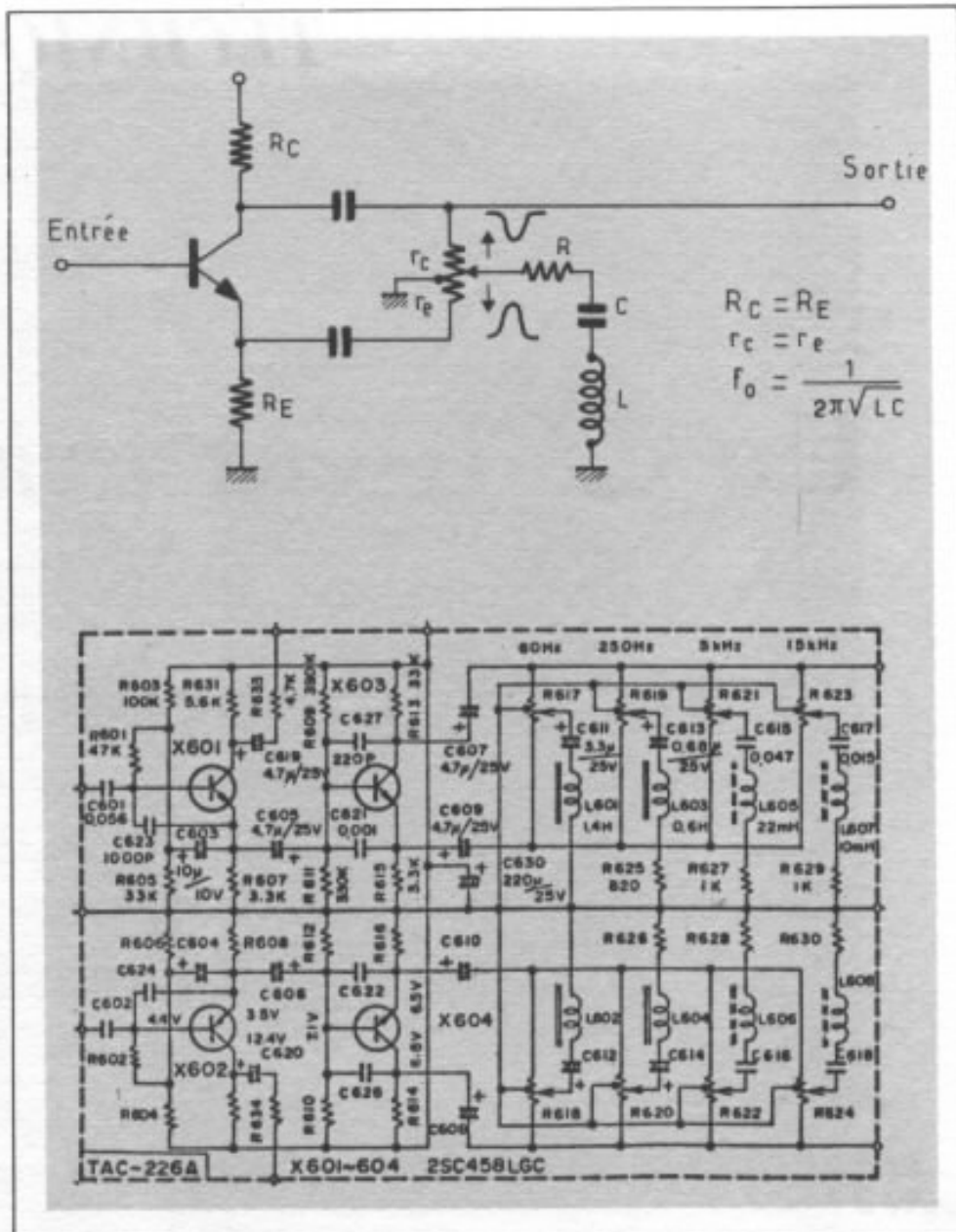


Fig 1 : Le circuit JVC, SEA des années 60

au-dessous de 50 Hz (en général), les elongations de cette membrane deviennent trop importantes. Toutefois en choisissant un filtre comme celui de la figure 1, la réalisation pratique est bien compliquée.

La « pseudo-self »

Depuis plus de 20 ans, on trouve de nombreuses idées de circuits utilisant des résistances, condensateurs et amplificateurs, à tubes comme à transistors, ayant pour but de supprimer et de « remplacer » la self par un circuit équivalent. C'est par

exemple le circuit américain NIC, le circuit « Jayllator ». Ce n'est que vers 1970 que JVC proposa un circuit étudié en collaboration avec la firme japonaise Mitsumi Electric, spécialisée dans la fabrication des bobinages haute fréquence. Ceci permit à JVC de lancer avec grand succès une série d'appareils baptisés SEA (Sound Effect Amplifier) succès qui est toujours actuel.

Regardons la figure 3a. Le signal V_s a pour charge deux résistances série de chacune 100 Ohms. Z_{in} correspond à l'impédance d'entrée, soit 200 Ohms. Sur la figure 3b, on ajoute cette

fois un autre signal de valeur $0,999 V_s$, mais aux bornes d'une des résistances de 100 Ohms. Que devient alors la valeur de Z_{in} Elle sera de :

$$Z_{in} = \frac{V_s}{V_s - 0,999 V_s} = 100 \text{ kohms}$$

C'est le point principal du circuit Mitsumi/JVC. On voit que la résistance Z_{in} de 100 Ohms passe à la valeur fictive de 100 kOhms, vue de l'entrée (fig 3c)

Regardons maintenant la figure 3d, une même tension existe aux points A et C (signal V_s). Dans ce cas quelle sera la courbe d'impédance de Z_{in} en fonction de la fréquence ? Vu que les tensions V_s du circuit 3d sont les mêmes on peut donc l'assimiler au circuit 3a. En courant continu ce circuit aura donc pour impédance Z_{in} , 200 Ohms. Lorsque l'on va monter en fréquence l'impédance « descendante » de C va nous rapprocher au fur et à mesure du circuit 3b et la courbe d'impédance en fonction de la fréquence ayant pour minimum 200 Ohms en courant continu, va prendre l'allure de la figure 3e, c'est-à-dire encore l'équivalent de la figure 3f, une résistance de 200 Ohms et une self en série qui sera vue en tant qu'impédance d'entrée, un circuit pour lequel Z_{in} va monter avec la fréquence.

En reprenant donc la figure 3d on peut réaliser le circuit 3f, qui est le cœur du circuit égaliseur présenté ici, « l'effet de self » par semi-conducteurs, circuit que l'on peut aussi assimiler au circuit « bootstrapp » et qui travaille en fréquence comme une simple self. En jouant sur les éléments passifs R et C on pourra donc simplement modifier la valeur de cette self « fictive ».

La figure 4 montre un circuit concret d'un tel égaliseur à self

fréquence f	PAS OCTAVE	PAS SEMI OCTAVE	PAS TROIS QUARTS OCTAVE	fréquence f	PAS OCTAVE	PAS SEMI OCTAVE	PAS TROIS QUARTS OCTAVE	fréquence f	PAS OCTAVE	PAS SEMI OCTAVE	PAS TROIS QUARTS OCTAVE
16	X	X	X	160	●		X	1600			X
18				180		X		1800			
20			X	200			X	2000	X	X	X
22.4		X		224				2240			
25			X	250	X	X	X	2500	●		X
28				280				2800		X	
31.5	X	X	X	315	●		X	3150			X
35.5				355		X		3550			
40	●		X	400			X	4000	X	X	X
45		X		450				4500			
50			X	500	X	X	X	5000	●		X
58				560				5600		X	
63	X	X	X	630	●		X	6300			X
71				710		X		7100			
80	●		X	800			X	8000	X	X	X
90		X		900				9000			
100			X	1000	X	X	X	10000	●		X
112				1120				11200		X	
125	X	X	X	1250	●		X	12500			X
140				1400		X		14000			
160	●		X	1600			X	16000	X	X	X
								18000			
								20000	●		X

X : fréquences sélectionnées selon les normes I.S.O. (International Standard Organisation)
● : Fréquences choisies pour le présent circuit.

Fig 2 : Choix des fréquences d'intervention

fictive, qui est à la base des premiers circuits SEA de JVC, et utilisant pour Q_1 le transistor 2SA 493, PNP et le transistor Darlington Q_2 2SC 982, dont l'avantage était un H_{fe} très élevé (plus de 10.000), une impédance d'entrée très élevée, donc sans effet gênant sur le premier étage.

Le courant pour Q_1 était de 100 μA , de 10 mA pour Q_2 . La charge de Q_2 étant de 450 Ohms environ et, pour obtenir une tension de sortie de 3 Volts, il faut donc un courant de 10 mA, raison du choix du transistor 2SC

982, transistor «Darlington»

mais se présentant comme un transistor courant.

En revenant aux figures 3g, 3h, 3i, 3j et 3k, on peut déterminer les valeurs recherchées.

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega C_1} + R_1 + \dots + R_2 + j\omega C_2 R_1 R_2$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}$$

$$Q = \frac{1}{R_1 + R_2} \sqrt{\frac{C_2 R_1 R_2}{C_1}}$$

$$\text{et pour } R_1 = R_2, Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

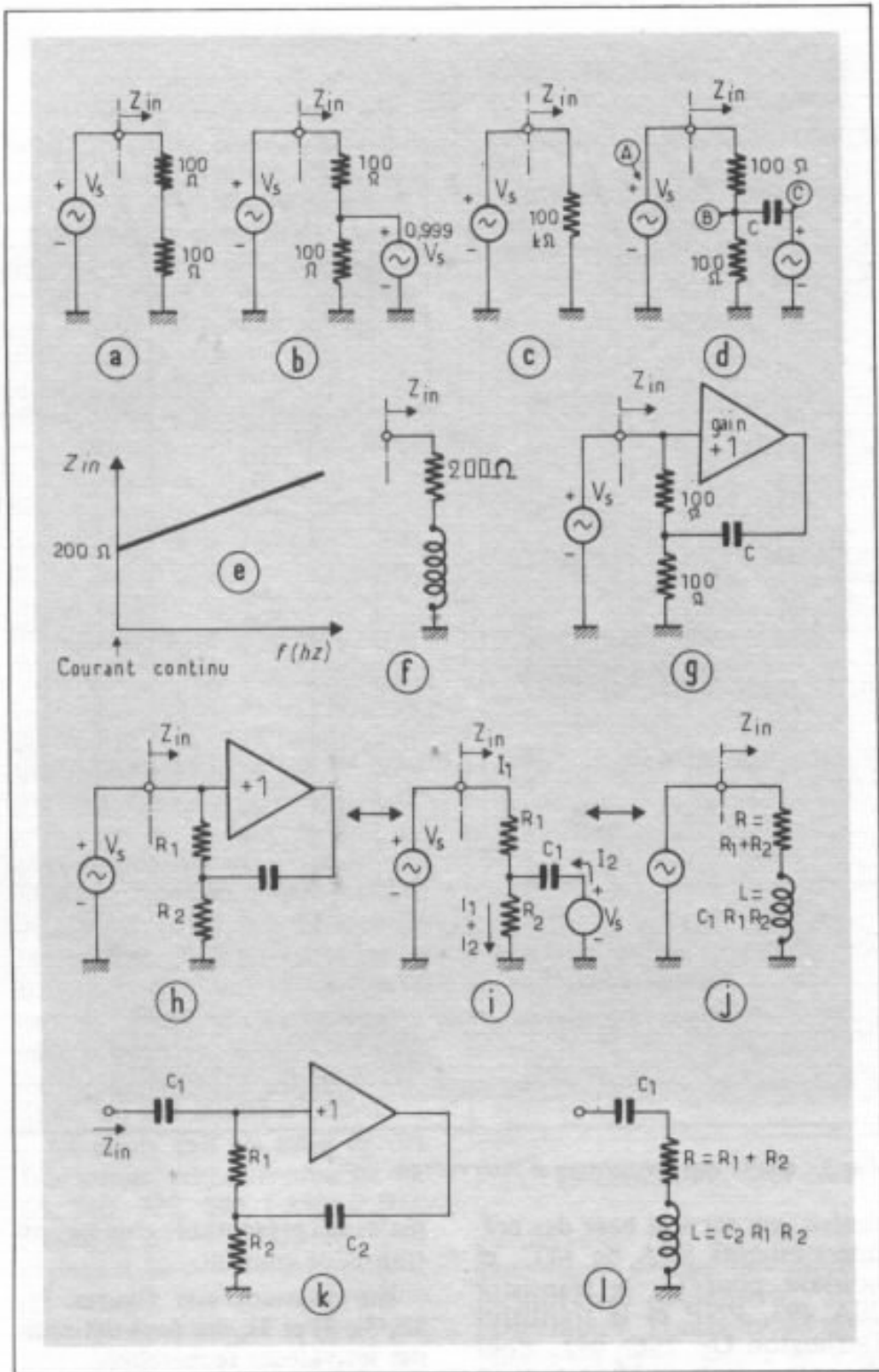


Fig 3 : Simulation de self par circuit actif

Pour la figure 4, et en prenant une valeur de Q , coefficient de surtension, de 2, un gain total de 1, on peut obtenir des variations de + et - 12 dB sur toute la bande audible pour valeur de C_1 et C_2 indiquées sur la figure 5. En faisant varier la position du curseur du potentiomètre sur le circuit SEA, du genre SEA 50,

fig 6, on obtient donc un réglage continuellement réglable en niveau de la fréquence sélectionnée. Mais remarquons en fig 6 que ce circuit utilise en réalité deux amplificateurs opérationnels, ainsi qu'un autre qui fera effet de self « fictive ». Toutefois, malgré une grande simplification par rapport aux premiers

circuits égaliseurs, ce schéma reste encore assez complexe.

Le circuit proposé

Il existe maintenant de bons circuits intégrés, dont le plus gros avantage est le prix modique, les bonnes performances, l'emplacement réduit, et les nombreuses variétés de qualité existant dans le monde. Certains de ces circuits intégrés contiennent un, deux, trois ou plusieurs amplificateurs différentiels. Nous allons les utiliser ici, mais en réduisant leur nombre autant que possible. C'est pourquoi nous avons supprimé IC 3 de la figure 6, et en nous inspirant de la fig 1 et de la figure 6, circuit SEA/JVC/Mitsumi Electric, nous avons réalisé un circuit, décrit sur la figure 7.

IC 1 est un circuit intégré des plus classiques, de référence 301 ou équivalents (il y en a de nombreux). IC 1, en partie contre réactionné par R_{23} , corrigé en phase par C_{21} a ses deux entrées différentielles reliées au circuit décrit plus haut, dont IC 2 fait office de self.

Pour améliorer la séparation entre les canaux cet égaliseur à six fréquences réglables est monté sur un petit circuit imprimé de taille 63 x 98 mm, par canal (donc deux en stéréo). IC 2 est un circuit intégré double et on a donc besoin que de cinq circuits intégrés doubles (ici le modèle très courant 4558 ou tous équivalents).

Ce choix représente du point de vue surface, du point de vue simplicité un gain important énorme par rapport à tous les filtres de ce genre existant, malgré des performances excellentes. Un avantage très net sur de nombreux autres circuits est le fait qu'entre l'entrée et la sortie, un seul circuit intégré est utilisé au

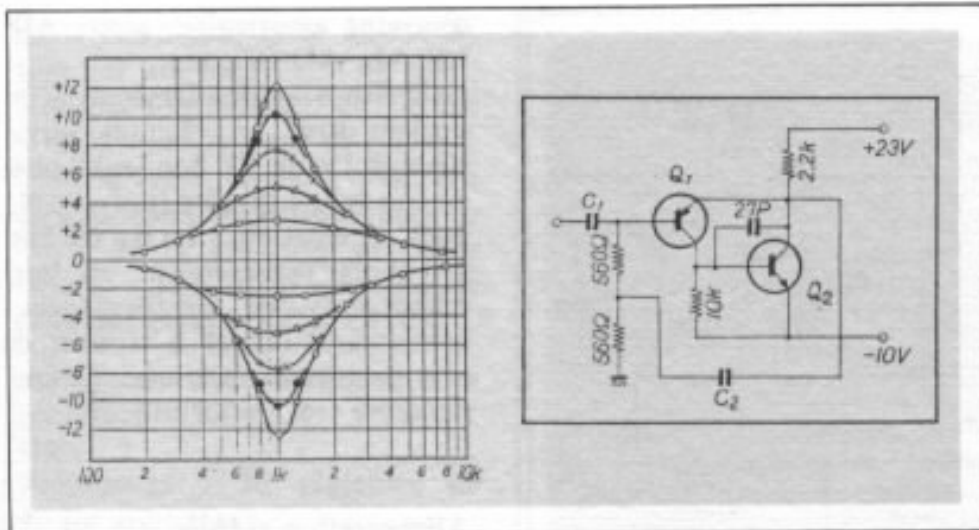


Fig 4 : Circuit de l'égaliseur à self fictive

f_0 (Hz)	32	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	(±1) 16k
C_1 (μF)	1.68	0.78	0.47	0.18	0.12	0.056	0.027	0.015	0.0068	0.0033
C_2 (μF)	47	25.3	10.68	6.6	2.67	1.46	0.762	0.33	0.18	0.082

Fig 5 : Valeurs de C1 et de C2

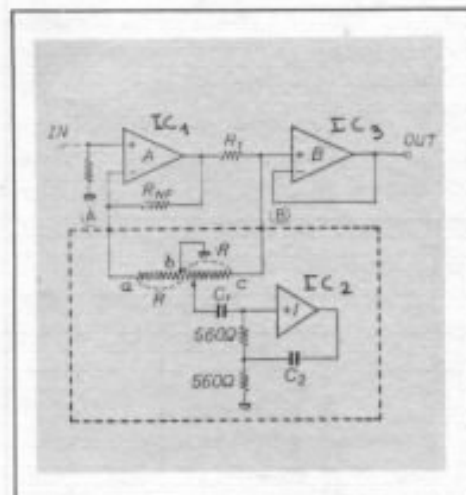


Fig 6 : Circuit SEA 50

lieu de deux ou plusieurs, et permet, malgré tout d'obtenir un gain total de 1, un taux de distorsion faible (0,05 % environ) et une tension de sortie suffisante pour la majorité des préamplificateurs et amplificateurs (entre 0,1 V et 1,5 V).

Sur la figure 7, C_{xa} et C_{xb} et R_x permettent de sélectionner les

fréquences de réglage, R_1 à R_{10} sont des valeurs fixes (470 Ohms). Ceci donne des valeurs de résistances et de condensateurs, pour les fréquences déterminées plus haut, Soit 40 Hz, 80 Hz, 160 Hz, 320 Hz, 320 Hz, 640 Hz, 1 250 Hz, 2 500 Hz, 5 000 Hz, 10 000 Hz et 20 000 Hz :

- $C_1 : 2,2 \mu F / R_{11} : 150 k \ C_{11} : 0,1 \mu F = 40 \text{ Hz}$
- $C_2 : 1 \mu F / R_{12} : 180 k \ C_{12} : 0,047 \mu F = 80 \text{ Hz}$
- $C_3 : 0,33 \mu F / R_{13} : 130 k \ C_{13} : 0,047 \mu F = 160 \text{ Hz}$
- $C_4 : 0,22 \mu F / R_{14} : 120 k / C_{14} : 22 \text{ nF} = 320 \text{ Hz}$
- $C_5 : 0,1 \mu F / R_{15} : 130 k / C_{15} : 10 \text{ nF} = 640 \text{ Hz}$
- $C_6 : 47 \text{ nF} / R_{16} : 150 k / C_{16} : 4,7 \text{ nF} = 1\ 250 \text{ Hz}$
- $C_7 : 39 \text{ nF} / R_{17} : 110 k / C_{17} : 2,2 \text{ nF} = 2\ 500 \text{ Hz}$
- $C_8 : 22 \text{ nF} / R_{18} : 110 k / C_{18} : 1 \text{ nF} = 5\ 000 \text{ Hz}$
- $C_9 : 10 \text{ nF} / R_{19} : 120 k / C_{19} : 470 \text{ pF} = 10\ 000 \text{ Hz}$
- $C_{10} : 4,7 \text{ nF} / R_{20} : 100 k / C_{20} : 300 \text{ pF} = 20\ 000 \text{ Hz}$

Remarquer que R_{11} à R_{20} varie d'une façon assez irrégulière entre 40 Hz et 20 000 Hz, mais ceci est pour compenser les valeurs des capacités C_{11} à C_{20} et C_9 à C_{10} , qui sont des

valeurs standard, pour permettre un montage à partir de composants faciles à se procurer.

On peut bien sûr, jouer à sa guise sur les valeurs R et C , par exemple, au lieu de choisir des fréquences étendues sur toute la bande audible, les concentrer sur la bande 20 - 500 Hz ou encore sur la bande 20 - 200 Hz, pour compenser par exemple les défauts de la pièce d'écoute et de l'enceinte acoustique.

Ce circuit étant alimenté par une alimentation symétrique régulée, de valeur comprise entre ± 12 à ± 15 V, on remarque sur la figure 8 que ce circuit ne possède pas de condensateur d'entrée ni de sortie, ce qui augmente donc sa bande passante dans le secteur grave pratiquement jusqu'à 0 Hz, et environ 100 kHz dans l'aigu. Il évite aussi le choix difficile de ces condensateurs qui doivent être de valeur élevée et dont l'emplacement pose des problèmes de câblage sur le circuit imprimé. Remarquons que les composants utilisés sont courants, que les condensateurs C_{11} à C_{20} sont de bonne qualité sans plus (polystyrène, polystyrol), mais que ceux qui préfèrent en utiliser de meilleurs peuvent tenter d'en tirer un meilleur résultat. En

fait, le circuit intégré IC 1 limite les performances, du point de vue distorsion surtout, et les connaisseurs pourront utiliser des circuits intégrés plus performants comme quelques-uns

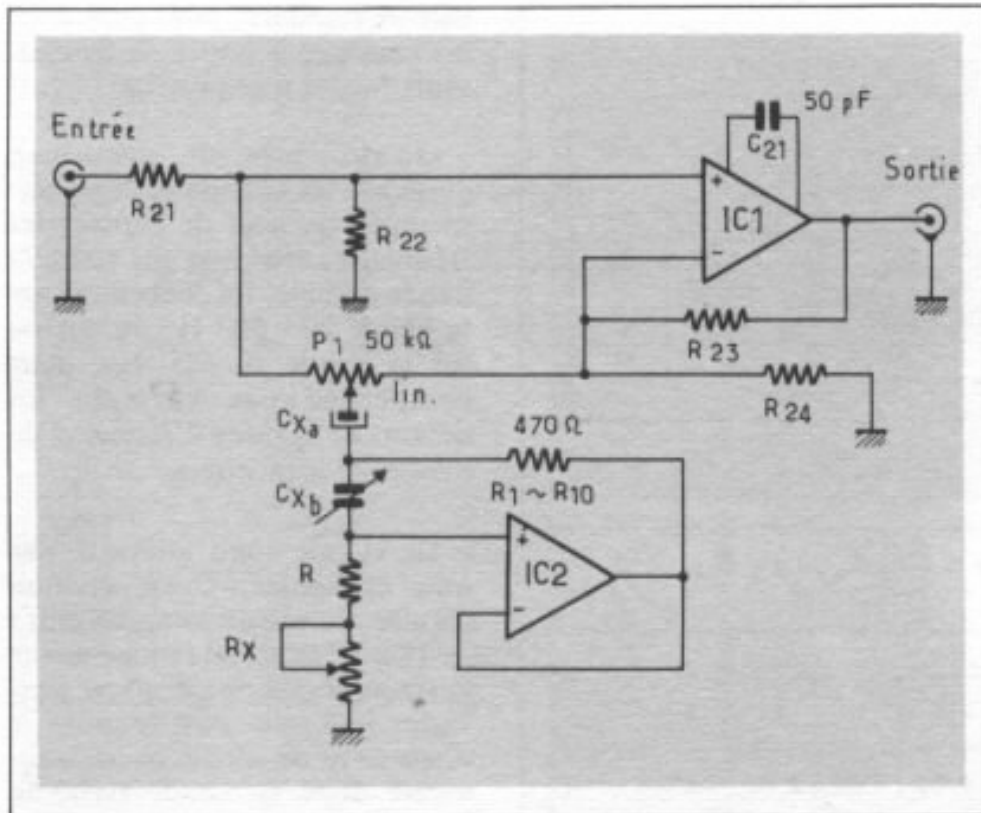


Fig 7 : Le circuit employé

d'origine américaine, genre AD 301 AL, AD 507, etc... de la firme Analog Devices), s'ils veulent tirer un résultat supérieur à l'aide de condensateurs de très haute qualité (polystyrol, mica argenté, etc.). Ici il a été fait un choix représentant un bon compromis de performances, composants faciles à trouver, de prix de revient modique. Ce qui demeure très important.

Alimentation régulée (fig. 9)

Elle est faite simplement, à partir d'un transformateur au secondaire 2 x 12 à 18 Volts, 0,3 à 0,5 A, d'un pont redresseur, et de deux régulateurs 78M12 et 79M12 (origine japonaise) qui donneront en sortie 12 Volts symétriques. Cette tension peut être comprise entre 12 et 15 Volts sans poser d'ennuis. On peut

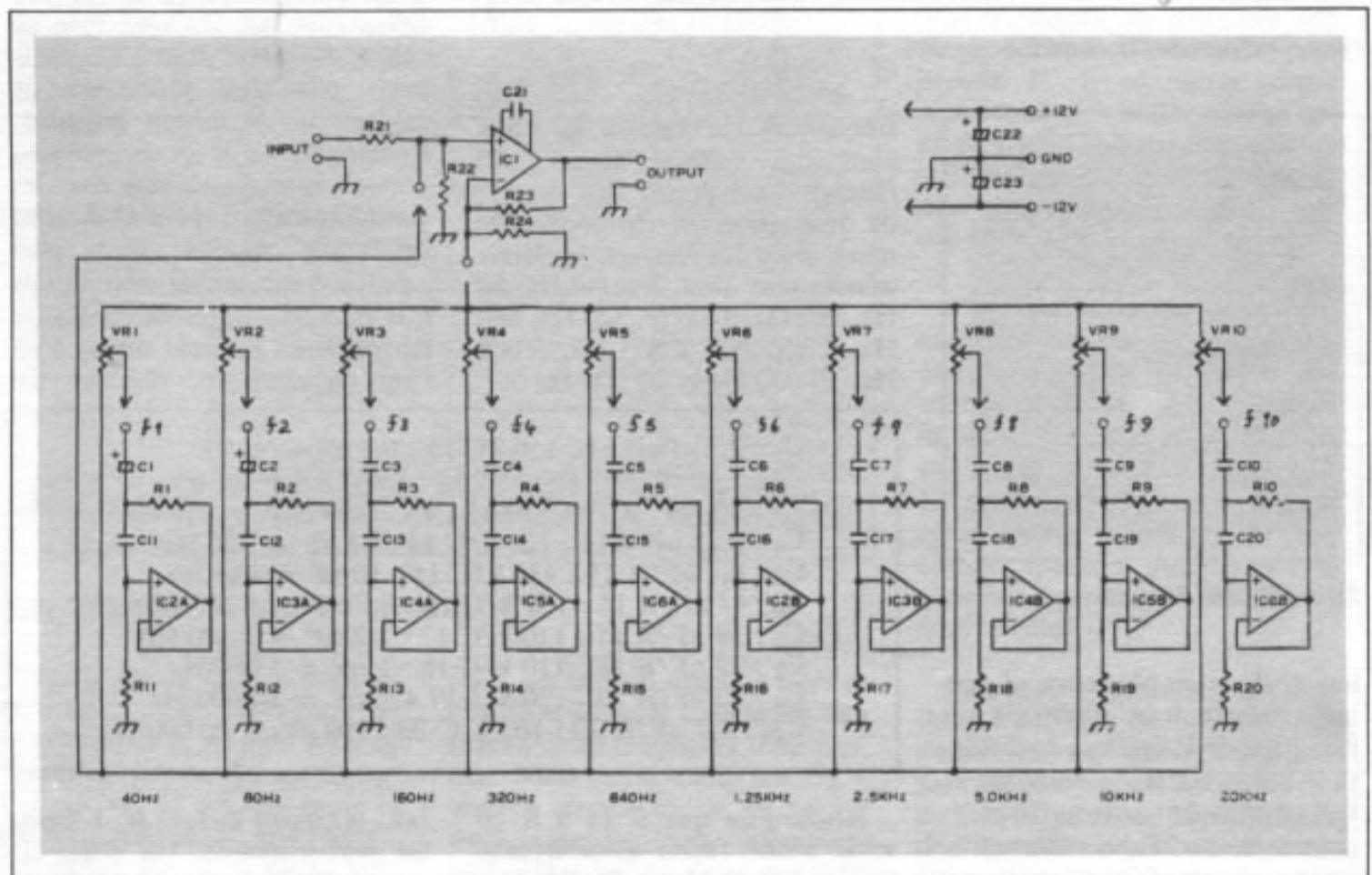


Fig 8 : Schéma complet à dix fréquences réglables

aussi remplacer cette alimentation par une autre, soit du genre Kanéda, soit avec self de filtrage et gros condensateur de filtrage. Mais là aussi, le choix a été fait en fonction des performances de IC 1 et la solution proposée devrait satisfaire la majorité de ceux qui essayeront ce circuit.

Rappel des performances générales :

Gain : 1

Fréquences : 10 réglables de 40 Hz à 20 kHz

Impédance d'entrée : 10 kohms

Impédance de sortie : 10 kOhms environ.

Bande passante : (position linéaire) 1 Hz à 100 kHz.

Ajustage en niveau des fréquences + ou - 12 dB maximum.

Taux de distorsion : 0,05 % pour 1,5 Volt de sortie ; 0,02 % pour 0,8 Volts de sortie.

Montage

Le montage se fait sur deux circuits imprimés 63 x 98 mm, en verre époxy, sur lequel on monte les résistances, puis les condensateurs. Pour le montage des transistors (circuits intégrés) bien vérifier le brochage avant le montage, suivant la figure 10. Noter que l'alimentation, très simple se monte séparément, sur cosses relais, près du transformateur d'alimentation (modèle blindé). Ne pas trop chauffer les circuits intégrés pendant la soudure.

La figure 11 montre l'emplacement sur le châssis.

Si possible, ne pas utiliser les potentiomètres (tous de même valeur, soit 50 Ohms linéaire) de type rectiligne, dits « à course linéaire », qui sont utilisés sur pratiquement 100 % des égaliseurs graphiques. Ceux-ci, la plupart doubles pour faciliter le montage et réduire l'emplacement, sont en général de qualité

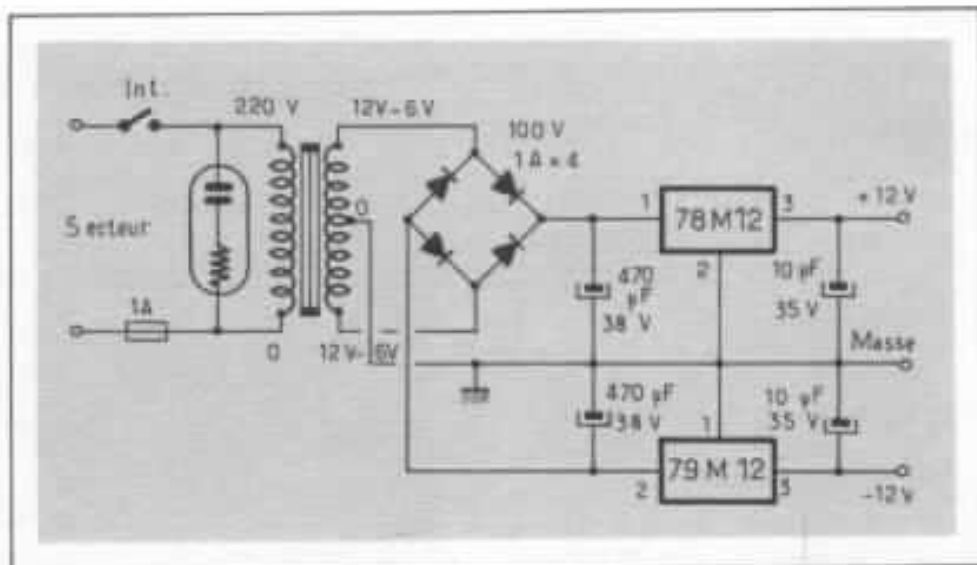


Fig 9 : Alimentation régulée

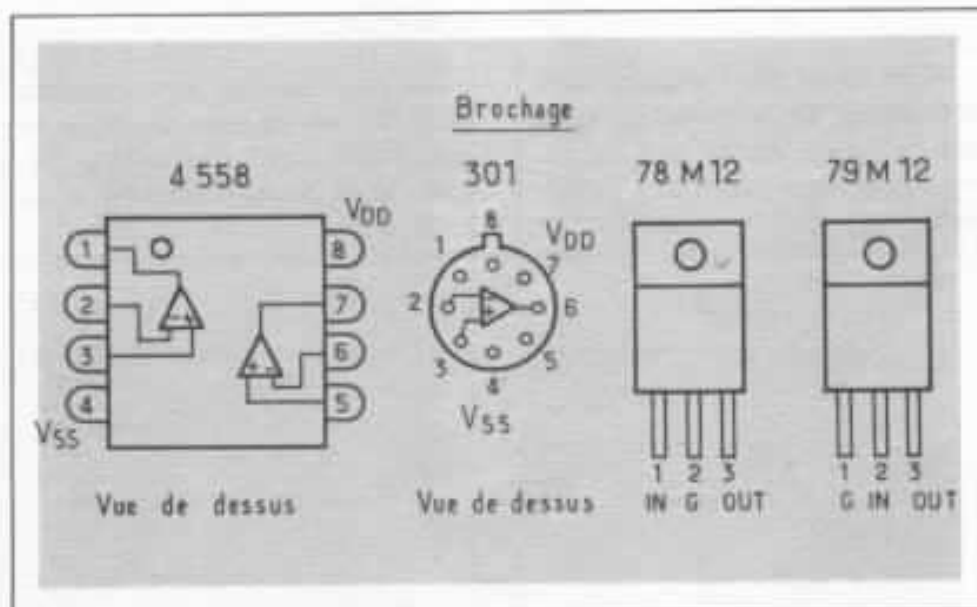


Fig 10 : Brochage des composants

passable et provoquent des ruptures de circuit, crachements au bout de quelques mois d'usage. Ouvert du côté avant, malgré parfois un masque en tissu, ils laissent pénétrer la poussière par la face avant de l'appareil ainsi monté. Il existe quelques potentiomètres de bonne qualité de type rectiligne, mais ils ne sont pas disponibles dans le commerce.

Ces potentiomètres, au nombre de 20, doivent donc être de bonne qualité et peuvent se trouver en France en plusieurs variétés de qualités et de prix (Sfer-

nice, etc). Ils sont tous (20 en stéréo) de valeur 50 KΩ, linéaire.

La figure 12 montre le circuit imprimé monté, vu de dessus, et en figure 13, les liaisons à faire entre le circuit et les potentiomètres (un canal représenté). Pour un montage stéréo, on peut mettre les potentiomètres en ligne ou les séparer en deux doubles rangées, pour les canaux gauche et droit, soit deux figures 13 côte à côte. Cette dernière configuration est la meilleure du point de vue séparation des canaux. On peut aussi diviser le châssis en deux parties (dans le sens vertical) et placer les circuits et les

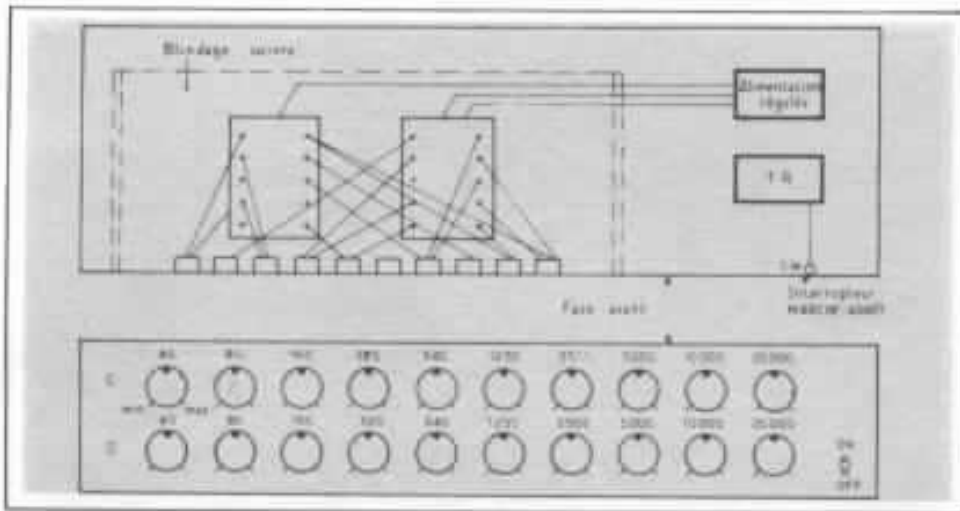


Fig. 11 : Implantation dans le châssis

potentiomètres d'une façon symétrique avec une des voies vers le bas, l'autre vers le haut du boîtier.

Noter aussi que l'appareil doit être blindé intérieurement (plaque de cuivre recouvrant les circuits imprimés jusqu'aux potentiomètres) pour conserver un

bon rapport signal/bruit.

Utilisation

On peut monter bien entendu deux de ces circuits en série ce qui donne pour une même fréquence un réglage élargi à + et - 24 dB.

En éteignant l'appareil on entend un bruit qui provient de la décharge des condensateurs de l'égaliseur. On peut éviter ceci en ajoutant un étage d'entrée, qui complique le circuit, mais qui augmente l'impédance d'entrée. Un exemple simple est le circuit de la figure 14, qui utilise un circuit intégré double 4558. On peut bien sûr, ajouter un inverseur direct/égaliseur facile à monter. Mais le moyen le plus simple est de passer à la position « direct » avant d'éteindre l'appareil.

La figure 15 montre la liste des composants, pour lesquels il faut respecter la valeur et dont la tolérance doit être de 5 % pour les condensateurs et les résistances.

En passant enfin aux circuits intégrés IC 1 et IC 2, ils ont des dispersions de gain et il est

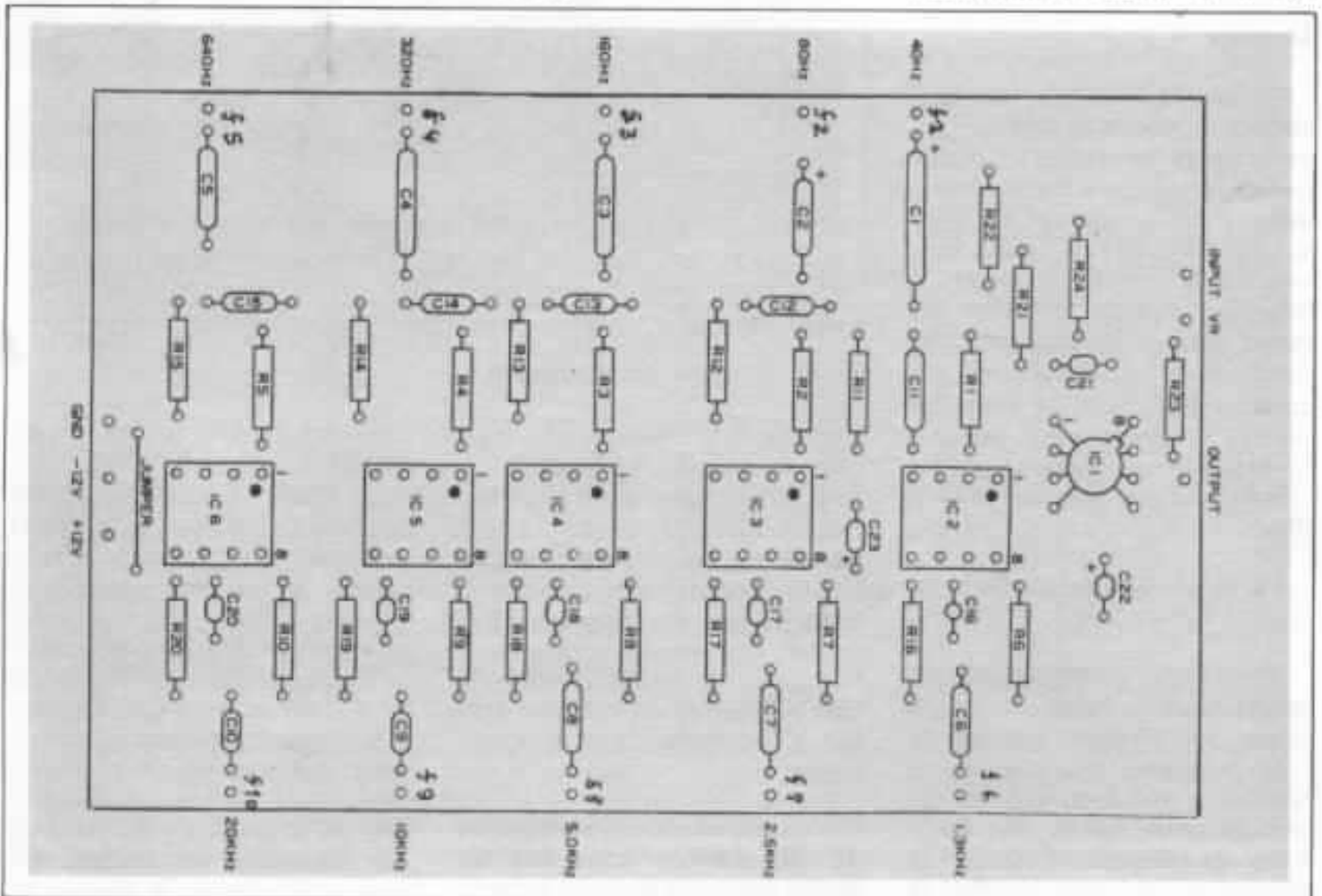


Fig. 12 : Le circuit imprimé

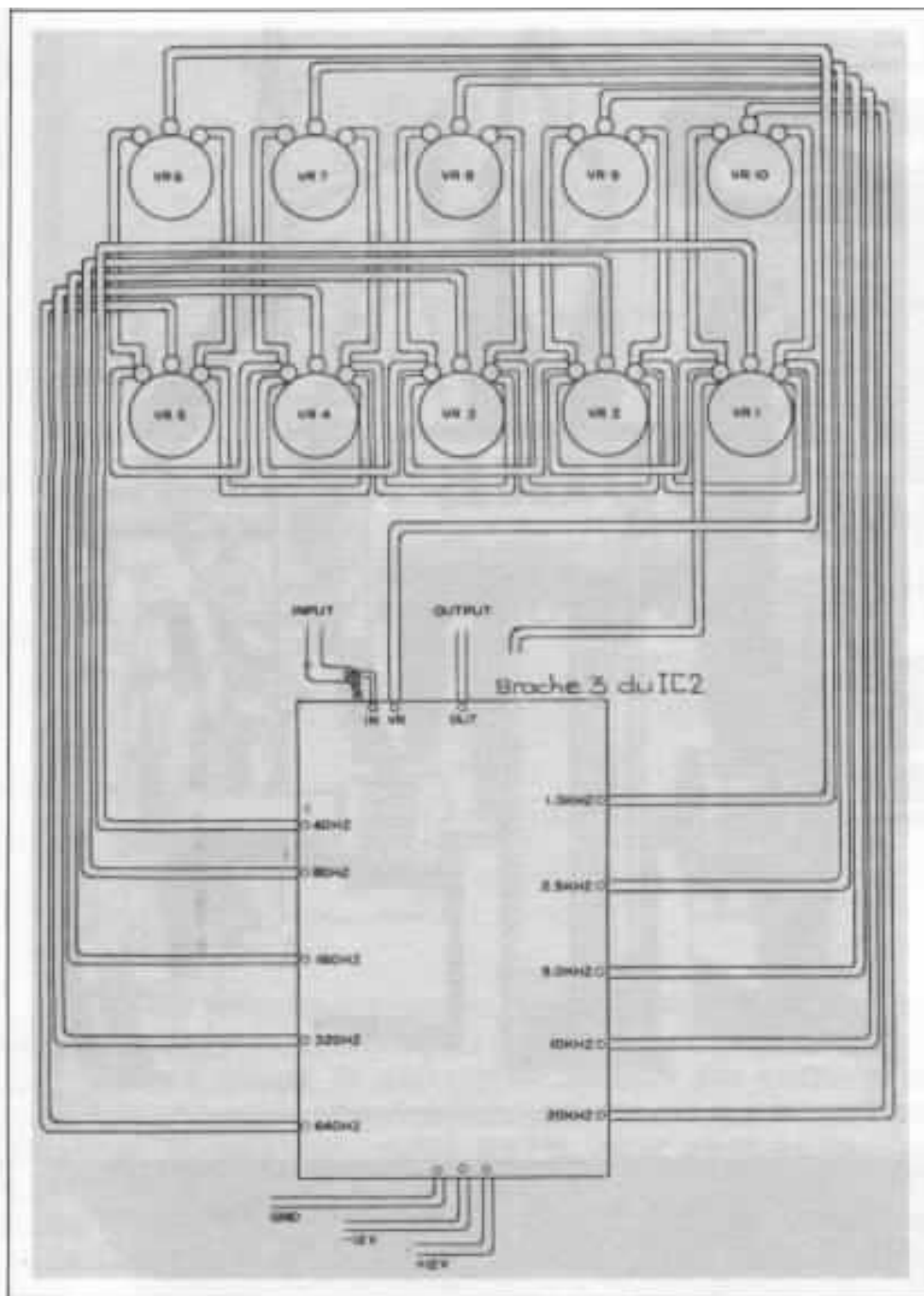


Fig 13 : Connexions des potentiomètres

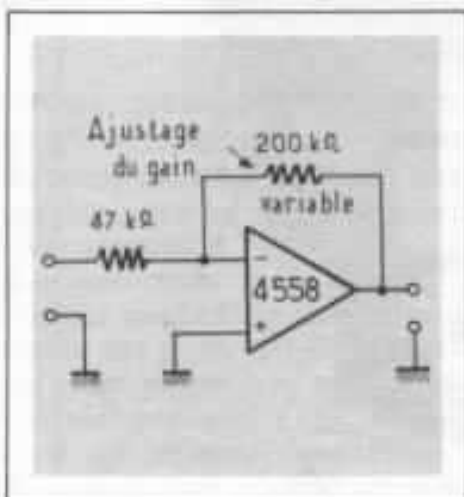


Fig 14 : Etage d'entrée «anti ploc»

important de les sélectionner en gain avant de faire le montage.

Pour les lecteurs intéressés, un circuit imprimé en kit sera disponible auprès de l'Audiophile. Il est nécessaire de se procurer, à part ce kit, les 20 potentiomètres, le transformateur d'alimentation et le châssis.

Sans prétention aucune, il permet cependant d'accéder à un prix de revient sans concurrence, à de très bonnes performances. De plus c'est un circuit facile à monter et à « bricoler » par la suite.

R1	470 ohm
R2	"
R3	"
R4	"
R5	"
R6	"
R7	"
R8	"
R9	"
R10	"
R11	150k
R12	180k
R13	110k
R14	120k
R15	130k
R16	150k
R17	110k
R18	110k
R19	120k
R20	100k
R21	4.7k
R22	"
R23	"
R24	"
C1	2.2MFD (Chemicon)
C2	1MFD
C3	.33 (Mylar)
C4	.22
C5	.1
C6	.047
C7	.039
C8	.022
C9	.01
C10	.0047
C11	.1
C12	.047
C13	.047
C14	.022
C15	.01
C16	.0047
C17	.0022
C18	.001
C19	470P (Steroi)
C20	300P
C21	50P (Ceramic)
C22	10MFD
C23	"
IC1	301
IC2-6	4558

Fig 15 : Liste des composants

**Page non
disponible**

La mécanique s'entend ! ou le son des platines

G. Altieri

Nous nous sommes longuement penchés sur les problèmes soulevés par le rapport existant entre les performances physiques des appareils de reproduction sonore et l'évaluation subjective des résultats d'écoute. Et tout semble indiquer que nous n'en sommes qu'à la présentation sommaire tant le domaine d'activités semble vaste et peu accessible. Un amplificateur dont le taux de distorsion harmonique atteint 0,02% est-il meilleur que celui dont le taux correspond à 0,03% ? Sans doute cette question pourrait-elle s'appliquer à n'importe quel maillon d'une chaîne haute fidélité. La réponse serait d'ailleurs invariable puisque notre système perceptif ressent le résultat global d'un dispositif de reproduction dont les paramètres considérés individuellement ont peu de signification au niveau de l'intégration des données. De plus, les conditions de formation d'une image acoustique sont loin d'être définies par la sommation des quatre ou cinq paramètres que nos connaissances et nos appareils nous permettent de mesurer.

Nous avons donc considéré que l'accumulation de chiffres et de graphiques ne donnait pas une idée précise du rendement d'un appareil à l'écoute, c'est pourquoi nous nous sommes orientés tout naturellement vers l'étude des particularités sonores qui sont appréciées par notre système perceptif. Ce dernier étant un élément fondamental permettant une évaluation juste éventuelle des qualités techniques tout autant qu'une démysti-

fication des jeux mathématiques trop souvent sans rapport avec les véritables problèmes de diffusion et perception des signaux complexes.

Ecouter ? oui, mais écouter dans des conditions permettant l'établissement de conclusions sûres. En un mot, nos expériences d'écoute doivent suivre les exigences rigoureuses d'un protocole établi selon les normes qui dirigent le travail scientifique.

LES MOTIVATIONS

La décision de nous attaquer à un travail de ce type a été accélérée principalement par deux motifs. Le premier consiste à réviser la méthodologie appliquée dans la plupart des tests d'écoute des produits commerciaux. Le deuxième trouve son origine dans les résultats inespérés issus d'une écoute collective dont les conditions expérimentales ont été volontairement alté-

rées par l'auteur.

En bref, nous avons considéré la présence de certains vices qui contaminent assez souvent les tests d'écoute :

- absence d'éléments de comparaison valables.
- variation de plusieurs paramètres en même temps.
- modification des conditions expérimentales durant la séance.
- modification des conditions expérimentales à la demande des sujets participant à l'expérience.
- intervention du facteur « fatigue acoustique ou physique » souvent négligé.
- emploi d'un vocabulaire choisi par chaque participant ayant un sens uniquement personnel.
- non répétitivité des conditions de travail.

Remarquons que le respect d'une certaine méthodologie (que nous préconisons) n'est pas une garantie de bons résultats expérimentaux. De plus, les particularités, citées plus haut, sont, dans le cadre des exigences scientifiques, considérées comme des défauts expérimentaux. Bien sur, les résultats obtenus dans d'autres conditions peuvent renfermer une valeur d'appréciation personnelle non négligeable. Chaque méthode a ses valeurs.

Dans le cas présent, la différence réside dans notre souci d'aboutir à des considérations de caractère général, c'est à dire respectueuses des règles de travail qui assurent la répétitivité des expériences et l'objectivation des résultats.

La deuxième motivation de notre démarche exige une explication plus détaillée.

Lors d'une session d'écoute collective en présence de six spécialistes (bien entraînés), nous avons constaté un phénomène digne d'une attention particulière. Les résultats de l'écoute

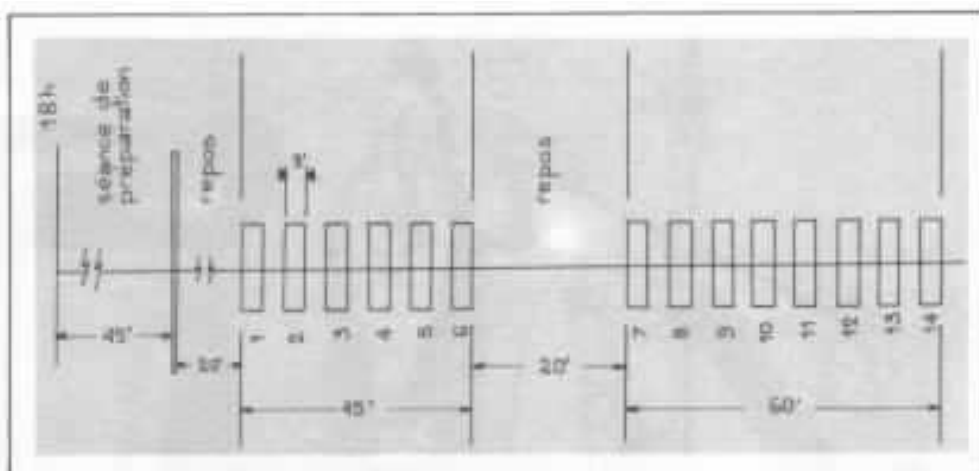


Fig 1 - Schéma temporel de l'expérience

essai	motif	platine	AUDITEUR			
			A	B	C	D
1	I	β				
2	I	α	α	α	β	α
3	I	β	(2)	(2)	(3)	(2)
4	II	α				
5	II	β	α	α	β	α
6	II	β	(4)	(4)	(6)	(4)
7	I	α				
8	I	γ	α^2	α	γ	α
9	I	γ	(7)(10)	(10)	(9)	(7)
10	I	α				
11	II	γ				
12	II	α	α	γ^2	γ^2	α^2
13	II	α	(12)	(11)(14)	(11)(14)	(12)(13)
14	II	γ				

Fig 2 - Déroulement des expériences et préférences indiquées par les auditeurs.

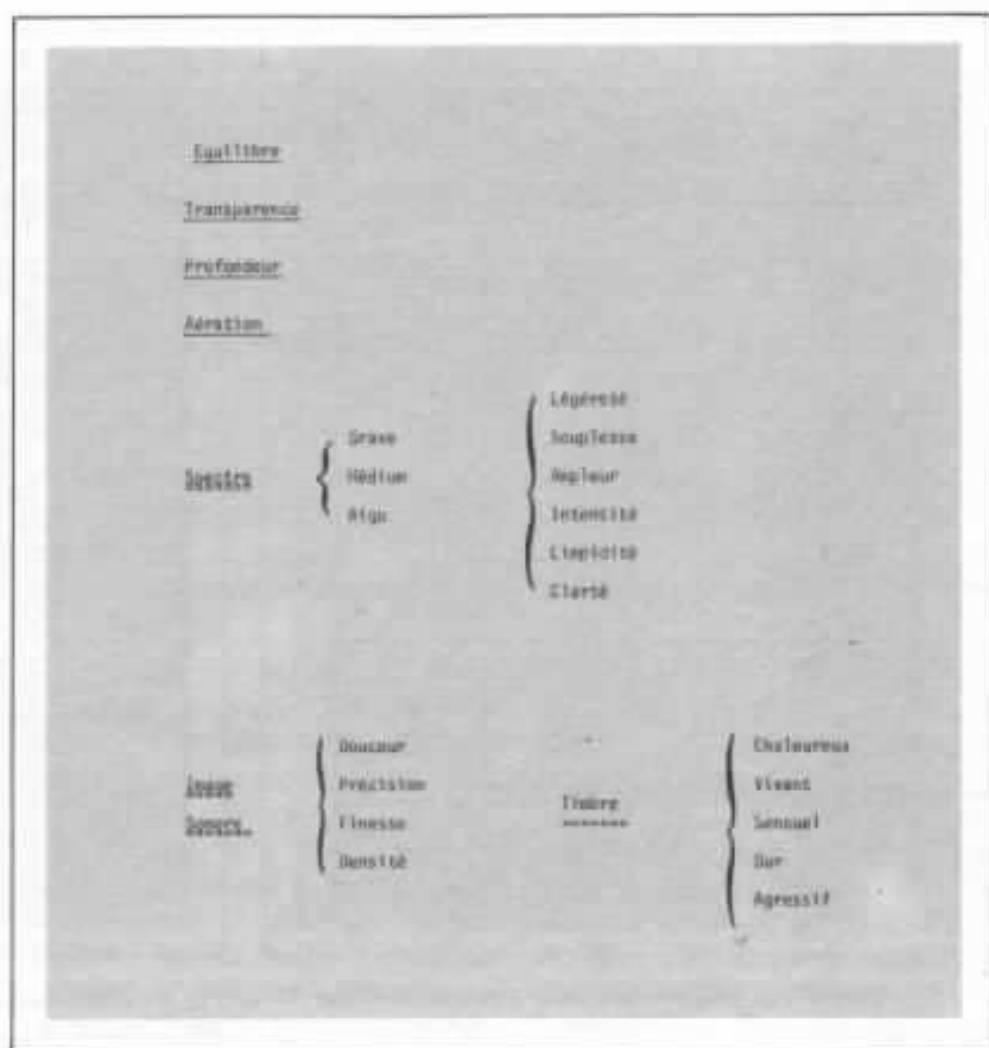
Le stimulus I correspond à l'orgue (J.S.Bach)

Le stimulus II correspond au Big Band Jazz (Mulligan)

Dans les colonnes correspondants aux auditeurs, il est indiqué la platine préférée pour chaque groupe d'essais. On fait référence au numéro d'essai choisi et au double choix dans les cas où ils se sont présentés.

nous ont tous déçus et une discussion très animée sur les causes d'un tel rendement s'est élevée, ce au cours de la manipulation. Plusieurs participants ont attribué la responsabilité du mauvais rendement de l'installation à la platine tourne-disque. Nous avons donc résolu, unanimement de substituer la platine utilisée par un modèle hautement sophistiqué et équipé d'un bras parmi les plus perfectionnés. Nous avons alors eu l'idée de profiter de cette occasion pour comparer les performances audibles des deux platines en question. Dans ce contexte, un morceau musical a été diffusé à l'aide de la première platine, c'est à dire celle qui avait été jugée comme mauvaise. Le résultat du premier essai, inscrit sur une feuille individuelle par chaque participant était concluant : tous les auditeurs avaient reconnu la première platine et avaient qualifié le résultat de médiocre (comme auparavant). Au cours du second essai (avec le même morceau musical et toujours à l'insu des auditeurs), les participants guettent la seconde platine et reconnaissent la seconde platine. Pour eux donc, les conditions d'écoute ne sont pas identiques dans les deux cas... et pourtant le disque a été posé sur la même platine. La 1ère et la 2ème expérience ont donc été réalisées rigoureusement dans les mêmes conditions physiques. Un changement s'est pourtant opéré... à l'intérieur de chaque auditeur préparé à entendre autre chose. Nous avons tous entendu autre chose. Lors du second essai, les participants, à l'unanimité ont «reconnu» la nouvelle platine et tous ont trouvé une amélioration très sensible de la qualité de reproduction.

Autrement dit, face à un même message acoustique, la prédisposition de l'auditeur peut entraîner la formation, au plus haut niveau de son système per-



Liste des qualificatifs remis aux auditeurs

ceptif, d'image différentes qui obéissent à un pré-jugement des situations, les performances reconnues du deuxième appareil ont motivé l'attente d'une reproduction de meilleure qualité.

Cette attente a entraîné chez eux, la découverte d'une information «complémentaire» qui, en fait, a toujours existé dans le message diffusé puisque ce message a été identique dans tous les cas.

Mille conclusions peuvent être obtenues dans le domaine de la psychoacoustique. Mais nous nous contenterons ici de rapporter une question qui s'est automatiquement posée à partir de cette expérience singulière : Entend-on des différences entre les divers matériels dits de haut de gamme et plus précisément encore : Est-ce que ces dif-

férences existent réellement!

Dans notre esprit, il existe un seul moyen de répondre : expérimentalement, mais expérimenter dans des conditions de travail proches des exigences scientifiques.

Dans ce nouvel esprit a été mise en place la séance d'écoute comparative que nous allons maintenant vous exposer et qui inaugure une certaine politique dans l'évaluation du matériel haute-fidélité.

ECOUTE COMPARATIVE DE PLATINES

Appareils et méthodologie utilisés

Nous avons choisi trois platines tourne-disques que nous avons appelées α , β et γ , et qui appartiennent à une catégorie située au-dessus de la moyenne

A	B	C	D
α	α	β	α
α	α	β	α
α	α	γ	α
α	γ	γ	α
4α	$3\alpha 1\gamma$	$2\beta 2\gamma$	4α

Fig 3 - Résumé des préférences pour chaque auditeur.

	α	β	γ
A	100	0	0
B	75	25	0
C	0	50	50
D	100	0	0

Fig 4 - Importance relative des platines pour chaque auditeur.

entre 2500 et 5000 F. le reste de l'équipement inchangé durant les différents essais, était composé comme suit :

- bras Denon DA 307
- cellule Shure V 15 IV

Les trois platines étaient équipées de couvre-plateaux identiques et on a utilisé un seul exemplaire de la cellule citée pour assurer des conditions de montage rigoureusement identiques

- préamplificateur Yves Cochet

- amplificateur Yves Cochet
- câble de liaison Lucas
- enceinte phonophone G1

Les morceaux musicaux choisis appartenaient aux ouvrages suivants :

Oeuvre de JS Bach - Walter Kraft - Vox

Gerry Mulligan Big Band Live - Verve

Nombre de participants : 4

Parmi ceux-ci 2 sont des spécialistes de la technique haute-fidélité, tandis que les 2 autres sont des mélomanes «indifférents» dirons-nous aux détails techniques.

Les platines sont représentées selon le schéma temporel de la figure 1. Il est prévu des intervalles réduits entre deux séquences de comparaison et un intervalle de repos assez prolongé entre deux groupes d'expériences.

La série d'essai comparatif est précédé d'une séance d'écoute préparatoire, ceci afin que chacun se familiarise avec les ouvrages musicaux, l'équipement utilisé et surtout les conditions acoustiques de la salle d'écoute. Naturellement la platine et les bras utilisés durant la période de préparation ne font pas partie du matériel à comparer. Pour plus de précision, il s'agit d'une platine Thoren TD 150 équipée d'un

bras Lurné avec une cellule Shure V15 IV.

Les platines se trouvent dans une pièce séparée de la salle d'écoute et invisibles des sujets.

Tâche des auditeurs

Les participants doivent comparer l'audition des platines deux à deux et arriver à un choix par groupe d'essais, tel qu'il est signalé dans notre figure 2. Ils doivent justifier leur choix (par écrit) et établir les caractéristiques subjectives de chaque écoute. Pour cela, il leur a été fournie une liste d'expressions subjectives. La liste (ci-jointe) est le résultat du dépouillement d'un grand nombre d'articles publiés ; elle représente les expressions les plus répandues lors des descriptions des impressions sonores.

Nous sommes conscients que

ces termes ont une valeur purement personnelle et qu'ils peuvent renfermer des concepts différents pour chaque auditeur.

Résultats

Ils sont représentés dans les figures 3, 4 et 5. Les résultats montrent que les participants ont reconnu sans ambiguïté les différentes platines présentées. Remarquons, pour confirmer les résultats obtenus que dans la série de 7 à 10, l'auditeur A a placé à un même niveau de préférence les platines correspondant à l'essai n°7 et n°10 et ceux-ci représentent la même platine (α). Des cas identiques se retrouvent chez l'auditeur B qui a placé au même niveau préférentiel les essais 11 et 14 (platine γ) ; chez l'auditeur C (en signalant 11 et 14) et chez l'auditeur D (en signalant 12 et 13 platine α).

La concordance des choix est aussi révélatrice de la capacité de reconnaissance. L'auditeur A et D ont préféré la platine α dans tous les cas, l'auditeur B dans 3 cas sur 4, et l'auditeur C n'a jamais évoqué la platine α .

D'autre part l'analyse des annotations montre la reconnaissance des platines préférées et non préférées lors des essais comparatifs. L'auditeur D indique dans la 3ème écoute : 3 = 1 (il a préféré 2), dans la 6ème : 5 = 6 (il a préféré 4), la 9ème : 9 = 8 (il a préféré 7), dans la 13ème : 13 = 12. L'auditeur B signale dans la 9ème expérience : 9 = 8 (il a préféré 7).

Mais, il faut encore dire que la

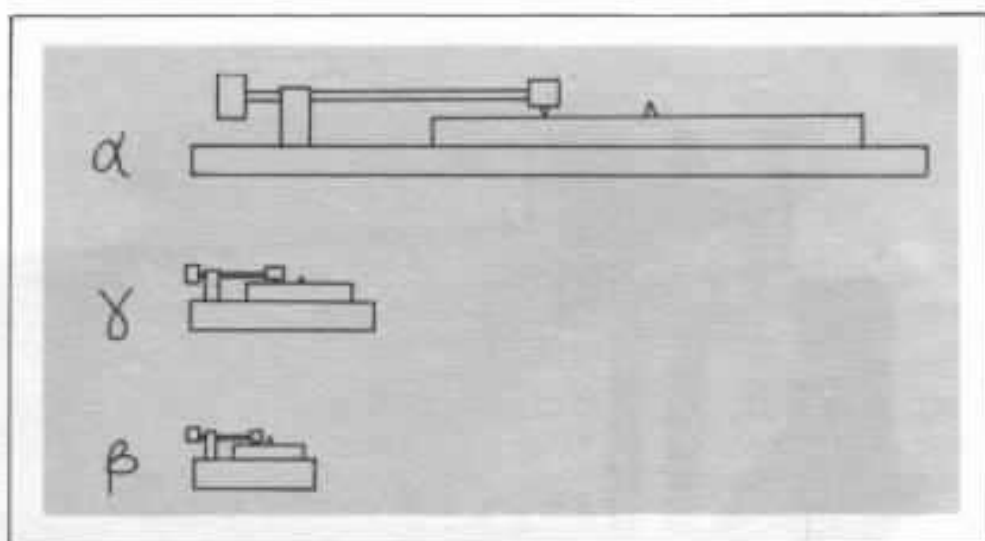


Fig 5 - Représentation schématique de la préférence globale pour les différentes platines.

reconnaissance est suivie d'un jugement de valeur. Et ici la platine α présente un message sonore clairement préféré par rapport au son de β et γ . La platine β (essai n°1 a été refusée dans trois cas qui la qualifiaient d'agressive ; médium assez ouvert ; basses traînent ; moins solides ; «légère dureté» ; mélange dans les graves, attaque agressive.

La platine d'essai α (essai n° 2) a mérité «descend plus bas, médium plus en relief» ; «plus d'ouverture, plus clair» ; «naturelle, équilibrée, son doux, fin».

En général, les refus prennent la forme de «confusion», «opaque», «moins de fermeté dans le grave», les préférences font mention de «clarté», «limpidité», «aération», «instruments différenciés».

Conclusions

Les résultats montrent que dans de bonnes conditions

d'écoute et avec un équipement équilibré, les sujets de l'expérience ont été capables de différencier le comportement mécanique de platines de niveau comparable. Ainsi, si les différentes conceptions technologiques ne laissent entendre qu'un son particulier, elles peuvent également aboutir à des préférences très généralisées. La généralisation

des préférences pour sa part, permet d'affirmer que le résultat est différent et meilleur.

Nous pensons que ce premier test réalisé dans les conditions décrites, ouvrent les portes d'une nouvelle voie d'analyse et de compréhension du phénomène sonore, avec des dérivations multiples. Ainsi notre prochain pas sera l'analyse du comportement mécanique des trois platines considérées, (et ci-dessus citées). Peut-être trouverons nous un indice, un chemin pour expliquer les conséquences audibles d'un système mécanique «inerte».

**Page non
disponible**

L'adaptation cellule-préamplificateur

Gérard Chrétien

La cellule phonoélectrique est un transducteur mécano électrique. Il transforme les ondulations du sillon en signal électrique. Deux aspects rentrent donc en ligne de compte, la cellule appartient à un système mécanique qui inclut le bras et la platine elle-même, mais aussi à un système électrique constitué par le câble et l'étage d'entrée du préamplificateur.

Il existe bien naturellement un couplage entre les grandeurs mécaniques et électriques sans lequel il n'y aurait pas de transduction. Toutefois, pour mieux appréhender le comportement d'ensemble, il convient de limiter au maximum les paramètres. Ainsi les deux articles intitulés « Une approche rationnelle du bras de lecture » ont mis en relief l'indissociabilité mécanique du bras et de la cellule, celle-ci se manifeste principalement dans les fréquences basses .

Dans cet article, nous vous proposons de regarder d'un peu plus près le couplage électrique entre la cellule et l'étage d'entrée du préamplificateur via le câble de liaison ; autre source de désenchantement et dont l'influence sur la restitution globale est grande.

Si du point de vue mécanique les deux types de cellules à aimant mobile et à bobine mobile, ont un comportement similaire, il en va tout autrement du fonctionnement électrique. Dans le cas des cellules à bobine mobile, l'association exige généralement l'emploi d'un transformateur ou d'un préamplificateur faisant office d'adaptateur d'impédance.

Toutefois, pour les cellules à aimant mobile, qui représentent de loin le type le plus répandu, l'adaptation d'impédance n'est quasiment jamais prise en compte de manière rigoureuse lors de l'installation d'un ensemble haute fidélité. Cette adaptation peut être la cause de différences audibles marquées semblant provenir des préamplificateurs. Il convient donc, lors de la

comparaison entre préamplificateurs, de veiller à cet aspect pour que toutes choses soient égales par ailleurs.

INTERACTIONS EN HAUTES FREQUENCES

Holman (1) a bien mis en évidence les nombreux facteurs qui

influencent la réponse de l'ensemble cellule préamplificateur phono. La cellule et le câble de liaison qui lui est associé, constitue une impédance de source irrégulière pour l'étage d'entrée phono, lequel constitue en lui même une charge, pour l'ensemble cellule-câble, très complexe.

Pour assurer la réponse spécifiée, les constructeurs de cellules indiquent la valeur de la charge tant résistive que capacitive.

Malheureusement, peu de fabricants de platines, de bras, de câbles ou de préamplificateurs mentionnent l'impédance complètement. Et il est difficile pour le particulier de s'y retrouver.

La réponse en fréquence globale est composée de la somme de la réponse mécanique et de la réponse électrique. En haute fréquence la charge capacitive intervient en tant que compensation de la réponse mécanique (fig. 1).

a) Réponse mécanique : Dans le bas du spectre de fréquence, c'est l'ensemble bras-cellule qui intervient mécaniquement. Dans les fréquences élevées c'est l'équipage mobile de la cellule. Il constitue un système mécanique présentant une fréquence de résonance. Elle est causée par l'interaction entre la souplesse du flanc de sillon et la masse effective de l'équipage mobile rapportée à la pointe. Pour mieux en appréhender le fonctionnement on a recours à un circuit électrique analogue. La figure 2 représente un tel circuit, avec sa réponse en fréquence. La résonance de l'ensemble est très visible. Il faut voir que bien que cette réponse soit analysée par analogie à un schéma électrique, intrinsèquement elle est de nature purement mécanique.

b) Réponse électrique : Sur le plan électrique, la cellule se com-

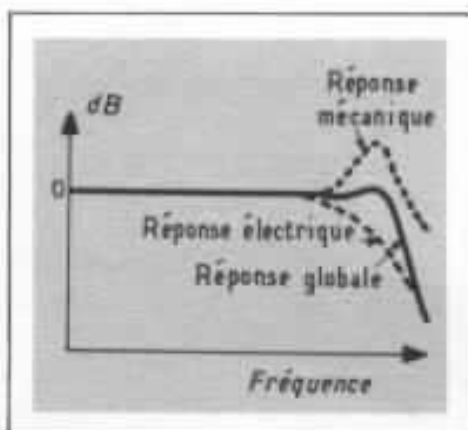


Fig 1 - La réponse globale d'un phonolecteur à aimant mobile est la résultante de la réponse mécanique et de la réponse électrique.

porte comme un générateur de tension, celui-ci est toutefois loin d'être parfait, particulièrement dans le cas d'une cellule à aimant mobile puisque l'inductance de la bobine en série, de l'ordre de 500 mH, influe sur la réponse en tant que filtre passe bas. De plus, la capacité du câble et éventuellement la capacité d'entrée de l'étage phono rentre en compte dans la réponse électrique. La figure 3 en donne le schéma.

Holman relate que lors d'un test d'une quinzaine de préamplificateurs attaqués par un signal délivré par une cellule,

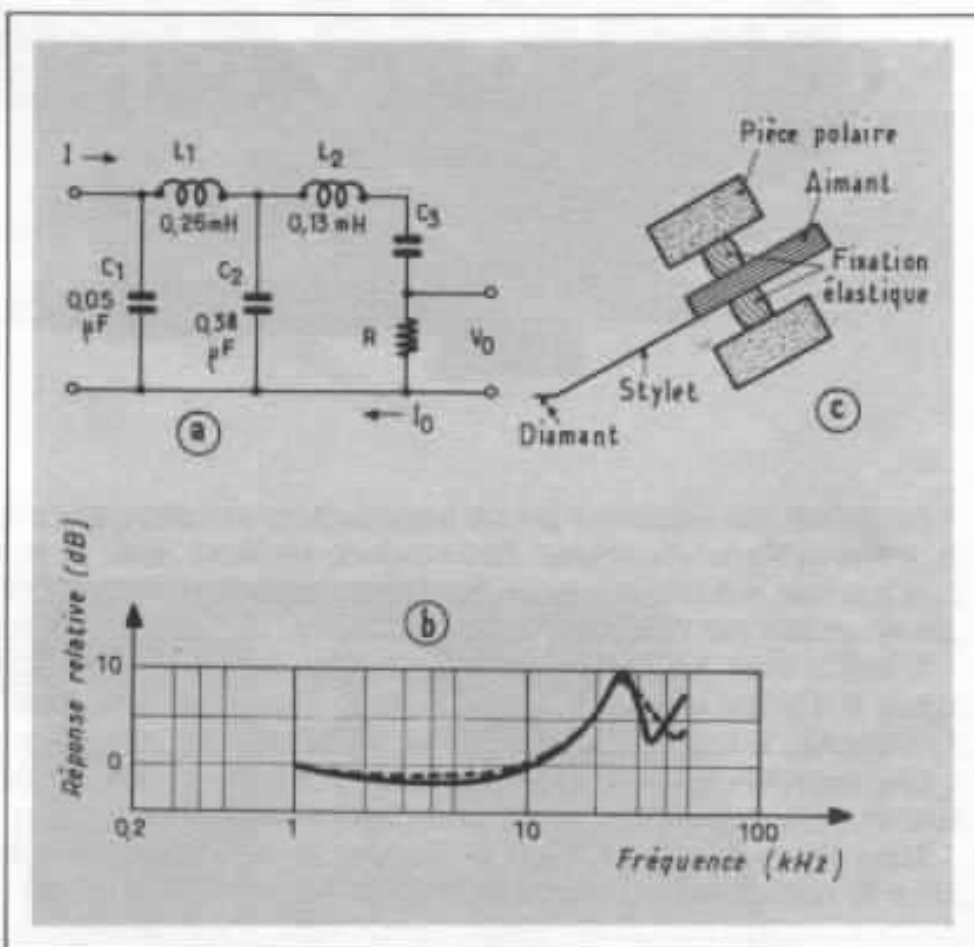


Fig. 2.
 a : Circuit analogue à l'ensemble sillon-équipage mobile
 C_1 : Compliance sillon-pointe.
 C_2 : Compliance du stylet.
 C_3 : Compliance de la fixation.
 L_1 : Inertie stylet-pointe.
 L_2 : Inertie partie aimant.
 R : Amortissement de la fixation.
 I : Vitesse gravée.
 I_0 : Vitesse en sortie de l'équipage mobile
 V_{in} : Force d'appui.
 b : Réponse mécanique type.
 c : Paramètres de l'équipage mobile.

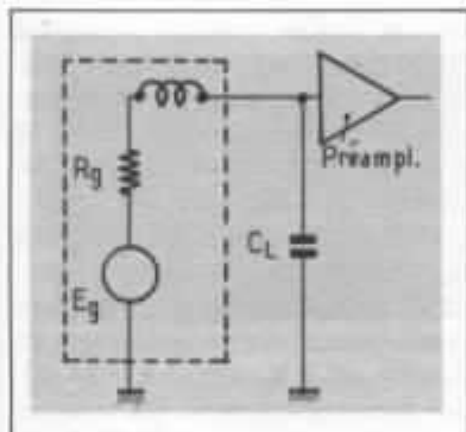


Fig 3 - Le circuit électrique de l'interface cellule aimant mobile-préamplificateur.

tous ces préamplificateurs, hormis un seul, présentaient des anomalies dans la réponse de l'ensemble en haute fréquence.

Le phénomène est connu sous le nom « d'interaction d'inductance de cellule ». Celui-ci peut être mis en évidence en comparant les réponses en fréquence du système cellule-préamplificateur avec ou sans l'insertion d'un étage intermédiaire à haute impédance d'entrée, la charge résistive de 47 K ohms recommandée pour la cellule étant respectée (résistance entre l'entrée et la masse). Les différences ainsi obtenues se confirment à l'audition. L'auteur donne l'exemple d'un préamplificateur de « bon niveau » présentant un écart de $\pm 0,5$ dB de 20 Hz à 20 K Hz par rapport à l'égalisation RIAA en mesure conventionnelle avec une source de tension. Ce préamplificateur en utilisation réelle, avec une capacité de câble de 200 pF, donne des écarts importants de 1,5 dB à 7 KHz et de 6,5 dB à 20 KHz (figure 4).

Les causes sont nombreuses, la plus complexe et la plus grave puisqu'elle ne peut être compensée, provient de l'étage d'entrée lui-même. Elle implique le gain en boucle ouverte, la largeur de bande, l'impédance d'entrée de l'étage, la boucle de contre réac-

tion de la compensation RIAA.

A titre d'exemple, l'impédance d'entrée du préamplificateur peut chuter de 40 % à 20 KHz par rapport à la valeur à 1 KHz.

Notre propos n'est pas de rentrer dans une analyse des problèmes posés par la compensation RIAA. Il convient cependant d'être conscient de la difficulté d'effectuer une telle compensation. Cela fera l'objet d'un article à développer ultérieurement, car c'est très certainement une source de grosses perturbations.

teur et le câble de liaison rentrent en jeu. Aussi convient-il de soigner l'adaptation pour placer le phonolecteur dans sa zone de fonctionnement optimal déterminée par son constructeur. En fait il ne s'agit que d'une compensation et non d'une correction exacte, puisque les phénomènes sont de nature différente, mécanique et électrique.

La figure 5 représente le schéma équivalent d'une cellule à aimant mobile (R_g, L_g) associée à un préamplificateur dont l'impédance d'entrée est caractérisée par R_{in} et C_{in} , le câble

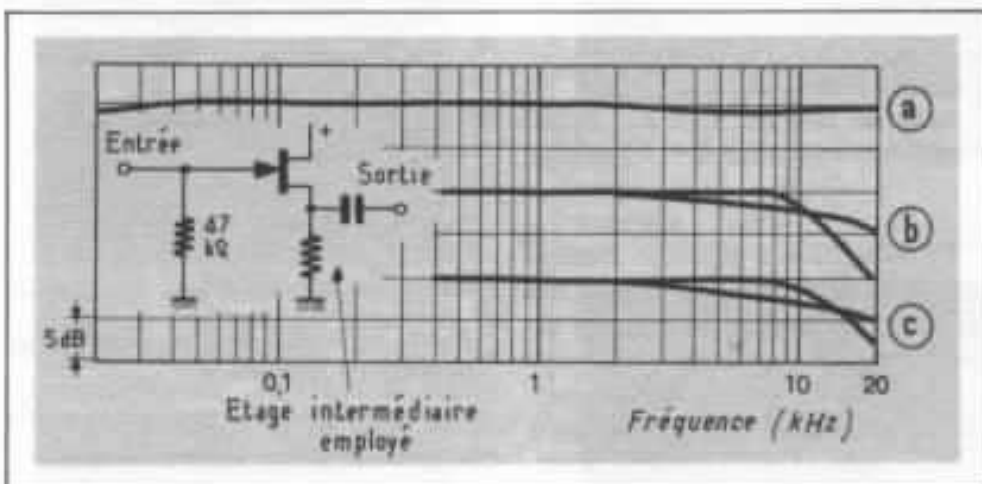


Fig. 4. Interaction cellule-préamplificateur. a) Réponse de l'étage RIAA excité par une source de tension. b) Réponse de l'étage RIAA excité par une cellule avec ou sans étage intermédiaire. Capacité de câble 200 pF. c) Comme en b sans capacité de câble.

On remarquera que l'atténuation se manifeste à partir de 1,5 KHz lorsqu'il n'y a pas d'étage adaptateur. Ne pas prendre en compte la coupure haute de ce dernier, utilisé pour la mise en évidence de l'interaction entre préamplificateur et cellule.

L'ADAPTATION DE L'IMPEDANCE :

a) Influences de la capacité et de la résistance de charge : La réponse globale du phonolecteur est la résultante de la réponse mécanique d'une part et de la réponse électrique d'autre part. Mécaniquement, aucun paramètre n'est modifiable, ils sont liés à la construction même de la cellule.

Par contre électriquement, l'étage d'entrée du préamplifica-

intervient par sa capacité C_l . Le circuit résonne à la fréquence:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_g C}}$$

ou $C = C_l + C_{in}$ est la capacité équivalente à celle du câble en parallèle sur celle de l'entrée.

A titre d'exemple une cellule Shure V 15 IV a pour caractéristique $R_g = 1380$ ohms (mesurée en courant continu) et $L_g = 500$ mH.

Le circuit constitué par cette cellule associée à une capacité de 250 pF résonnera à :

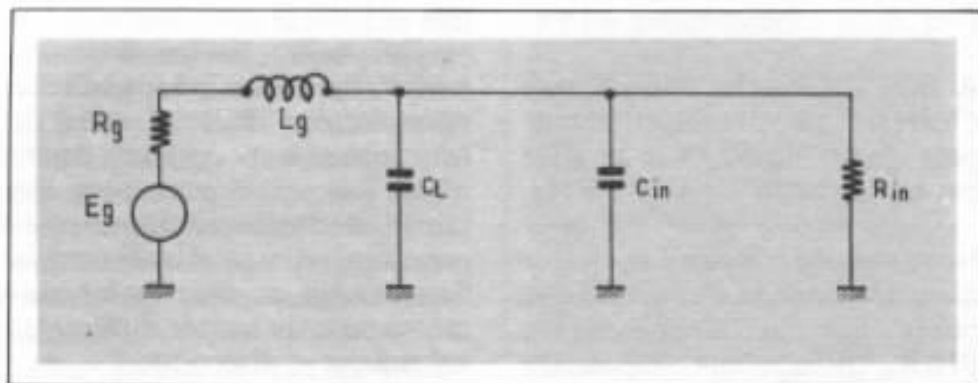


Fig. 5. Circuit simplifié de l'ensemble cellule à aimant mobile et préamplificateur.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{500 \cdot 10^{-3} \cdot 250 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f = 14240 \text{ Hz}$$

Pour $C = 100 \text{ pF}$ $f = 22520 \text{ Hz}$
 Pour $C = 300 \text{ pF}$ $f = 13000 \text{ Hz}$

La courbe de réponse électrique d'une tête magnétique est linéaire jusqu'à sa fréquence de résonance. Dans la majorité des cas, il convient de fixer la résonance vers 15 KHz de sorte qu'à 25-30 KHz, l'altération électrique soit suffisante pour compenser le pic de résonance mécanique-sillon-stylet se situant dans cette zone de fréquences pour les cellules de bonne qualité.

Car insistons sur le fait que la réponse globale est la résultante des réponses électrique et mécanique. La figure 6 donne un exemple de réponse suivant la valeur de la charge capacitive.

La résistance de charge Rin a également son influence, plus elle est importante plus l'amortissement de la résonance est faible car elle se trouve en parallèle sur la capacité, la surtension du circuit augmente. L'effet de la résistance de charge est indiqué en figure 7.

A l'écoute en passant de 47 Kohms à 100 Kohms par exemple on remarque l'accentuation mar-

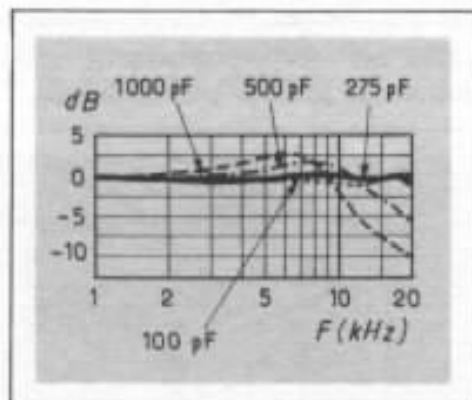


Fig 6 - Influence de la capacité sur la réponse en fréquence.

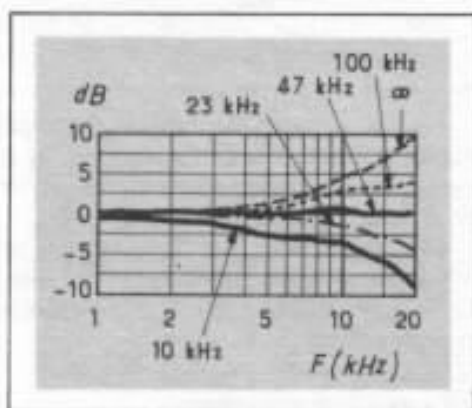


Fig 7 - Influence de la résistance de charge sur la réponse en fréquence.

quée des bruits de surface dues à la non altération de la résonance mécanique entre le diamant et le sillon.

b) Mesure de la capacité du câble :

Nous disposons pour l'analyse de l'adaptation d'un capacimètre Dynamic Sound Devices. Celui-ci est conçu pour effectuer les mesures de capaci-

tés de faible valeurs : jusqu'à 1 000 pF, pour une valeur résistive de l'impédance suffisamment élevée, c'est-à-dire 10 Kohms. Il est donc nécessaire lors de la mesure de la capacité du câble de liaison entre cellule et préamplificateur de déconnecter le phonolecteur dont la résistance interne est généralement de l'ordre de 1 Kohm. Le bras utilisé pour notre série de mesures possédait avec le câble qui lui était associé une capacité totale de 110 pF.

Il faut noter que ce type de capacimètre, utilisant un signal à très haute fréquence, permet de mesurer la capacité d'entrée d'un préamplificateur lorsque celle-ci n'est pas déterminée par son constructeur, il convient toutefois d'effectuer l'opération avec l'appareil hors tension secteur.

c) Les disques de mesures :

Nous avons utilisés le disque CBS STR 112 comportant des signaux carrés à 1000 Hz gravés à 5 cm/s en latéral et vertical. Ce disque n'est pas gravé suivant la norme RIAA, aussi la cellule attaquait un préamplificateur en entrée auxiliaire dont l'impédance d'entrée était en accord avec la valeur résistive annoncée par le constructeur du phonolecteur utilisé (47 Kohms), la capacité d'entrée de l'étage étant nulle.

La valeur désirée de la capacité d'entrée a été obtenue par la mise en parallèle sur l'entrée de condensateurs de bonne qualité.

d) Analyse des clichés :

La cellule utilisée est de type à aimant mobile. Les photos 1 à 6 mettent clairement en évidence l'influence de l'adaptation capacitive. On notera que lorsque la



Photo 1 : Réponse cellule à aimant mobile $C_L = 110 \text{ pF}$ $C_{in} = 0$
8 carreaux 1 ms

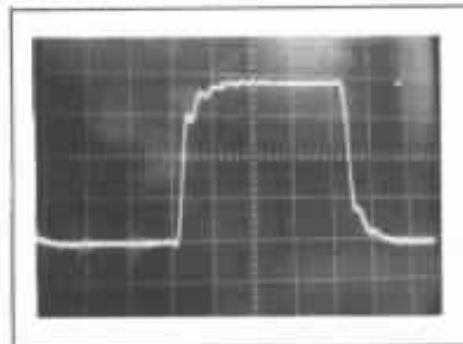


Photo 2 : $C_L + C_{in} = 210 \text{ pF}$.

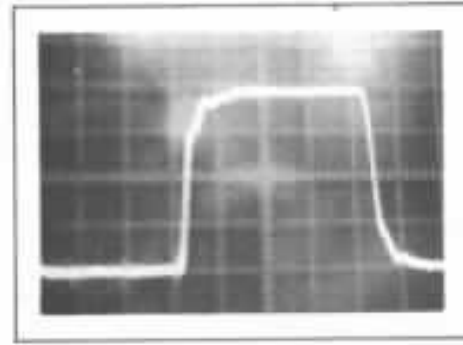


Photo 3 : $C_L + C_{in} = 310 \text{ pF}$.

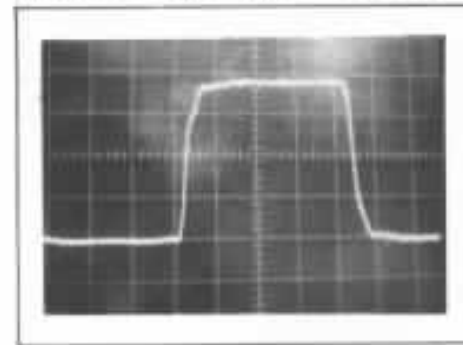


Photo 4 : $C_L + C_{in} = 410 \text{ pF}$.

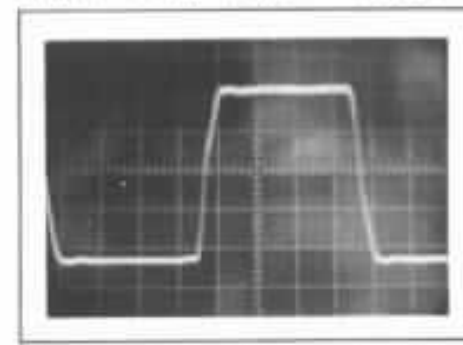


Photo 5 : $C_L + C_{in} = 610 \text{ pF}$.

capacité dépasse la valeur requise, une suroscillation apparaît. La capacité joue naturellement sur le coefficient de surtension du circuit électrique.

L'expérience que nous avons effectuée portait sur une cellule tout à fait conventionnelle. L'influence peut être beaucoup plus aigüe sur certaines cellules où la résonance mécanique présente une forte acuité.

A titre indicatif, nous avons également analysé les modifications apportées par la variation de capacité d'entrée, dans le cas d'une cellule à bobine mobile. Lesquelles, insistons sur ce point présentent une impédance de source pratiquement constante et étant égale à la faible résistance de la bobine, de quelques dizaines d'Ohms. Cet aspect est positif pour le préamplificateur. Toutefois les vibrations mécaniques se manifestent clairement dans la tension de sortie si le constructeur n'a pas résolu convenablement l'amortissement. Une résonance mécanique sous-amortie, telle qu'elle peut se présenter à proximité du spectre audio, s'accompagne d'une pointe dans la réponse en haute fréquence distordant d'autant la reproduction; la photo 7 met bien ce point en évidence et explique sans doute l'impression subjective d'un surcroît de dynamique, que l'on peut percevoir avec certains de ces phonoclecteurs.

Les clichés 8 à 10 montrent que l'effet de la capacité d'entrée sur l'amortissement est nul. L'amélioration obtenue sur les suroscillations n'est due qu'à une limitation de bande causée par la valeur très élevée des capacités employées 47 nF et 0,1 μF ! On est donc sans recours, tout dépend de la construction.

e) Comment réaliser l'adaptation ?

Si vous possédez une cellule X,

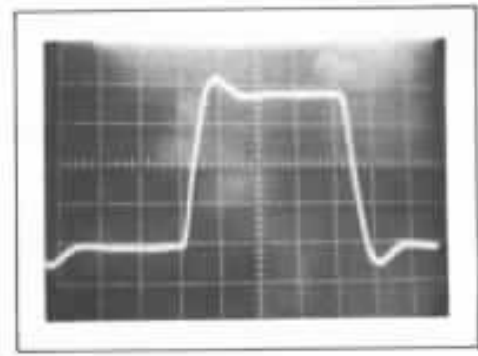


Photo 6 : $C_L + C_{in} = 1110 \text{ pF}$.

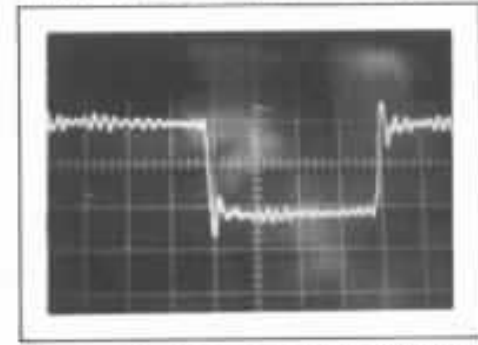


Photo 7 : Réponse cellule à bobine mobile $C_L = 110 \text{ pF}$.
8 carreaux 1 ms



Photo 8 : $C_L + C_{in} = 420 \text{ pF}$.

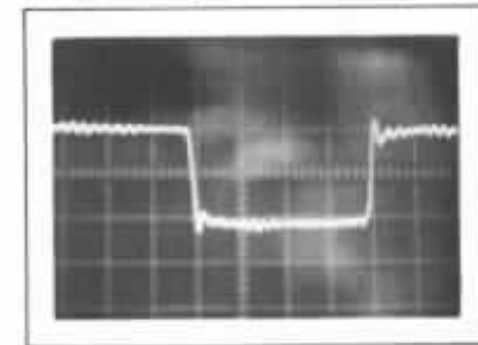


Photo 9 : $C_L + C_{in} = 47 \text{ nF}$

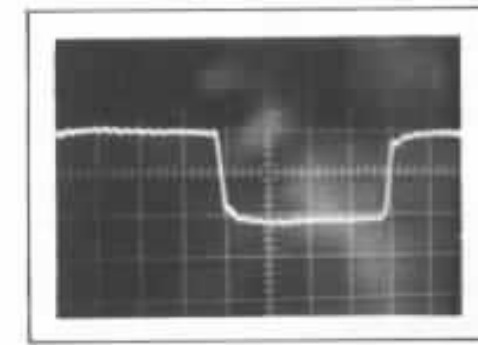


Photo 10 : $C_L + C_{in} = 0,1 \mu\text{F}$

Marques	Références	Résistance de charge recommandée	Capacité de charge recommandée
AKG	P6,P7,P8	47k	470pF
ADC	ZLM et tous modèles MkIII	47k	275pF
Audio Technica	Tous modèles AT et signet	47k	200pF
B & O	MMC-3000,MMC-4000 MMC-6000	47k 100k	200pF 100pF
Decca	London MKVI àGold» et «Plum»	47k	(*)
Empire	2000Z,2000T autres modèles série «2000»	47K 47k	300pF 500pF
Grace	Modèles série «4000» F9-F,F9-U	100k 100k	100pF 80pF
Grado	Autres modèles F8 et F9	47k	250pF
JVC	Tous modèles série F et G	47k	(*)
Micro-Acoustics	4MD-20X	100k	100pF
Ortofon	20002-e,530-mp,282-e Tous modèles type M20, modèles VMS et FF	47k	200pF
Pickering	Modèles série «Q» Modèles série XV-15 et V-15	100k 47k	400pF 100pF
Satin(Osawa)	M-18,M-117G	47k	(*)
Shure	V15 Type IV V15 Type III M24H	47k 47k 100k	250pF 400pF 100pF
2M95,M93,M91,	M75,M70	47k	400pF
Sonus	Tous modèles	47k	400pF
Stanton	Models série «Q» Modèles 500, 600, 680, 681, 881	100k 47k	100pF 275pF
Supex (Sumiko)	SD-901	47k	(*)

(*)Phonocapteurs dont le comportement selon leur constructeur n'est pas modifié par la variation de la capacité de charge.

Tableau 1 : Valeurs résistive et capacitive de l'impédance de charge des cellules à aimant mobile.

sur un bras Y attaquant un préamplificateur Z comment s'y retrouver ?

Pour vous faciliter la tâche, vous trouverez deux tableaux publiés par APT Corporation, fabricant américain de préamplificateurs. Le tableau 1 donne la valeur résistive et capacitive de l'impédance de charge du plus grand nombre des phonolecteurs à aimant mobile disponible sur le marché. Ce sont les valeurs optimales préconisées par leurs constructeurs.

Le tableau 2 mentionne la valeur de la capacité du câble, pour chacune des deux voies, associé au bras séparé ou monté sur les platines dont la marque est indiquée.

Pour le préamplificateur il vous suffit de vous reporter sur le schéma généralement fourni avec celui-ci et de regarder si il y a une capacité entre l'entrée et la masse. Auquel cas il faut l'ajouter à la capacité du câble; si la somme est inférieure à la valeur recommandée par la cellule utilisée, mettre en parallèle un condensateur dont la valeur correspondra au complément.

Si la somme est supérieure, il faudra alors diminuer la longueur du câble de liaison, la capacité étant directement proportionnelle à la longueur. Ou, le cas échéant, choisir un autre câble dont la capacité linéique est inférieure. Cela peut se présenter avec les phonolecteurs large bande prévus pour le CD 4.

Pour la résistance il n'y a généralement pas de problème. Si toutefois la résistance R_{in} d'entrée est supérieure à celle spécifiée pour la cellule, une résistance R_s mise en parallèle aidera à obtenir la valeur désirée :

$$R = \frac{R_{in} \cdot R_s}{R_{in} + R_s}$$

CONCLUSION

Avec tous ces éléments, vous pouvez optimiser votre interface cellule préamplificateur, dans le cas où il s'agit d'une cellule à aimant mobile.

Si vous utilisez un phonolecteur à bobine mobile, vous n'aurez pas ce problème. Toute-

Marques	Références	Valeur de la capacité
ADC	LMF-1, LMF-2 en option cable de 100 pF	220 pF
AR	XA, XB, XB-77	135 pF
B&O	3000, 1900, 2400, 4002	180 pF
BIC	Tous modèles	160-180pF
BSR	710, 810	225pF
Decca	Decca	300pF
Denon	Tous modèles	100pF
Dual	1209 et suivants 1225, 1226, 1228, 1249 721, 704, 604, 510, 502	240 pF 100pF 180 pF
Dynavector	DV505	50 pF(37pF/m.)
Empire	5981, 59811 698	210pF 100pF cable 1,2m 210 cable 1,5m
Fidélity	FR54	150pF
Research	FR64s, FR66s	100pF
GAS	5'	165pF
Garrard	SL-55, 95 Autres modèles	180pF 110pF
Goldens	Ancien 1m Nouveau 2m	55pF 125pF
Grace	Tous modèles	80pF
Hadcock	Tous modèle	100pF
Harmon Kardon	ST-6, ST-7	110pF
Infinity	Black Widow	80pF
JVC	Tous modèles	85pF
Kenwood	Tous modèles	100pF
Lenco	L133, L236, L830DD L833DD	82pF 25pF
Marrantz	Tous modèles	90pF
Mayware	Formula 4	122pF
Micro-Seiki	Tous bras et tables de lectures	100pF
Mitsubishi	Tous modèles	100pF
Philips	GA222, GA437 GA212, GA312	100pF 160pF
Pioneer	Tous modèles	100pF
Rabco	SL8E	125pF
Revox	B790	205
Rotel	Tous modèles	100pF
SAEC	WE308	100pF
Sansui	Tous modèles	85pF
Sanyo	Tous modèles	100pF
Scott	Tous modèles	100pF
SME	3009 3009 série II et III	127pF Cable 1m2 300pF
Sony	Tous modèles	70pF
Stanton	Tous modèles	95pF
Stax	UA-7	80pF
Technics	Tous modèles	80pF
Thorens	Tous modèles actuels et postérieurs à la TD-124	80pF → 200pF
Verion	MDA	80pF
Yamaha	YP-800 YP-D6, B4, YP-211	80pF 125pF

Tableau II : Capacité du câble reliant cellule-préamplificateur des bras seuls ou équipant les platines dont la référence est indiquée

fois, dans ce dernier cas il serait bien utopique de croire qu'il n'y en ait pas ! Ils sont simplement différents...

Notez que la valeur optimale n'est en rien définitive. Seul l'agrément d'écoute est important, aussi est-il possible de jouer sur cette adaptation pour modifier le rendu sonore globale de votre installation. Schématiquement disons pour vous guider, qu'une diminution de la capacité d'entrée par rapport à la valeur nominale, s'accompagne d'un « durcissement ». Inversement, une augmentation de la capacité provoque un « adoucissement ». On peut donc jouer de part et d'autre de cette valeur en fonction du comportement global de votre ensemble.

Encore faut-il connaître l'adaptation précise pour savoir dans quel sens on évolue...

Références :

[1] TOMLINSON HOLMAN :JAES. Mai 76. Volume 24. Numéro 4, page 263. Newfactors in phonograph preamplifier Design.

[2] ALLEN R. GROH. JAES. Juin 77. Volume 25. Numéro 4, page 385. The Dynamic Vibration absorber. Principle Applied to a High. Quality phonograph, pick-up.

Accessoires

Dynamic sound Devices, distribué par Delta Magnetics, propose un capacimètre et un optimiser pour effectuer tant l'adaptation capacitive que résistive.

DB Systems, distribué par Technology Resources, offre un échantillonnage de capacités directement adaptable sur l'entrée phono du préamplificateur par un raccord en Y.

**Page non
disponible**

La restitution des basses fréquences

Considérations théoriques

Yves Neveu

La restitution des basses fréquences demeure certainement un des sujets les plus appréciés de l'amateur de haute fidélité. Depuis les tous débuts de l'audio, nombreux ont été les innovations, les brevets relatifs à ces premières octaves du spectre sonore. Du bass reflex à l'enceinte close en passant par les cavités accordées, il est bon de prendre du recul pour juger de la soi disant évolution de ce domaine.

Dans cette première partie, l'auteur passe en revue les notions principales qu'il ne faut pas perdre de vue pour avoir une bonne vision d'ensemble du problème. La seconde partie abordera la réalisation d'un bass reflex de 100 dm³ utilisant un haut-parleur de 31 cm d'un coût abordable.

Lors des prémices de la haute-fidélité, que ce soit durant et après guerre, jusqu'à l'ère de la stéréophonie, une importance primordiale était accordée aux enceintes acoustiques.

Cette prédominance accordée aux éléments électro-mécaniques sur la partie strictement électronique s'explique par la grande qualité atteinte par les amplificateurs dès l'avant guerre alors que les haut-parleurs balbutiaient.

Il est un domaine où les haut-parleurs atteignent déjà une qualité assez remarquable, c'est celui de la sonorisation des salles de cinéma. Les chambres de compression et les pavillons multicellulaires d'aujourd'hui restent pour l'essentiel identiques à ceux de l'avant guerre. En ce qui concerne le canal grave, la grosse différence porte sur le remplacement de l'électro-aimant par un aimant-permanent. Il peut sembler étrange que l'effort de

recherche en ce qui concerne les haut-parleurs n'ait pas porté sur des techniques dérivées des meilleurs systèmes de sonorisation.

Il est très simple de répondre à cette objection étant donné les puissances limitées des amplificateurs de l'époque (de l'ordre de 14 Watts). Il était nécessaire d'avoir un rendement très élevé, celui-ci était obtenu par d'immenses baffles plans aidé par des pavillons chargeant la

face avant du haut-parleur de basse.

Les grandes dimensions du haut-parleur de sonorisation ont eu pour résultat que les appareils domestiques de l'avant guerre étaient dépourvus de baffle ou plutôt que celui-ci était réduit au meuble contenant l'appareil ce qui entraînait de nombreuses résonances (fig 1).

Considérations sur le volume d'un baffle

La technique d'un transducteur est essentiellement liée à celle de son reproducteur de basse. En effet, l'encombrement et la forme de l'enceinte dépend de la charge du haut-parleur grave. Jusque dans les années 1950, un baffle de 100 dm³ interne était considéré comme un modèle de petit encombrement, alors que de nos jours, un tel volume semble considérable.

Si l'on excepte les enceintes à pavillon replié dont l'encombrement est énorme il y avait dans les années 50 deux techniques opposées : Bass-reflex de 100 à 250 dm³, baffle pseudo-infini de 300 dm³.

Il est bon de remarquer que le baffle clos est plus volumineux que le bass-reflex, il n'était pas conçu pour utiliser des haut-parleurs très souples à membrane lourde, la compliance étant assurée pour l'essentiel par le volume d'air enclos. Mais si l'on veut utiliser des boomers assez souples munis d'une membrane légère, il est impossible de trop réduire le volume de charge sans entraîner une grande limitation de la bande passante vers le grave. Si l'on réduit dans de fortes proportions ce volume, une importante distorsion peut en résulter car la pression augmente sur la suspension périphérique et il y a de grandes forces de réaction sur la membrane

Il est de bon ton d'affirmer de nos jours que la production des fréquences basses ne pose aucun problème. Il est en effet courant de voir des enceintes d'un volume assez réduit assurer une reproduction des fréquences basses étendues avec un taux de distorsion très raisonnable.

Cependant, à l'écoute on est souvent surpris par une sonorité qui n'est pas naturelle. En particulier en ce qui concerne les cordes de violoncelles et de contrebasses, il se produit deux phénomènes très curieux. Si les notes tenues semblent sonner normale-

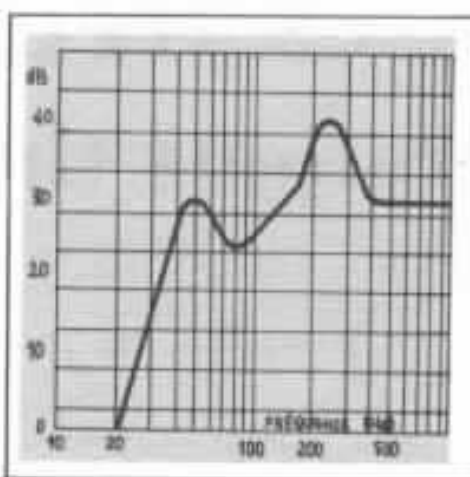


Fig 1 - Courbe de réponse d'un coffret à dos ouvert la résonance de 10 db se produit quand la profondeur du coffret est le quart de la longueur d'onde du son émis

ment les attaques, qu'elles soient avec l'archet ou en pizzicati manquent à la fois de mordant et de légèreté. En ce qui concerne le jeu de l'archet, il est souvent malaisé de distinguer si les notes sont attaquées, liées ou piquées. D'autre part à l'extinction des notes tenues il est difficile d'entendre la résonance de la caisse des instruments ; la sonorité n'est pas « racée », elle est épaisse et dure. Si l'on écoute de l'orgue en particulier lorsque les instruments sont d'une taille imposante, les jeux de seize pieds intermodulent entre eux et il est difficile de les distinguer.

Comment une enceinte semblant bien conçue peut-elle présenter des défauts audibles aussi flagrants ? A la réflexion plusieurs facteurs peuvent intervenir. La distorsion se mesure en régime sinusoïdal à niveau constant, c'est le régime qui, pour une énergie déterminée, représente les accélérations les plus faibles ; d'autre part, cette mesure ne tient pas compte ni de l'établissement, ni de l'extinction du signal.

Je me souviens de moqueries de certains techniciens lorsque Monsieur G. Cabasse mentionnait dans ses notices la réponse transitoire du haut-parleur de basse, et d'avoir lu par ailleurs des considérations sur les basses qui ne sont ni molles ni dures ainsi que les haut-parleurs à talonnage Californien. Ces affirmations qui oublient les phénomènes transitoires cèdent devant les résultats d'écoute.

Un HP de basse doit aussi bien reproduire le bas médium

Il faut bien considérer qu'un haut-parleur de basse doit répondre jusqu'à des fréquences d'environ 500 à 600 hertz, ce qui semble une limite inférieure, et que l'amplitude des mouvements qu'il doit atteindre est assez considérable. Ce n'est pas parce que ses accélérations sont moins grandes que celles d'un transducteur d'aiguë qu'il faut les négliger. Malheureusement, les mesures de distorsion aux très basses fréquences mettent souvent en valeur des haut-parleurs possédant des membranes lourdes et des bobines mobiles très longues. Si la distorsion à 40 Hertz peut être réduite, leur réponse dans le haut de la bande à reproduire peut être catastrophique aussi bien en ce qui concerne les accélérations que les décélérations. Même si l'attaque peut en partie être rendue par le haut-parleur de médium, le traînage reste strictement présent. Ce phéno-

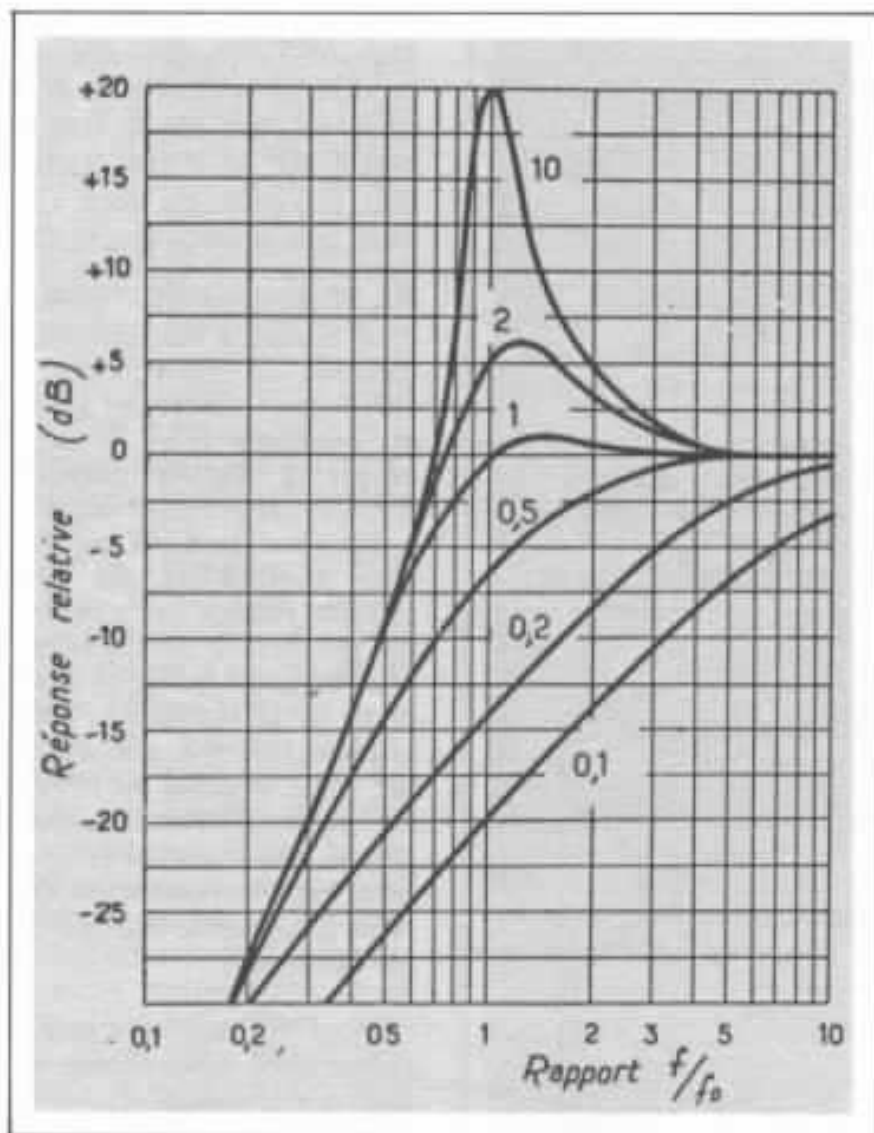


Fig 2 - Réponse relative, en fonction de la fréquence, d'un H.P. monté sur enceinte close. La surtension Q du système, prise pour paramètre, est inscrite sur chaque courbe. Ces courbes sont des courbes universelles, la réponse ne dépendant que de la fréquence de résonance et du Q du système.

même peut être caricaturé par les subwoofer qui étendent la reproduction dans l'extrême grave, cela est presque toujours obtenu au détriment de la clarté du message. Un autre élément en défaveur des systèmes à suspension acoustique de faible volume est le fait que dans le grave un haut-parleur rayonne autant d'énergie par sa face arrière que par sa face avant.

Quand le volume est trop réduit, le niveau acoustique interne de l'enceinte peut atteindre et dépasser 130 décibels. A ces niveaux la propagation du

son dans l'air n'est plus linéaire, il y a compression des couches d'air qui sont au voisinage de la membrane et les basses prennent un timbre particulier bien repérable. Ce phénomène étant une loi physique, on ne peut compter, ni sur le filtre ni sur le prix du baffle pour le contourner.

Il ne viendra à l'idée d'aucun facteur d'instrument de diminuer la taille des instruments graves pour améliorer la sonorité.

Bien sûr l'encombrement d'un baffle peut être gênant mais il ne faut pas tomber dans le para-

doxe. Jamais un grand orgue n'aura la taille d'un piccolo, c'est bien dommage pour voyager. Ces considérations préliminaires peuvent sembler des évidences mais à partir du moment où des phénomènes physiques sont abordés, il faut bien se plier à la nature.

Les lois de la propagation du son dans l'air sont immuables. Si les instruments acoustiques ont souvent de merveilleuses sonorités c'est que leurs facteurs utilisent au mieux les lois de l'acoustique au lieu de les contrarier.

Si elle est souvent de bois, une enceinte comporte aussi un haut-parleur

Venons en à notre problème qui est de concevoir une enceinte destinée à reproduire les fréquences basses avec un rendement et une qualité suffisante. Nous devons nous plier à plusieurs règles.

1) Déterminer un volume minimum compatible avec la qualité du son.

2) une rigidité et une densité des constituants matériaux le baffle suffisant.

3) Le haut-parleur devra présenter des caractéristiques bien déterminées.

Commençons par le haut-parleur, la volonté de répondre jusqu'à des fréquences de quarante hertz nous a amené à choisir une membrane d'un diamètre d'environ 24 centimètres. Pour bien répondre aux transitoires, la masse de cette membrane ne doit pas dépasser 15 grammes, elle ne peut non plus guère tomber en dessous de 10 grammes car sa rigidité pourrait en souffrir.

D'autre part, pour que cette membrane soit bien maîtrisée, il faut que le circuit magnétique fournisse une énergie suffisamment grande afin que, pour la

compliance de suspension déterminée, le coefficient de surtension du haut-parleur à la fréquence de résonance soit compris entre 0,2 et 0,4 lorsqu'il est monté dans le baffle. Si je mentionne « pour une compliance de suspension déterminée » c'est que lorsque le haut-parleur est très souple (trop) le coefficient de surtension diminue. Cela permet de réduire le traînage à la fréquence de résonance, les mouvements de la membrane ne seront plus contrôlés aux fréquences les plus hautes que le haut-parleur aura à reproduire. Un haut-parleur de basse ne doit pas traîner à la résonance (son de tonneau), ce que réalise assez bien les systèmes à suspension acoustique, mais il doit aussi présenter un minimum de traînage dans le reste du spectre, pour cela le circuit magnétique doit être puissant. C'est en contradiction avec beaucoup de réalisations modernes où pour étendre la réponse dans le grave on utilise un circuit magnétique peu puissant associé à une membrane lourde munie d'une suspension très souple. La réponse en régime sinusoïdal peut être excellente ; malheureusement, en ce qui concerne la musique c'est une autre histoire.

Supposons que notre haut-parleur présente toutes les caractéristiques favorables à une bonne reproduction des fréquences graves. Montons le dans un baffle clos d'un volume de 90 à 100 dm³. Si le Qs du HP est inférieur à 1 (c'est une obligation si l'on veut utiliser un haut-parleur de qualité) ; lorsque le HP sera connecté sur un ampli à faible impédance interne, nous aurons un affaiblissement marqué de la réponse dans le grave. Cet affaiblissement commencera d'autant plus haut en fréquence par rapport à la résonance du système haut-parleur baffle clos que le Qs (fig 2) sera plus petit. Dans le grave le diamètre du cône est nettement inférieur à la longueur de

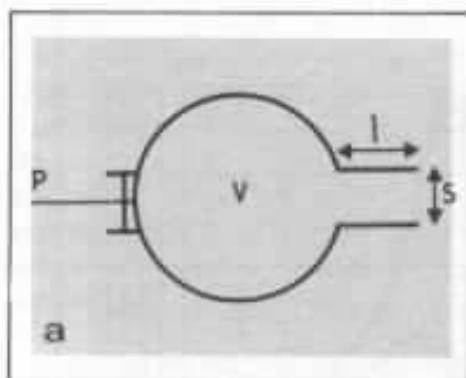


Fig 3 - a) Résonateur de Helmholtz excité par un piston (P)
b) Dans le bass-reflex le piston est remplacé par H.P.

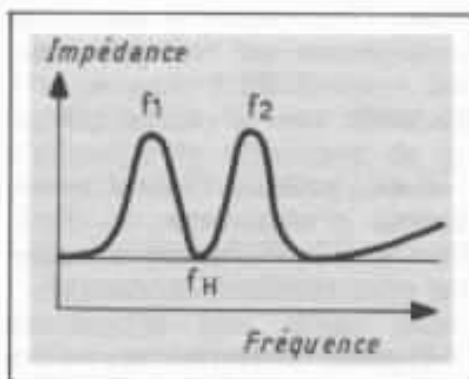
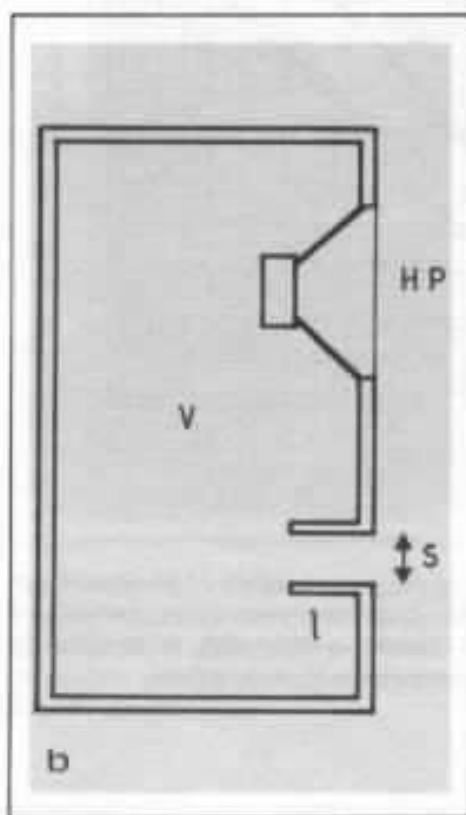


Fig 4 - Courbe impédance (Cf texte)

l'onde à rayonner, la pression engendrée est proportionnelle au produit de la vitesse de déplacement du cône par la fréquence, plus le HP est à haut rendement plus la vitesse du cône s'ajuste pour que la force contre électromotrice du HP équilibre la force électromotrice. La vitesse du cône tendra à être constante en fonction de la fréquence. Si la force électromotrice appliquée est constante (c'est le cas d'un ampli à faible impédance interne) ; la pression sonore tend à diminuer de 6 dB par octave. Une diminution de Qs du système retarde cette chute de 6 dB par octave car la vitesse du cône est augmentée par le phénomène de la résonance. Dans un système clos il y a incompatibilité entre la chute de la réponse aux basses fréquences et la restitution des transitoires qui exigent impérativement un Q inférieur à 0,5 (entre 0,2 et 0,3 semble optimum).

Pour qu'un système clos puisse bien fonctionner il faudrait que le volume du baffle soit important (300 dm³) et la résonance de celui-ci très basse afin que la chute de rendement ne commence pas trop tôt.

Sortons de l'enclos

Etre reflex ou non telle est la question (ou bien pavillon, etc...). Nous nous bornerons à étudier ce bon vieux « bass reflex » car il semble réaliser le meilleur rapport bande passante rendement qualité des basses et volumes. Les systèmes à pavillon peuvent être d'une qualité très remarquable mais ils ont un très grand encombrement. Lorsqu'ils utilisent une surface d'angle de pièce pour augmenter la surface de la bouche du pavillon ils ont l'inconvénient d'exciter au maximum les résonances du local. Les systèmes à labyrinthes arrière, ouverts ou fermés ont en général

plus de traînage que les bass reflex car ils utilisent une colonne acoustique qui tend à résonner à la façon d'un tuyau d'orgue. Lorsqu'ils sont ouverts ils présentent un temps d'établissement du signal important et restituant mal les transitoires.

Ce temps d'établissement ne doit pas être confondu avec le temps de propagation du son dans l'air (ce temps serait négligeable) c'est le temps que met le système à atteindre son plein rendement lors de l'établissement du signal.

Quand un résonateur de Helmholtz (bass reflex) a des dimensions qui restent petites devant la longueur d'onde à reproduire sa résonance dépend très peu de la forme de son volume, c'est-à-dire que les frictions internes sont à la fois limitées et restent assez constantes. Dans le cas d'un labyrinthe, la colonne d'air étant étroite et longue les frictions sont beaucoup plus importantes et la propagation de la colonne d'air est freinée. Sans vouloir entrer dans une contre-

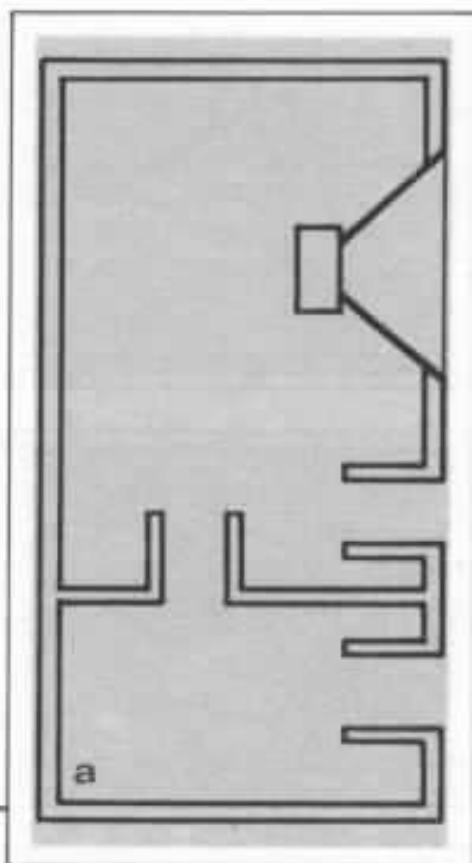
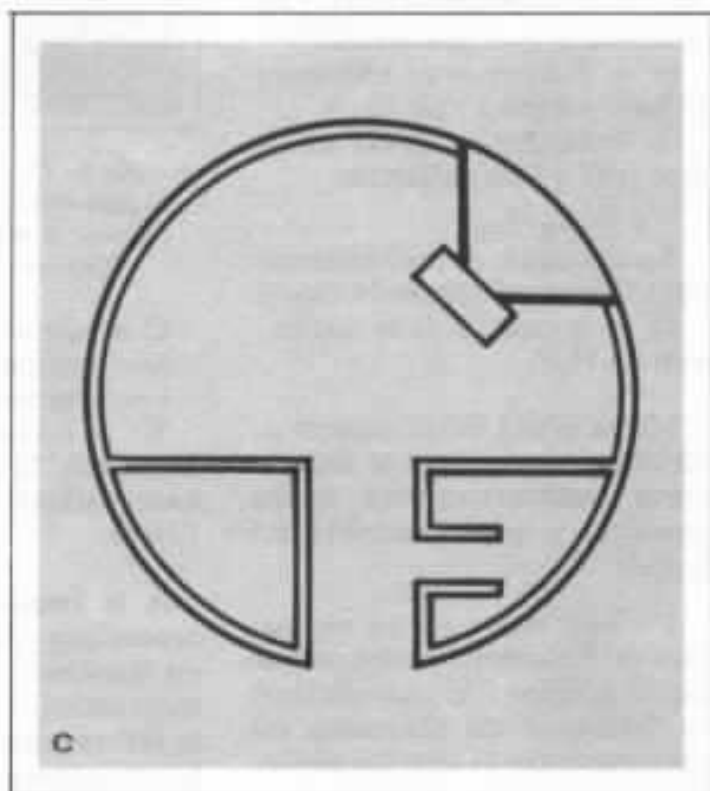
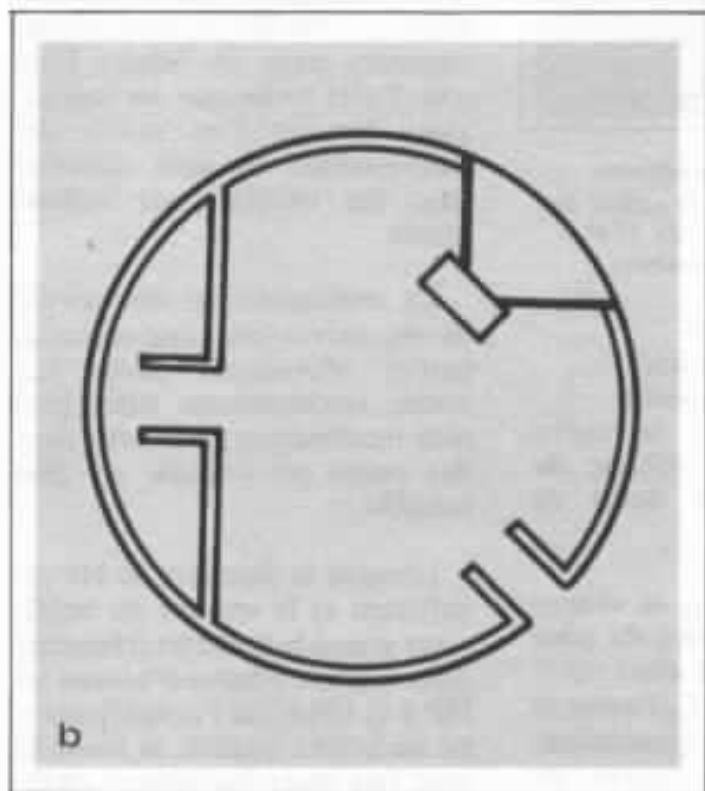


Fig 5 - a) Dans le baffle bi-reflex le résonateur auxiliaire participe au volume global grâce à son évent.

verse, je reste tout à fait d'accord avec G. A. Briggs qui considèrerait que pour une écoute d'appartement le bass reflex est la solution la plus efficace. Son plus grand tort est sa simplicité apparente, une autre raison de sa mauvaise réputation et le « son de tonneau » qui est la conséquence de l'utilisation de mauvais haut-parleurs dont le haut Q_s est plus grand que 0,5. S'il permet un rendu quantitatif du grave suffisant, il entraîne un traînage très important.

Comment « mïtonner » son baffle

Pour réaliser un bon bass reflex il faut utiliser un bon haut-parleur mais aussi réaliser une enceinte de volume adéquat. Si le volume est trop petit, la réponse de l'enceinte se rapproche de très près de celle d'une enceinte close car l'évent ne peut (à cause de sa taille) rayonner beaucoup d'énergie, d'autre part, il se forme à son voisinage des phéno-



b et c) Ces deux boules Elipson à résonateur auxiliaire se distinguent par le fait qu'en C l'évent du résonateur auxiliaire rayonne dans l'évent principal.

mêmes non linéaires, la distorsion devient plus grande que si le baffle était clos.

Une vogue récente veut que la connaissance du mode de fonctionnement du bass reflex ne soit élucidé qu'à l'aide d'analogie électrique avec l'apport de l'informatique. C'est méconnaître les travaux de nombreux précurseurs. Si le bass-reflex remonte quant à son invention à 1936 (brevet Jensen) de nombreuses études théoriques ont été publiées ultérieurement. Nous signalerons une étude de D.E.L. Shorter dans *Wireless World* de novembre et décembre 1950, une série de neuf articles publiés par Voigt radio - electronics en 1959, qui explique le fonctionnement du bass reflex sans faire appel aux mathématiques et surtout une courte étude théorique de James F. Novak publiée dans *I.R.E. Trans on Audio*, janv.-fév. 1959 (voir p. 20 bas de texte).

Cette étude tient compte de tous les facteurs importants et les ramène à trois grandeurs.

F_r = Fréquence de résonance du haut-parleur à l'air libre.

Q_s = Surtention du HP à l'air libre relié à l'amplificateur

$$\alpha = \Sigma_B / \Sigma_S$$

Σ_B = raideur de l'air enfermée dans l'enceinte (supposée close).

Σ_S = la raideur de la suspension du H.P.

Moins grand est le rapport α , meilleure est la réponse dans le grave malheureusement moins grand et α plus l'enceinte est grande

Un bass reflex est un résonateur de Helmholtz excité par un piston vibrant (le haut-parleur) sa fréquence de résonance est déterminée par la relation approchée de Rayleigh. (fig 3)

$$F_H = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{S})}}$$

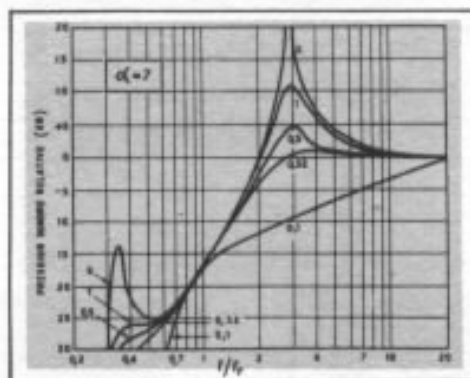
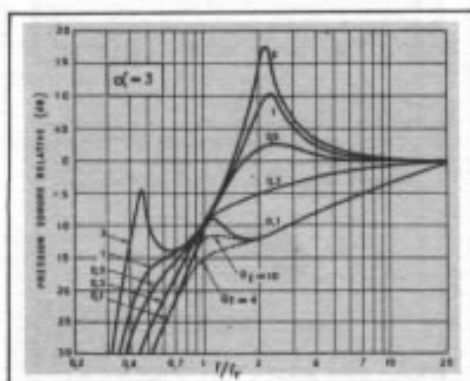
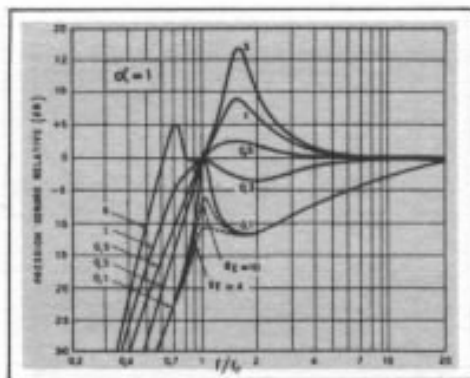


Fig 6 - Courbes de réponse du bass-réflex, selon la valeur de α avec la surtension du H.P. (Q_s) comme paramètre.

C = vitesse du son

S = section du goulot

l = longueur du goulot

V = volume de la cavité déduction faite du volume du haut-parleur et de celui de l'évent.

A la fréquence F_H la charge acoustique sur l'arrière du cône est maximum elle est alors purement résistive. Pour F_H l'évent et le HP rayonnent en quadrature, le rayonnement de l'évent est beaucoup plus important. En dessous de F_H les rayonnement tendent à être en opposition de phase au-dessus de F_H en phase.

le rayonnement de l'évent est effectif pendant deux tiers d'octave au-dessous et au-dessus de F_H . Si l'on fait la courbe d'impédance d'un bass reflex l'impédance augmente au-dessus et au-dessous de la résonance.

Il y a deux maximums de vitesse du cône en f_1 et f_2 . D'un point de vue auditif f_2 est la résonance audible située dans une zone où l'oreille est plus sensible, f_1 dans un système bien conçu est rejeté en dessous de 20 hertz, région où la réponse du baffle est très atténuée. f_2 peut être en partie rejeté par un résonateur auxiliaire qui nous donnera deux nouvelles résonances f_2 et f_3 . Ce résonateur existe sous plusieurs formes. La conception ancienne semble être le montage bi reflex (fig 5) d'origine Américaine et sera utilisée plus tard par Vega et par Siare. Monsieur Chalambeau, concepteur des enceintes Alpheratz, en utilise une forme modernisée dans laquelle les deux événements externes sont confondus. le champion du résonateur auxiliaire est Monsieur Léon qui réalise de nombreuses variantes dans ses boules Elipson. Cette technique est intéressante lorsque l'on utilise des haut-parleurs de petit diamètre dans des enceintes de volume réduit.

La multiplication des cavités de résonateur peut engendrer de petites résonances dues aux ondes stationnaires. Elles sont plus nombreuses et placées dans des zones où l'oreille est plus sensible.

Lorsque le diamètre du HP est suffisant et le volume du baffle assez grand la tenue en fréquence dans le grave permet d'utiliser un HP à Q faible. Si l'amplificateur est de bonne qualité, la bosse f_2 peut être assez facilement amortie.

Nous donnons maintenant trois graphiques (fig 6) emprun-

tés à l'article de J.F. Novack qui donne la courbe de réponse selon la valeur de Q_s surtension du haut-parleur en fonction du rapport $\omega = 1, \omega = 3, \omega = 7$, c'est-à-dire pour des baffles de volume de plus en plus réduit. Dans aucun des exemples la bosse f_1 ne s'avère très gênante, par contre, l'amplitude de f_2 augmente quand le baffle est plus petit et l'écartement des fréquences critiques f_1 et f_2 s'accroît quand le volume diminue. Ceci s'explique par un meilleur couplage HP enceinte quand le volume est plus réduit. Les fréquences de couplage sont d'autant plus écartées que le couplage est plus serré (analogie avec les filtres de bande radio). Ceci ne fait pas notre affaire et nous fait rejeter définitivement le baffle de volume trop réduit. Par contre si l'on considère le grand baffle et si le HP a un $Q_s > 0,4$ la bosse f_2 disparaît complètement.

Si nous choisissons un baffle parallélépipédique, en maintenant le choix du bass reflex, il

faudra en amortir les ondes stationnaires qui sont les mêmes que celles d'une enceinte close.

C'est plus difficile que dans un baffle clos car l'enceinte ne peut être trop remplie d'absorbant ce qui réduirait la surtension de l'enceinte et l'empêcherait de bien jouer son rôle de résonateur.

Il ne faut pas dépasser 40 % du volume interne en absorbant. Le revêtement des faces habituelles est inefficace dans le grave. Il faut s'orienter vers des solutions plus raffinées. Les croquis suivants, nous donnerons différentes dispositions efficaces dans les fréquences basses.

S'il est intéressant d'établir une théorie donnant une explication d'un phénomène acoustique, il est important de la vérifier par des réalisations concrètes. Nous donnerons en illustration deux réalisations de bass reflex, l'une d'un volume moyen équipé d'un haut-parleur Siare 31 cm TE remarquable par la qualité de ses suspensions, la

rigidité de la membrane, l'énergie de son circuit magnétique permettant un Q_s idéal dans des bass reflex de 90 à 120 dm³, ce haut-parleur servira d'élément de grave dans une réalisation publiée dans un prochain article. L'autre un petit bass reflex de 6,5 dm³ utilisant un HP de 13 cm équipé d'un aimant très important pour éviter que f_2 soit trop marqué et engendre du traînage. C'est un cas limite, en dessous de ce volume il serait ridicule d'espérer une amélioration de la qualité du grave par l'utilisation du résonateur de Helmholtz.

Néanmoins même dans ce cas extrême la sonorité est plus naturelle quand le baffle est ouvert. Cette petite étude n'est qu'un survol rapide du problème de la reproduction des basses fréquences destinée à montrer que bien des paramètres sont contradictoires et que la grenouille ne peut se faire aussi grosse que le bœuf. Les problèmes de rigidité du baffle seront abordés dans un autre article car ils relèvent de la réalisation.

**Page non
disponible**

Le bras tangentiel

Un idéal théorique

Michel Lévy

Le bras de lecture constitue sans aucun doute, l'un des points les plus critiques d'un système haute-fidélité. Plusieurs articles ont abordés dans ces colonnes le bras de lecture pivotant, tant sous l'aspect théorique que sous l'aspect pratique. La remarquable réalisation de Pierre Lurné représente très certainement un aboutissement en la matière. Toutefois, nous ne pouvions passer sous silence le bras tangentiel qui demeure la solution théorique la plus séduisante

Un groupe d'ingénieurs et d'architectes français, «Architecture et Physique appliquée», s'est penché sur le problème. Leurs recherches ont aboutit à la réalisation d'un bras tangentiel, le Goldmund T3. Michel Lévy, membre de ce groupe, a bien voulu nous faire la synthèse de cette étude, elle fera l'objet de deux articles. Le premier aborde les aspects théoriques.

Au sein des systèmes de reproduction sonore les plus élaborés, le bras de lecture apparaît nettement comme l'un des points faibles : l'inadéquation de sa structure vis-à-vis de sa fonction, très complexe, le désigne comme une sorte de goulet d'étranglement dans le processus de restitution du message. Le bras pivotant actuel reste pour beaucoup un « mal nécessaire ».

En effet, même les développements les plus récents (Cf. l'Audiophile n° 6 et 7) semblent échapper d'une part sur l'inévitable et tristement fameuse erreur de piste, et d'autre part

sur les problèmes soulevés par une conception irrémédiablement asymétrique, exigeant des dispositifs de correction (équilibre latéral, anti-skating) jamais totalement efficaces.

INFORMATION, MISE EN FORME, CODE

L'opération de transduction électro-acoustique consiste, en dernière analyse, à traduire en clair un message codé. Le respect du code est une condition absolue pour une traduction fidèle du message.

L'information (ou contenu du

message) peut-être considérée comme une mise en forme de toute substance matérielle (sillon du disque, mais aussi écriture, bande magnétique, texte en braille, etc...) ou même abstraite (au niveau sémantique, l'information entendue comme un ordonnancement de concepts).

Cette mise en forme peut signifier une simple duplication (moulage, copie, mémoire), mais aussi un processus s'effectuant par le passage d'un système de signes dans un autre : c'est ce dernier cas qui s'applique à l'enregistrement et à la lecture de disques.

Pour avoir accès à l'intégralité de l'information, il est nécessaire de respecter le plus strictement possible la norme, ou le code. En effet, le code doit être absolument transparent au message. La moindre erreur ou imprécision est en fait une information parasite (ou un « trou » d'information) qui se surajoute au message original (ou se retranche, une partie du contenu restant occultée).

PRINCIPES DE GRAVURE ET CONTRAINTES DE LECTURE

La gravure d'un disque s'opère dans le respect de certaines règles qui constituent le code ; parmi celles-ci :

- la courbe d'accentuation RIAA,
- la convention de stéréophonie compatible ou de monophonie,
- la constance de la vitesse de rotation,
- l'angle d'attaque de la pointe de gravure,
- la perpendicularité du bras supportant la tête de gravure (par rapport au rayon du disque).

Parmi ces règles essentielles, seules les deux dernières citées demeurent, assez inexplicablement, celles qui se trouvent le plus gravement et le plus souvent transgressées.

De même que la précision de la désaccentuation RIAA (ou que la stricte régulation de la vitesse de rotation), la perpendicularité de la tête de lecture représente une contrainte à respecter absolument pour une restitution de haute qualité.

Le système de lecture tangentielle se serait depuis longtemps imposé de façon universelle *si et seulement si le « pas » du sillon était constant*.

Ce seul détail, en apparence de peu de poids, suffit à rendre le

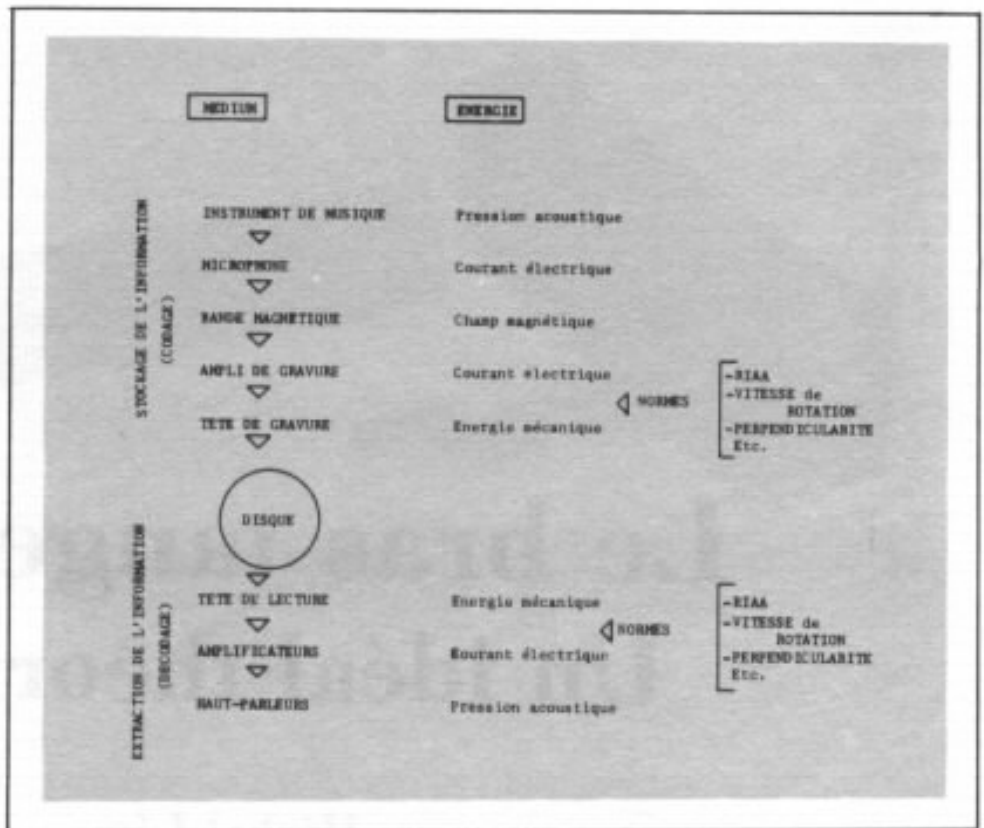


Fig 1 : Energie mise en jeu dans le cheminement de l'information

problème théoriquement insoluble (comme dans tout système requérant un asservissement) et donc, en pratique, laisse place à une solution réelle (et réalisable), complexe, mais virtuellement aussi proche que possible de la perfection.

Expliquons ce point.

Le burin de la machine à graver les disques est, *par construction, tangent au sillon qu'il grave*. Cette condition géométrique est donc constante au moment du stockage de l'information. Elle correspond à un *élément du code* selon lequel cette information pourra être extraite sans distorsion du disque.

Le pas du sillon (ou espace entre deux « sillons » successifs) est déterminé par la seule volonté du technicien chargé du contrôle de la gravure : c'est lui qui accélère ou ralentit l'avance du burin graveur vers l'intérieur du disque (selon, bien sûr l'amplitude des modulations enregistrées, afin

d'éviter le « cutover » ou chevauchement des sillons).

A la lecture, si le pas était constant (hypothèse évoquée plus haut), on n'aurait qu'à imprimer au bras une vitesse d'avance identique à celle du burin de gravure, assurant de ce fait une parfaite lecture au point de vue de la perpendicularité.

Mais sachant que *le pas a varié* durant la phase de gravure, il s'avère nécessaire, à la lecture, de *faire coïncider le mouvement d'avance* du bras de lecture avec les variations de pas du sillon.

Notons que, ces variations étant purement aléatoires (en un certain sens), il s'agit davantage ici d'un décryptage (recherche du code en même temps que recherche du message) que d'un déchiffrement (recherche du message à l'aide d'un code connu).

La résolution d'un problème posé en ces termes passe par l'utilisation d'un système à commande par réaction, ou système asservi.

THEORIE DE L'ASSERVISSEMENT

Définition.

Système asservi (feedback control system) : système tendant à maintenir une relation prédéterminée entre l'une de ses variables et une variable quelconque, en comparant des fonctions de ces deux variables.

Exemples concrets : direction assistée d'automobile, fusée à tête chercheuse.

Le système asservi utilise la différence entre le grandeur à corriger et celle de référence, différence qui est amplifiée et « traitée » pour ramener la relation qui les unit à l'état voulu.

Mathématiquement parlant, l'opération se résume à annuler une équation. Mais cette approche est purement abstraite, et ne tient pas compte du temps, ni des dimensions physiques des objets matériels.

En tant que dispositif mécanique, électrique, pneumatique, etc..., l'asservissement requiert un moteur, ou plus généralement une machine, chargée d'exécuter les manœuvres nécessaires, c'est-à-dire mettre en œuvre le processus requis pour respecter matériellement la relation prédéterminée entre les deux variables.

Mais on le voit, le moteur ou la machine ne suffisent pas à assurer la fermeture de la boucle d'asservissement : en plus de la *détection* de l'erreur, sur laquelle nous reviendrons dans le prochain article, il faut encore un dispositif capable de contrôler le résultat du processus de *correction* : les grandeurs à comparer doivent ainsi être traduites en grandeur physiques admissibles par le système (électrique, par exemple).

La grandeur de référence, introduite comme donnée dans le système, fait partie de ce que l'on nomme la *consigne*, qui représente si l'on veut les instructions données au système, de même qu'on programme un ordinateur dans une certaine perspective d'utilisation. Pour peu qu'on traduise les grandeurs en signaux admissibles par le système, l'asservissement peut se charger de n'importe quelle besogne, dans les limites des grandeurs physiques qu'il est capable de traiter.

Formulation

Soit deux vecteurs A et B, Ils peuvent représenter n'importe quelle dimension du monde physique (distance, accélération, volume, vitesse...) On commande à l'asservissement de réaliser $A = B$, ou encore $A - B = 0$. En réalité, on traite plutôt le système $A - B = E$, avec $E \rightarrow 0$.

Pour réaliser cette condition par l'intermédiaire de l'asservissement, il est nécessaire de traduire A et B en grandeurs physiques admissibles par le système, soient x et y. Ces grandeurs sont traitées par l'asservissement qui fait en sorte que $x - y = e$, avec $e \rightarrow 0$.

L'asservissement est finalement représenté par l'équivalence suivante entre la relation unissant les grandeurs réelles et

celles unissant les grandeurs physiques qui les traduisent :

$$\begin{array}{l} A - B = E \qquad x - y = e \\ E \rightarrow 0 \qquad e \rightarrow 0 \end{array}$$

Le principe de fonctionnement est alors le suivant : le signal e excite le système, qui met en œuvre le processus de correction ; ce processus engagé dans un sens convenable, aboutit à l'annulation de e. De ce fait, la grandeur réelle de E le sera aussi.

En pratique, cette opération se réalise par approximations successives (obstacles physiques tels l'inertie, les frottements, etc...). Il existe en général un délai, ou temps de réponse (plus ou moins bref), qui caractérise la *vitesse* du système.

La coïncidence entre les valeurs réelles mesurées sur l'engin réel n'est jamais absolue : l'erreur résiduelle, aussi minime soit-elle, caractérise la *précision* de l'asservissement.

On distingue traditionnellement les systèmes d'asservissement *analogiques* (où la grandeur réglée est susceptible de prendre toutes les valeurs comprises entre deux limites), *numériques* (la grandeur réelle ne peut prendre que des valeurs discrètes) et les asservissements *par échantillonnage* (où la comparaison des deux grandeurs ne s'effectue que pendant certains intervalles de temps, de façon périodique).

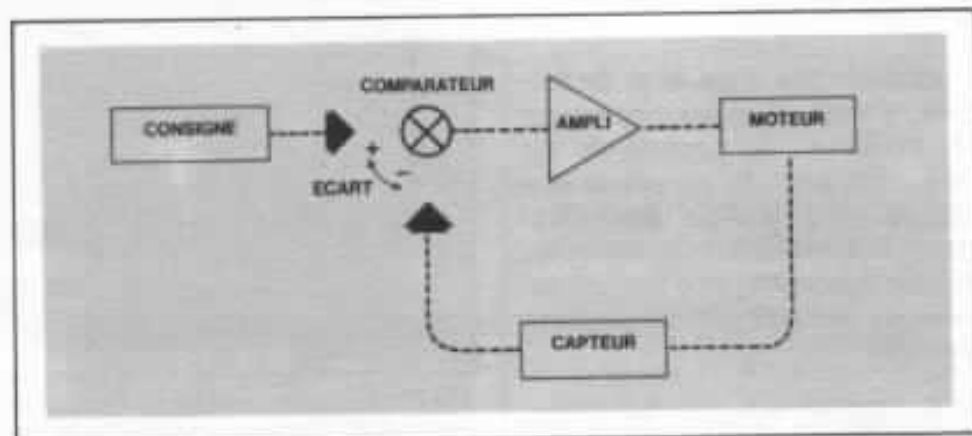


Fig 2 : Schéma fonctionnel d'un système à asservissement (cas général)

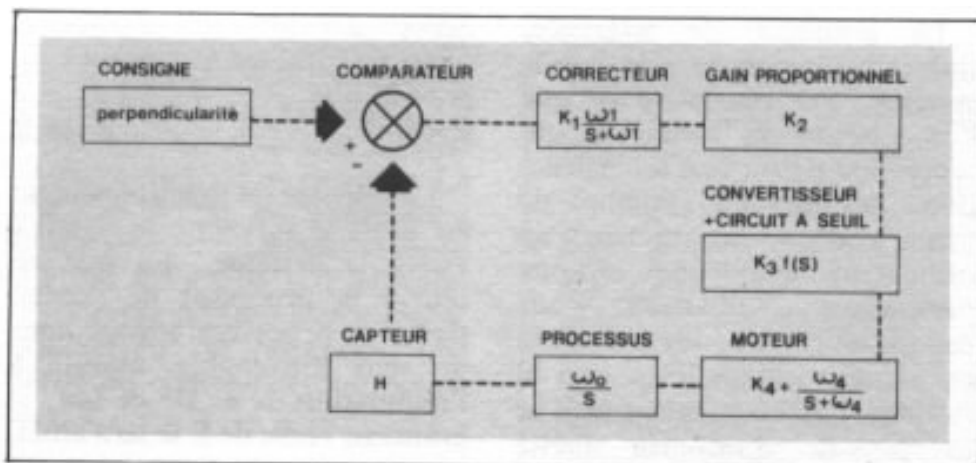


Fig. 3 : Schéma fonctionnel du système d'asservissement mis au point pour le développement du bras de lecture tangential « Golmund T.3 »

On distingue également les systèmes linéaires (dont tous les éléments sont linéaires) et ceux non-linéaires (dont un au moins des éléments n'est pas linéaire : seuil, hystérésis, etc...).

On représente le système d'asservissement par un schéma fonctionnel ; de façon très générale et simplifiée, on a :

- 1) Une *commande*, ou consigne, qui prédétermine la relation à maintenir entre les variables.
- 2) Un *comparateur*, dont la fonction est de percevoir et d'extraire l'écart existant entre la consigne d'une part et l'état du système de l'autre.
- 3) Un système de *capteur*, détectant à chaque instant l'état du système.
- 4) Un *amplificateur*, un *moteur*, et tous les intermédiaires matériels constituant la chaîne d'action directe.

Dans le cas d'un bras de lecture, il s'agit d'un asservissement de position ; la commande est une consigne de *perpendicularité*. Il s'agira d'un asservissement bidirectionnel, puisque, du fait de l'excentrage, il sera nécessaire de corriger symétriquement l'erreur.

Le rôle du système est le suivant : il s'agit de corriger la différence entre la position consi-

gnée (perpendicularité) et la position réelle à tout instant.

Sachant que durant la rotation du disque, la pointe de lecture se déplace continuellement, on observe que la consigne se déplace également, la différence existant par conséquent toujours : le système corrige donc *sans interruption*, puisqu'il intervient si et seulement si une différence peut être détectée.

LES QUALITES INTRINSEQUES DU BRAS TANGENTIEL A ASSERVISSEMENT

Les qualités d'un bras de lecture tangential bien conçu se dégagent évidemment par comparaison avec les bras pivotants.

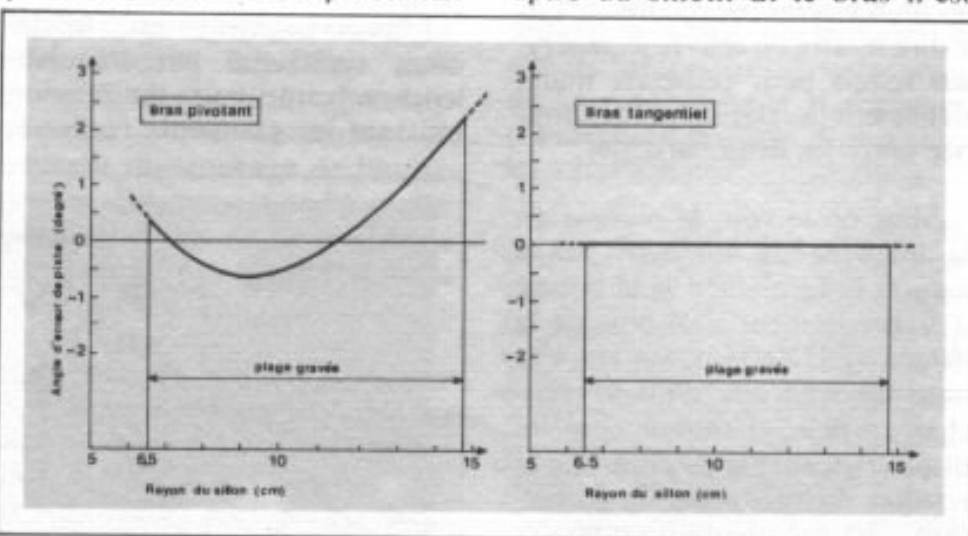


Fig 4 : A gauche : valeur de l'erreur de piste d'un bras pivotant de haut niveau bien réglé. L'erreur varie selon le rayon du sillon lu.

A droite : disparition de l'erreur de piste sur un bras tangential efficacement asservi.

Un bon bras ne s'écoute ni ne s'entend (même en tendant l'oreille) : il doit simplement être *transparent vis-à-vis du message*.

Analysons donc, en partant du bras pivotant (le plus évolué possible) les différentes entraves au travail correct du phonolecteur, en relation avec la structure propre de ce dispositif, et tâchons de mettre au clair le progrès apporté par le bras tangential.

Nous supposons donc parfaitement effectués les divers réglages (overhang, anti-skating), et nous considérerons un bras pivotant scientifiquement conçu (Cf. la réalisation de Pierre Lurné ou les diverses propositions japonaises de la même génération, présentées à l'Audio-Fair de Tokyo).

a) L'erreur de piste.

De quoi s'agit-il ?

Résumé de façon simple, le problème est le suivant : le levier porte-pointe des cellules de lecture ne peut, avec un bras classique, être maintenu *dans l'axe du sillon* du disque. Ce levier, qui porte le diamant, devrait être parfaitement aligné selon la tangente au cercle représenté par la spire du sillon. Si le bras n'est

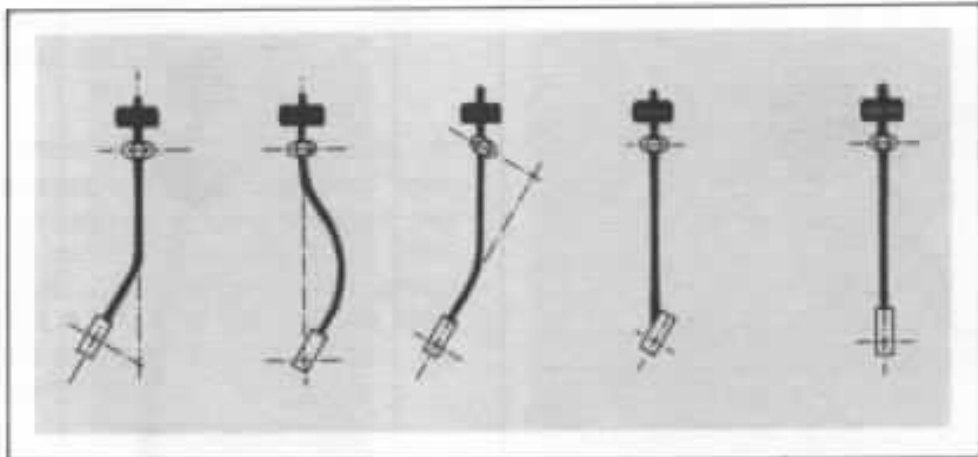


Fig 5 : Différentes géométries asymétriques du bras pivotant.

A droite : existence d'un plan de symétrie vertical dans un bras dont l'angle d'offset est nul, (bras tangentiel asservi).

pas tangentiel, cette erreur d'alignement dépend uniquement de la longueur effective du bras (distance pivot/pointe) et nullement de la forme du tube. Elle est absolument inévitable, même pour les meilleurs bras, et oscille au long du disque entre -1 et $+2$ degrés.

Un guidage du phonolecteur, en assurant un alignement exact par rapport au sillon, autorise une optimisation des conditions de lecture :

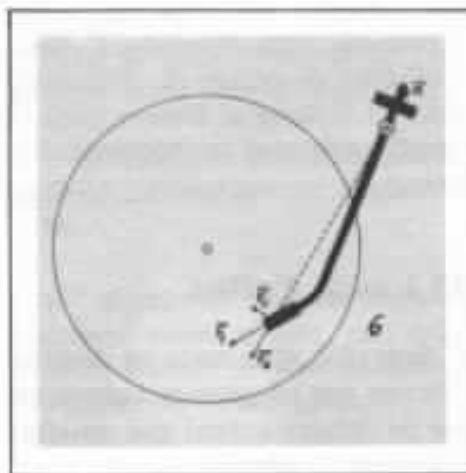
— l'équilibre des deux canaux est respecté de façon rigoureuse, et cela tout au long du disque, alors que le bras rotatif, déjà affligé d'un déséquilibre, voit celui-ci varier, et s'inverser deux fois sur une face. Quand l'erreur de piste est nulle, l'image stéréophonique, qui dépend entre autre de cette condition, se trouve restituée sans défaut.

— Le respect de la phase, dont dépend également la disposition spatiale des sons, est assuré par l'utilisation d'un bras tangentiel, cela étant surtout important dans le cas des diamants à taille elliptique ou Shibata (ne possédant pas de symétrie de révolution), dont les recherches les plus récentes ont mis en évidence la sensibilité critique au positionnement géométrique dans le sillon.

— Le tracking est meilleur (cela semble du reste une évidence), à force d'appui égale, si le diamant et surtout l'équipage mobile et sa suspension sont disposés exactement dans l'axe des efforts qu'ils subissent : au cours de la lecture, non seulement les modulations de forte amplitude, mais également le voilage et l'exentrage occasionnent des situations de perte de contact, qui sont d'autant mieux contrôlées que les forces sont réparties symétriquement.

— Enfin, encore dans le cas des diamants Shibata (et autres tailles spéciales), il se pose, en plus des problèmes de phase, la question de la surface de contact entre diamant et sillon.

Le diamant à taille non-conique offre en effet deux



parois latérales planes destinées à accroître la surface de contact diamant/sillon, tout en permettant une meilleure lecture des hautes fréquences. Il s'avère alors primordial de faire en sorte que coïncident parfaitement ces faces latérales avec les parois du sillon.

Les effets indésirables d'un mauvais alignement (même très faible) sont de grande importance : tout d'abord, les modulations gravées ont tendance à accrocher les angles constitués par les bords extrêmes de ces surfaces planes, occasionnant un couple de torsion sur l'équipage mobile, et transformant de ce fait l'énergie du signal musical en vibrations parasites ; d'autre part, la variation relative de forme du diamant «vue de la paroi du sillon» tend à causer certains effets de non linéarité ; enfin, par l'effet de «pincement», les modulations latérales pourront donner lieu à des mouvements verticaux inopportuns du diamant.

B) Skating

Le skating est l'une des causes les plus graves de l'altération du son à la lecture d'un disque. Il résulte de la force de frottement qui naît entre le diamant et le sillon (même vierge) : cette force

Fig 6 : F_f = force de frottement du diamant dans le sillon.

F_a = composante absorbée par la réaction du pivot.

F_c = force centripète.

Manifestation d'une force centripète (ou skating) sur la pointe de lecture d'une cellule montée sur un bras pivotant

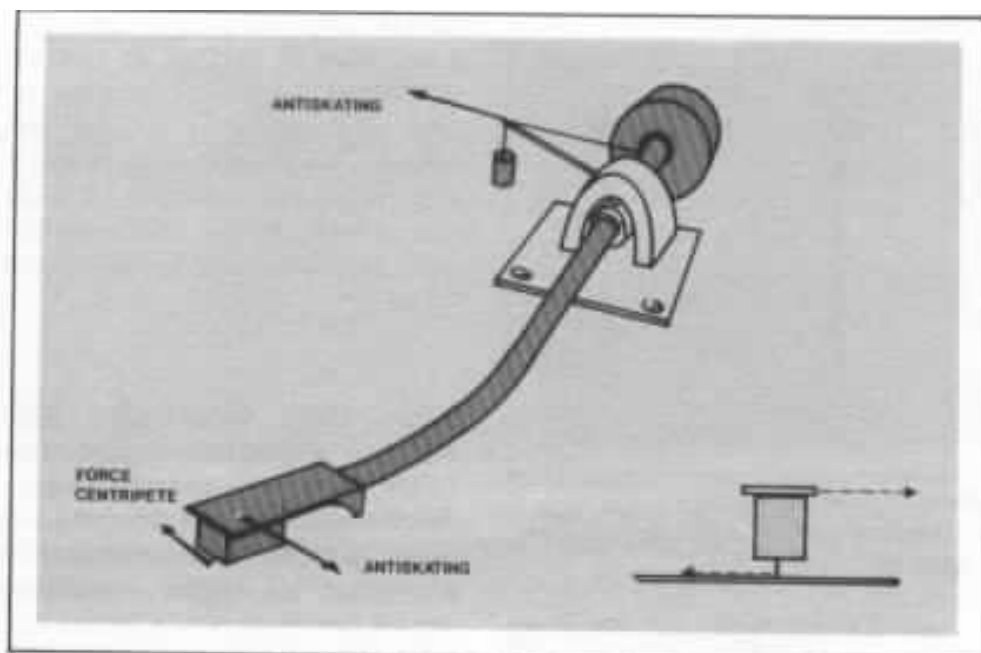


Fig 7 : Ambiguïté de l'anti skating

s'exerce selon l'axe du levier porte-pointe, ou plus exactement selon la tangente au sillon, qui ne passe pas par l'articulation du bras. De ce fait, une partie seulement de cette force (sa projection sur l'axe pointe de lecture/pivot du bras) peut être compensée par la réaction du pivot. L'autre composante, dirigée vers l'intérieur du disque, constitue la *force centripète*, ou *skating*.

Il faut comprendre qu'aucun système magnétique ni contre-poids ne peut combattre efficacement ce phénomène.

En effet, le skating prend naissance à la surface de contact diamant/sillon, le second « tirant » le premier vers l'intérieur du disque. Une force exercée en sens contraire au niveau du bras (c'est le cas de tous les dispositifs anti-skating) ne peut qu'aggraver les mauvaises conditions géométriques et dynamiques dans lesquelles travaille l'équipage mobile du phonoclecteur : le bras lui-même résiste alors à la force centripète, *mais non pas le diamant*, ce qui fait naître une importante torsion entre la pointe et le corps du phonoclecteur.

Ainsi un bras rotatif peut conserver une certaine lisibilité en utilisant l'anti-skating, mais c'est au prix d'un accroissement de déséquilibre de pression entre les deux faces du diamant en contact avec le sillon, et d'une contrainte sur la suspension de l'équipage mobile.

Ce phénomène se trouve d'ailleurs encore aggravé lors des oscillations latérales dont le bras est l'objet au cours de la lecture de disques excentrés (ce qui est le cas, il est presque inutile de le rappeler, de l'écrasante majorité des disques actuels).

Il se dégage de ce qui précède, lorsqu'on sait qu'un bras de lecture tangentiel bien réalisé *n'est pas sujet au skating*, que l'ensemble des distorsions, déséquilibres et pertes de définition due au skating se trouve dans ce cas purement et simplement supprimé.

C) L'angle d'offset

Son rôle, que nous ne démontrerons pas ici géométriquement, est de réduire autant que possible l'erreur de piste.



Fig. 8 : L'angle d'offset dans un bras pivotant

La valeur de cet angle détermine malheureusement un comportement anormal du bras lors des oscillations latérales (lecture de disques mal centrés, comme évoqué ci-dessus, mais aussi résonance du bras).

Il faut souligner que l'angle d'offset détermine, à chaque mouvement latéral du bras, un *mouvement d'avance et de recul* du diamant dans le sillon : il s'ensuit une *variation de vitesse*, qui accroît de façon déplorable le « pleurage effectif » de l'ensemble bras-platine.

On peut observer, grossi, ce même phénomène en constatant qu'un bras classique, manipulé entre l'intérieur et l'extérieur du disque, fait se mouvoir le diamant non seulement latéralement, mais aussi d'avant en arrière.

Quoique cette forme de distorsion soit demeurée longtemps peu connue, même des spécialistes, elle n'engendre pas moins une altération du son, audible, surtout mise en évidence par comparaison avec un bras tangentiel, dont l'angle d'offset est nul — et avec lequel ces effets

indésirables sont donc pratiquement inexistantes.

Notons que, les disques de mesures étant en général bien centrés, cet effet n'apparaît pas au cours des investigations habituelles, mais se manifeste toutefois à l'écoute des disques malheureusement imparfaits du commerce.

ASPECT STRUCTUREL

Naturellement, le fait qu'un bras soit tangentiel ne dispense nullement de résoudre les mêmes problèmes vibratoires qu'avec un bras conventionnel (notons toutefois que, susceptible d'être plus court, le bras radial se trouve favorisé sur le plan du rapport masse effective/rigidité). Il semblerait du reste que les efforts portants sur les questions de structure du bras s'avèrent d'autant plus rentables sur un système tangentiel que celui-ci est débarrassé par nature de la plupart des distorsions, non-linéarité, erreurs, qui obscurcissent le message.

Plusieurs directions de recherche et de développement permettent de penser que les meilleures solutions à apporter aux problèmes de vibrations parasites dans le bras de lecture passent par la conjugaison judicieuse de plusieurs détails de structure et dispositifs.

Nous n'insisterons pas ici à nouveau sur ces aspects théoriques, (dont certains recourent d'ailleurs ceux exposés par Gérard Chrétien à propos du bras de Pierre Lurné).

Rappelons cependant les points principaux :

— Importance de l'utilisation de matériaux différents pour casser l'établissement des ondes stationnaires.

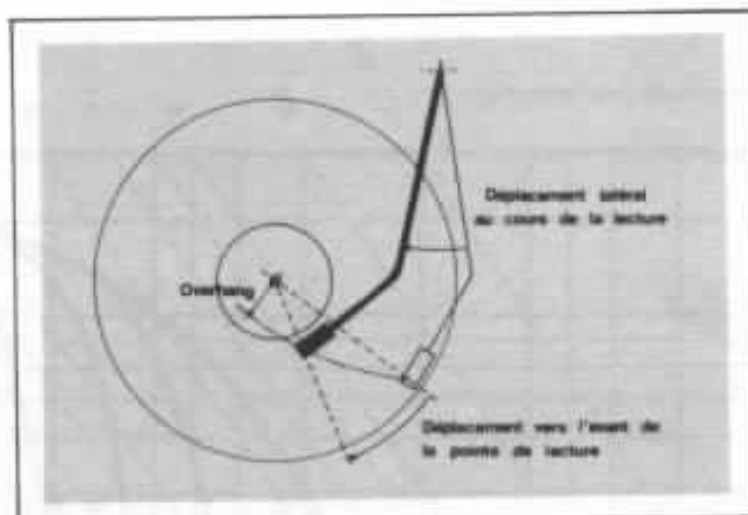


Fig 9 : Mise en évidence du mouvement d'avance de la pointe de lecture au cours du déplacement latéral d'un bras pivotant

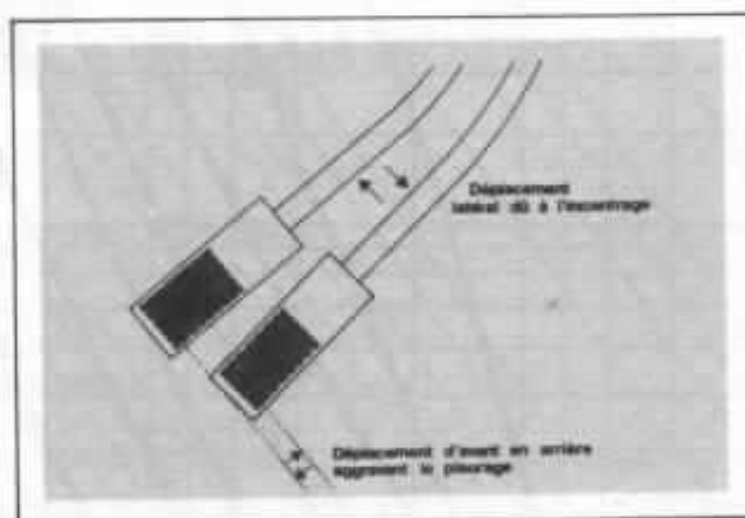


Fig. 10 : Mise en évidence du pleurage effectif causé par les oscillations latérales d'un bras à la lecture d'un disque excentré.

— Diminution progressive de l'épaisseur et du diamètre du tube vers la cellule de lecture (en fonction du diagramme des efforts de flexion).

— Intérêt, sur le plan inertiel, d'employer un contre poids arrière le plus lourd et le plus près possible de l'articulation.

— Avantage des couches de densité différentes constituant le tube.

— Abandon de la coquille standard dont la fixation, trop lourde, s'avère de plus nuisible à la rigidité de l'ensemble.

— Nécessité d'un dispositif

d'amortissement à viscosité variable du fluide.

Les lois de statique et de dynamique qui déterminent le comportement de l'ensemble bras-cellule ont déjà été évoqués ici-même et sont maintenant connues des lecteurs.

Les plus grands progrès sont à rechercher dans l'exploitation au niveau matériel des données théoriques : ainsi, dans la cadre de la deuxième partie de cette étude sur l'architecture d'un bras asservi, nous examinerons les différentes solutions technologiques mises en œuvre pour l'application de ces principes.

**Page non
disponible**

Réalisation des filtres passifs

Jacques Mahul

Dans beaucoup d'esprits, encore actuellement, la qualité d'une enceinte acoustique est associée presque essentiellement à la qualité de ses haut-parleurs. Or il est possible de réaliser deux enceintes dont les rendus sonores sont totalement différents avec les mêmes haut-parleurs et deux réseaux séparateurs de nature différente. Nous pourrions même affirmer que la substitution des haut-parleurs par un autre jeu de rendement et d'impédance identiques, tout en conservant le même réseau séparateur, entraînera une différence acoustique sensible dans la mesure où les courbes de réponse ne seront jamais rigoureusement identiques, mais n'entraînera pas une rupture d'équilibre fondamental. L'objet de cet article sera d'orienter le choix des circuits vers des schémas et des pentes de coupure qui optimiseront les caractéristiques d'amplitude, de puissance et de vitesse de propagation de groupe.

La répartition de la puissance entre les différents haut-parleurs d'un système multi-voies continuera à se faire avec des réseaux passifs pour quelques temps encore, malgré l'intérêt croissant que les constructeurs portent aux filtres actifs et aux amplificateurs séparés. Nous allons montrer pourquoi les filtres doivent être du type Butterworth d'ordre impair, si on se fixe comme critère de base : résistance d'entrée constante et obtention de la linéarité d'ensemble de la courbe de réponse. Mis à part le filtrage du premier ordre il y aura des

variations continues ou discontinues dans la vitesse de propagation des informations à travers la bande. En fait on peut parler de retard plus ou moins grand dans la transmission des données selon le contenu harmonique de chacune de celles-ci. La transmission dans le temps de différentes fonctions constituant un signal complexe se fera de façon inégale. Cette erreur de retard peut être minimisée en connectant les haut-parleurs de chaque paire dans le sens relatif approprié. Les observations seront faites sur les réseaux compensateurs

d'impédance des haut-parleurs de manière à réaliser des réseaux diviseurs qui puissent être chargés par des impédances constantes.

Dans un système multi-voies, chaque transducteur ne reproduisant qu'une partie du spectre, un réseau de répartition est utilisé pour diviser le spectre en bandes et assigner chacune de celles-ci aux différents transducteurs. De nombreux schémas de filtres ont été utilisés depuis la création du haut-parleur mais leurs critères de performances, généralement non spécifiés, sem-

blent s'être bornés à découper le spectre en tranche de manière à ce que la somme des puissances des différentes sorties demeure constante à travers la bande. Depuis peu la réponse globale en fréquence et la réponse en signaux transitoires des filtres sont devenues des préoccupations qui nous amènent à modifier certaines conceptions solidement ancrées.

Small a conclut, suite à une étude originale et poussée, qu'il y a des contraintes sévères à observer sur la structure du filtre et sur ses caractéristiques au voisinage de la fréquence de transition, si on veut que le vecteur somme des voltages de sortie reste constant et que les réponses en fréquence et en régime transitoire soient optimisées. En fait, il préconise l'utilisation de filtres actifs et d'amplificateurs séparés pour éviter un travail fastidieux réclamant des moyens importants. Nous allons montrer dans cette étude qu'il est possible d'obtenir des taux rapides de transmission de réponse entre deux transducteurs, en utilisant des réseaux passifs, si on admet en contrepartie une légère perturbation dans la réponse globale des différents délais ou retards d'information du système à transmettre.

Aucun commentaire ne sera fait sur l'effet subjectif d'une telle perturbation dont la durée sera inversement proportionnelle à la fréquence de transition. Cependant Ashley et Henne ont des observations à faire sur cet aspect des choses et nous renvoyons à leur ouvrage dont la référence est donnée par la suite.

Le travail effectué dont nous allons donner les grandes lignes permet de tirer les conclusions suivantes :

— Seuls des filtres du type Butterworth et d'ordre impair peuvent convenir à la réalisation

de réseaux passifs dans les systèmes multi-voies.

— La réponse du retard de phase de groupe β/ω est un bien meilleur indice que l'angle de phase β pour indiquer les déviations de performance par rapport à l'idéal, pour la raison évidente qu'un retard pur à toutes les fréquences correspond à une rotation de phase dans laquelle l'angle de phase varie linéairement avec la fréquence.

— Au vu de ce critère il est aisé d'imaginer qu'il existe un sens préférentiel de connection des haut-parleurs (phase électrique).

Tout au long de la première partie de cette étude, l'impédance des haut-parleurs sera considérée comme résistive et constante. Ce choix sera légitimé plus tard en montrant comment les impédances peuvent être compensées de manière à présenter une charge résistive.

Car l'effet inductif de l'impédance d'un haut-parleur est importante ; l'inductance d'une bobine bloquée d'un haut-parleur dont la bobine a un diamètre de 37,5 mm et une longueur de 12 à 16 mm peut aller de 1 à 2 mH. L'inductance d'une bobine 4 couches en noyau de 25 mm peut être de 2 mH. Celle d'un tweeter est par contre beaucoup plus réduite : 0,1 à 0,2 mH maximum. Ces chiffres ne tiennent compte que de l'impédance électrique de la bobine et non pas de l'impédance motionnelle, soit du mouvement du haut-parleur ; nous aborderons ce problème et nous tiendrons compte de ce facteur dans la compensation. Si nous ne faisons pas de compensation sur les haut-parleurs il faudra alors modifier la structure même du filtre et celui-ci deviendra inutilement complexe.

Le réseau du premier ordre

Le réseau le plus simple est la paire complémentaire de filtres

du premier ordre montée dans les figures 1A et 1B. C'est, en fait, le seul réseau diviseur dont la fonction ne possède pas de dénominateur dont l'amplitude globale, le retard de groupe et la réponse transitoire sont tous idéaux. Nous avons là une fonction de transfert totalement linéaire. Si T est le transformé de Laplace de la fréquence de coupure ($1/\omega_0$) la réponse du filtre passe-haut est :

$$\frac{e_s}{e_e} = \frac{pT}{pT + 1} \quad (1)$$

Celle du filtre passe-bas :

$$\frac{e_s}{e_e} = \frac{1}{pT + 1} \quad (2)$$

Quand les deux sorties sont additionnées comme on peut le réaliser avec deux transducteurs idéaux dont les sorties acoustiques se combinent nous obtenons :

$$\frac{e_s}{e_e} = \frac{pT + 1}{pT + 1} = 1 \quad (3)$$

La courbe amplitude fréquence et la réponse du retard de groupe courbe 1A figure 2 sont plates, il n'y aura aucune distorsion d'aucune sorte. Il est bon de noter aussi que la somme des puissances à la sortie du filtre donnera :

$$\frac{W_s}{W_e} = \frac{\omega^2 T^2}{\omega^2 T^2 + 1} + \frac{1}{\omega^2 T^2 + 1} = 1 \quad (4)$$

Le rapport $\frac{W_s}{W_e}$ demeurant

constant à travers l'ensemble du spectre, les filtres peuvent être réalisés avec des réseaux passifs qui présenteront alors à leur entrée des résistances constantes. Dans ce cas précis, il est inutile de faire appel à la multi-amplification.

On remarquera que si la polarité relative des transducteurs est inversée, la somme des puissances demeurera encore constante mais alors le vecteur somme aura le module suivant :

$$\frac{e_s}{e_e} = \frac{pT - 1}{pT + 1}$$

C'est une fonction passe-tout pour laquelle la réponse en amplitude est constante à travers le spectre mais dont le retard varie, cette solution est donc moins favorable. La fonction de transfert de la réponse passe-tout du réseau du 2^e ordre est la suivante :

$$\frac{e_s}{e_c} = \frac{1 - x_1 pT + x_2 p^2 T^2}{1 + x_1 pT + x_2 p^2 T^2} \quad (6)$$

Le retard de phase

$$\frac{\beta}{\omega} = \frac{2T}{\omega T} \operatorname{arctg} \frac{x_1 \omega T}{1 - x_2 \omega^2 T^2} \quad (7)$$

Tandis que le retard de groupe

$$\frac{d\beta}{d\omega} = \frac{x_1 T (1 + x_2 \omega^2 T^2)}{1 + (x_1^2 - 2x_2) \omega^2 T^2 + x_2^2 \omega^4 T^4} \quad (8)$$

Pour un filtre du 1^{er} ordre tel que l'équation (5), le retard est obtenu en faisant x_1 et $x_2 = 0$ dans les équations (7) et (8).

Pour un filtre d'ordre supérieur, la fonction de transfert est constituée tout d'abord d'un facteur de premier ordre puis d'un autre du deuxième ordre comme on pourra le voir dans l'équation (13). Le retard de chaque facteur sera obtenu par les équations (6) et (7). Les retards relatifs à chacun de ces facteurs seront additionnés pour obtenir le retard global du filtre.

Le retard de phase et le retard de groupe auront une grosse importance du fait de leurs effets sur la réponse transitoire. D'un autre côté il est vraisemblable qu'une légère variation dans les retards associée à une courbe de réponse très douce (peu accidentée) auront un effet négligeable sur la perception sonore finale. Il est probable que les désagréments audibles dans la réponse en transitoire seront beaucoup plus à mettre sur le compte des creux et des bosses dans la réponse amplitude-fréquence que sur le compte d'un retard de groupe légèrement

variable. Il n'est pas question évidemment d'envisager de faire des mesures de tous ces paramètres autrement que dans des conditions de champ libre. Il est clair que la phase et le retard de groupe sont intimement corrélés. La plupart des étudiants de physique élémentaire savent que la configuration d'une onde répétitive dépend des relations de phase entre ses différentes composantes de la série de Fourier. Cependant, si les phases de toutes les composantes sont décalées linéairement et proportionnellement à leur fréquence, la forme d'onde ne sera pas distordue mais simplement retardée dans le temps. C'est le cas de la réponse à phase linéaire. Une bonne réponse en transitoire ne dépendra pas tant d'une réponse en phase plate que d'une réponse linéaire en retard de phase ou en retard de groupe. C'est pourquoi les mesures de retard sont habituellement préférées aux mesures de phase et leur platitude prise comme indice de bonne réponse transitoire.

Le paramètre $d\beta/d\omega$ est une mesure du retard pris par l'enveloppe d'un groupe de fréquences adjacent, d'où ses désignations soit du retard d'enveloppe soit de retard de groupe. En télévision le retard de phase est une mesure de la distorsion engendrée par la portion de luminescence d'une onde TV répétitive alors que le retard de groupe mesure la différence de retard entre le signal de luminescence (la fréquence basse) et le signal de chrominance qui est un groupe de composantes haute-fréquence dans une bande comparativement étroite.

Jusqu'à récemment, le retard de groupe était plus facile à mesurer. Il est une donnée essentielle et est universellement reconnu. Les limites quelles sont-elles ? Il est, à priori, bien difficile de savoir quelle sorte de

retard il serait approprié d'envisager pour mesurer les performances d'un système audio de haute qualité. Savoir si les deux types de retard sont à prendre en considération, quelle limite de tolérance leur accorder à l'un comme à l'autre. Toutes ces questions demandent de plus larges investigations. Dans tous les cas, il y a similitude entre les deux types de retard. Pour une fonction de transfert donnée, le retard de phase et le retard de groupe ont la même valeur, appelé retard d'insertion, aux très basses fréquences et tendent vers la même valeur, zéro, aux fréquences élevées. Aux fréquences moyennes, si le retard de phase est d'une linéarité parfaite, le retard de groupe sera lui aussi linéaire mais en règle générale le retard de groupe variera dans de plus larges proportions.

Dans cette étude nous ne nous attacherons qu'au retard de phase. La courbe 1_b de la figure (2) montre comment le retard de phase de l'équation (5) varie à partir d'un retard d'insertion $2T$ (voir $2/\omega_0$ où ω_0 est l'angle de phase de la fréquence de transition) allant de $\pi T/2$ quand $\omega T = 1$, pour arriver à zéro aux fréquences les plus élevées. Pour une coupure à 2 KHz, $T = 80 \mu s$, qui incidemment correspond à une longueur de chemin parcourue de 1 pouce par bande sonore dans l'air. Quand la coupure est quatre fois inférieure à 500 Hz le retard est quatre fois plus long c'est-à-dire $320 \mu s$.

Le cas du troisième ordre

Nous considérons maintenant un réseau séparateur comprenant deux filtres passe-haut et passe-bas complémentaires chacun du troisième ordre. La configuration Buterworth est choisie du fait que la somme de leur réponse en puissance est constante.

(9)

$$\frac{W_s}{W_e} = \frac{\omega^6 T^6}{\omega^6 T^6 + 1} + \frac{1}{\omega^6 T^6 + 1} = 1$$

Ce filtrage assure qu'une résistance constante est présentée à l'entrée, le vecteur somme des deux sorties devient :

$$\begin{aligned} \frac{e_s}{e_e} &= \frac{p^3 T^3}{p^3 T^3 + 2p^2 T^2 + 2pT + 1} \\ &\pm \frac{1}{p^3 T^3 + 2p^2 T^2 + 2pT + 1} \\ &= \frac{p^3 T^3 \pm 1}{p^3 T^3 + 2p^2 T^2 + 2pT + 1} \\ &= \frac{(pT \pm 1)(p^2 T^2 \mp pT + 1)}{(pT + 1)(p^2 T^2 + pT + 1)} \end{aligned} \quad (10)$$

L'utilisation des sigles \pm et \mp tient compte des deux cas de la somme ou de la différence des deux sorties et du cas des phases électriques connectées dans le même sens relatif ou dans le sens opposé. Dans le dernier cas (signe $-$) le terme $p^2 T^2 + pT + 1$ est commun au numérateur et au dénominateur de sorte que le vecteur somme des deux sorties sera :

$$\frac{e_s}{e_e} = \frac{pT - 1}{pT + 1}$$

qui est une fonction passe-tout, courbe 3_a figure (2) identique à celle du réseau du premier ordre à phase inversée courbe 1_b. Quand la connection se fait dans le même sens relatif, le terme $pT + 1$ est commun au numérateur et au dénominateur et la somme résultante devient :

$$\frac{e_s}{e_e} = \frac{p^2 T^2 - pT + 1}{p^2 T^2 + pT + 1} \quad (11)$$

c'est encore une fonction passe-tout et on remarque sur la courbe 3_b de la figure (2) que le retard est le même aux deux extrémités du spectre comme auparavant. Cependant un très mauvais retard apparaît autour de la fréquence de transition $\omega T = 1$.

Cas de l'ordre (2n + 1)

Il est aisément vérifiable que des performances similaires peuvent être obtenues à partir de paires de filtres du type Butterworth de n'importe quel ordre impair dont la somme des voltages de sorties est :

$$\frac{e_s}{e_e} = \frac{p^{(2n+1)} T^{(2n+1)} \pm 1}{B_{2n+1}} \quad (12)$$

B_{2n+1} est le polynôme approprié du type Butterworth pour l'ordre $2n + 1$. Dans les expressions correspondantes des réponses en puissance les deux numérateur et dénominateur possibles sont identiques, leur valeur est $\omega^{4n+2} T^{4n+2} + 1$. Cela signifie tout d'abord que la réponse résultante en puissance est constante et que le filtre présente une résistance constante à son entrée. De plus quand le

numérateur et le dénominateur de la fonction réponse globale en puissance sont factorisés jusqu'à leurs derniers facteurs qui seront du second puis du premier ordre, ces facteurs doivent aussi présenter des paires identiques en haut comme en bas. Cependant, comme le numérateur et le dénominateur sont différents dans leur forme vectorielle comme dans leur forme opérationnelle il est évident que quelques facteurs sont différents et ne disparaissent pas. Ces deux conditions peuvent être rencontrées seulement si les coefficients des termes dans les facteurs correspondants du numérateur et du dénominateur sont tous identiques mais les signes de certains termes du premier ordre du numérateur étant négatifs comme dans l'équation (13) ci-dessous.

Dans la réponse globale, ces

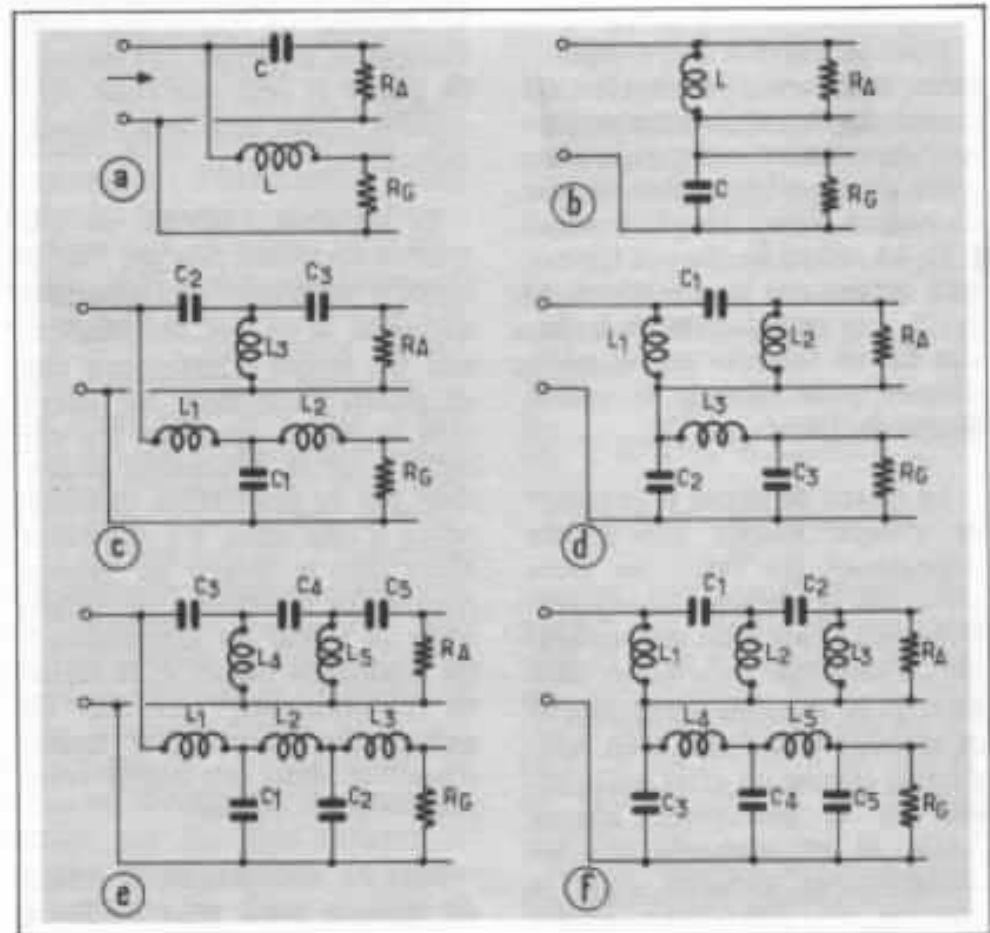


Fig 1 : Réseaux séparateurs d'ordre impair
Premier ordre (a) parallèle (b) série
Troisième ordre (c) parallèle (d) série
Cinquième ordre (e) parallèle (f) série

facteurs du numérateur affectés de coefficients positifs pour leurs termes du premier ordre s'annulant avec les facteurs du dénominateur ne laissant que des paires de facteurs avec des coefficients identiques de signes opposés négatif pour le numérateur, positif pour le dénominateur affecteront les termes du premier ordre. La fonction obtenue après ces simplifications sera une fonction réponse passe-tout du même type observé précédemment dans le cas du troisième ordre. On doit choisir un sens de connection relative des haut-parleurs en fonction de la minimisation de la perturbation dans la réponse du retard en se référant aux courbes du premier et du troisième ordre.

Cas du cinquième ordre

Nous étudions le cas du cinquième ordre pour bien noter les variations de performances des réseaux quand on passe à des ordres supérieurs. Avec des réponses du type Butterworth nous obtiendrons une somme globale :

$$\frac{e_s}{e_c} = \frac{p^5 T^5 \pm 1}{p^5 T^5 + 3,236p^4 T^4 + 5,236p^3 T^3 + 5,236p^2 T^2 + 3,236p T + 1} \quad (13)$$

$$= \frac{(pT \pm 1)(p^2 T^2 \pm 1,6180pT + 1)(p^2 T^2 \pm 0,6180pT + 1)}{(pT + 1)(p^2 T^2 + 1,6180pT + 1)(p^2 T^2 + 0,6180pT + 1)}$$

$$= \frac{p^2 T^2 - 1,6180pT + 1}{p^2 T^2 + 1,6180pT + 1} \quad \text{ou} \quad \frac{(pT - 1)(p^2 T^2 - 0,618pT + 1)}{(pT + 1)(p^2 T^2 + 0,618pT + 1)}$$

Des deux solutions + ou -, la première correspond au signe + dans le numérateur original, est de loin la préférable puisque la réponse des retards est très proche de la linéarité comme on peut le constater dans la courbe 5_a de la figure (2).

La réponse du retard correspond au signe négatif que l'on peut voir sur la courbe 5_b montre l'apparition d'un pic sévère avant de retomber à zéro. On peut noter que le retard d'inser-

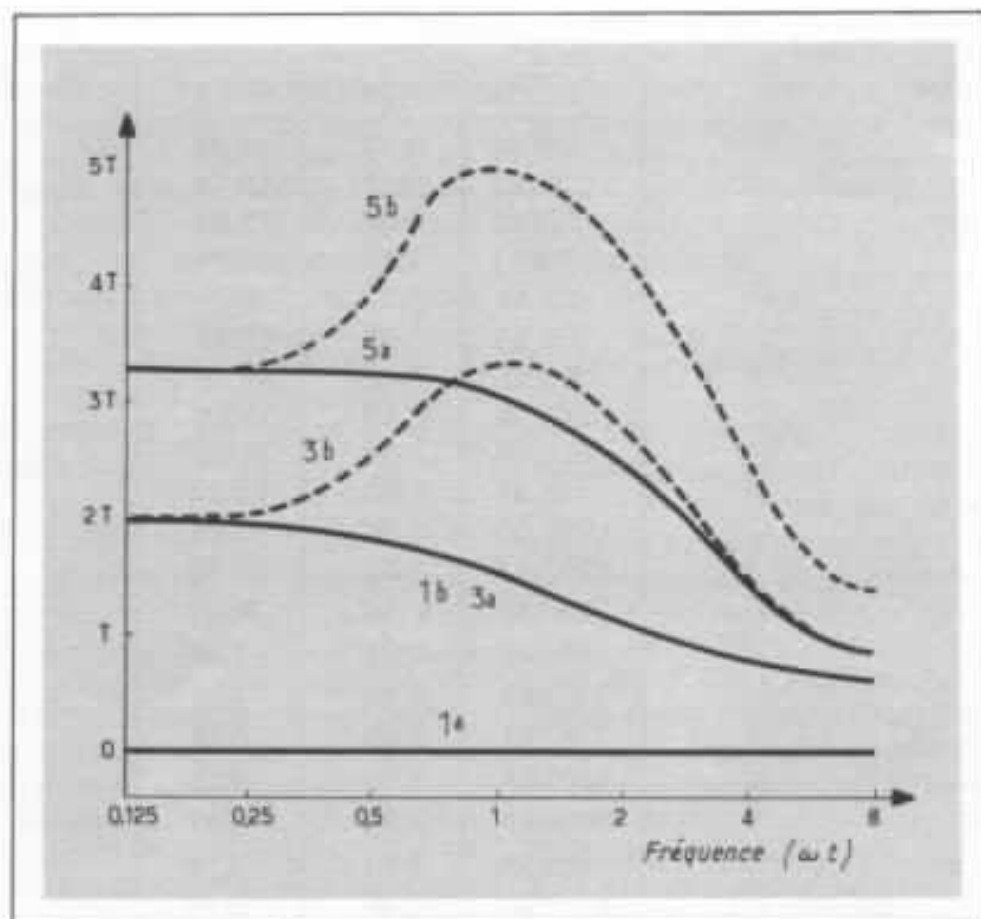


Fig 2 : Courbe de retard de phase β/ω en fonction de la fréquence ωT pour la somme des sorties d'un réseau diviseur d'ordre variable
 Courbe a : sens préférable de connection
 Courbe b : nouveau sens de connection

tion aux basses fréquences est le même dans les deux cas, c'est-à-dire : $2 \times 1,618 T$ retard quelque peu plus élevé que dans le cas du troisième ordre.

Cas des ordres pairs

Ceux-ci sont considérés comme insatisfaisants pour les raisons suivantes. La fonction courbe de réponse est donnée par :

$$\frac{e_s}{e_c} = \frac{p^{2n} T^{2n} \pm 1}{\text{Dénominateur}} \quad (14)$$

seule une des deux possibilités est à envisager, celle qui voit, dans le domaine de fréquences, le signe de $\omega^{2n} T^{2n}$ être le même que celui de l'unité sinon il y aura un zéro à la fréquence de coupure. Une fois admis que les deux haut-parleurs doivent être connectés en phase électrique opposée, deux autres choix s'offrent pour le dénominateur. Dans le premier des deux, la réponse étant du type Butterworth, la réponse en puissance sera :

$$\frac{W_s}{W_c} = \frac{(\omega^{2n} T^{2n} + 1)}{\omega^{2n} T^{2n} + 1} = 1 \quad (15)$$

qui est constante sur l'ensemble de la bande et fournit une résistance d'entrée constante comme dans les autres cas. Cependant le module au carré du vecteur somme sera donné par :

$$\left(\frac{e_s}{e_c}\right)^2 = \frac{(\omega^{2n} T^{2n} + 1)^2}{\omega^{4n} T^{4n} + 1} \quad (16)$$

F_0 (Hz)	L (mH)	C (μ F)
100,00	12,74	198,94
125,89	10,12	158,02
158,49	8,04	125,52
199,53	6,38	99,71
251,19	5,06	79,20
316,23	4,02	62,91
398,11	3,20	49,97
501,19	2,54	39,69
630,96	2,02	31,53
794,33	1,60	25,04
1000,00	1,28	19,89
1258,93	1,02	15,80
1584,89	0,80	12,55
1995,26	0,64	9,97
2511,89	0,50	7,92
3162,28	0,40	6,29
3981,07	0,32	4,99
5011,87	0,26	3,97
6309,57	0,20	3,15
7943,28	0,16	2,50
10000,00	0,12	1,99

$$F_0 = \frac{R_G}{2\pi L} = \frac{1}{2\pi R_A C}$$

F_0 (Hz)	L_1 (mH)	L_2 (mH)	C_1 (μ F)	C_2 (μ F)	C_3 (μ F)	L_3 (mH)
100,00	19,10	6,37	265,26	132,63	397,89	9,55
125,89	15,17	5,06	210,70	105,35	316,05	7,59
158,49	12,05	4,02	167,37	83,68	251,05	6,03
199,53	9,57	3,19	132,94	66,47	199,42	4,79
251,19	7,60	2,53	105,60	52,80	158,40	3,80
316,23	6,04	2,01	83,88	41,94	125,82	3,02
398,11	4,80	1,60	66,63	33,31	99,94	2,40
501,19	3,81	1,27	52,93	26,46	79,39	1,91
630,96	3,03	1,01	42,04	21,02	63,06	1,51
794,33	2,40	0,80	33,39	16,70	50,09	1,20
1000,00	1,91	0,64	26,53	13,26	39,79	0,95
1258,93	1,52	0,51	21,07	10,54	31,61	0,76
1584,89	1,21	0,40	16,74	8,37	25,10	0,60
1995,26	0,96	0,32	13,29	6,65	19,94	0,48
2511,89	0,76	0,25	10,56	5,28	15,84	0,38
3162,28	0,60	0,20	8,39	4,19	12,58	0,30
3981,07	0,48	0,16	6,66	3,33	9,99	0,24
5011,87	0,38	0,13	5,29	2,65	7,94	0,19
6309,57	0,30	0,10	4,20	2,10	6,31	0,15
7943,28	0,24	0,08	3,34	1,67	5,01	0,12
10000,00	0,19	0,06	2,65	1,33	3,98	0,10

$$L_1 = \frac{3 R_G}{4\pi F_0}$$

$$L_2 = \frac{R_G}{4\pi F_0}$$

$$C_1 = \frac{2}{3\pi F_0 R_G}$$

$$C_2 = \frac{1}{3\pi F_0 R_A}$$

$$C_3 = \frac{1}{\pi F_0 R_A}$$

$$L_3 = \frac{3 R_A}{8\pi F_0}$$

si $R_G = R_A$
 $L_1 = 3L_2 = 2L_3$
 $C_1 = 2C_2, C_3 = 3C_2$

Fig 3 : Tables de valeurs des éléments des filtres de coupure du premier ordre et du troisième ordre pour une charge de 8 ohms.

Cette équation nous révèle qu'un pic de 3 dB apparaîtra dans la courbe de réponse e_s/e_c à la fréquence de transition ; e_s/e_c n'est pas une fonction passe-tout. Le deuxième choix au niveau du dénominateur sera celui de deux réponses Butterworth en cascade chacune d'ordre n c'est-à-dire de la moitié de l'ordre du filtre original. Ce choix fournira une réponse passe tout identique à celle d'ordre impair mais alors la réponse en puissance sera :

$$\frac{W_s}{W_e} = \frac{\omega^4 T^{4n} + 1}{(\omega^{2n} T^{2n} + 1)^2} \quad (17)$$

qui n'est pas constante sur l'ensemble du spectre et qui en conséquence, ne présente pas une résistance constante à l'entrée.

Cas du deuxième ordre

Comme exemple du cas précédent nous prenons celui du deuxième ordre 12 dB/oct. avec un dénominateur constitué de deux réponses du type Butterworth du premier ordre en cascade. La somme des amplitudes donnera :

$$\frac{e_s}{e_c} = \frac{p^2 T^2 - 1}{(pT + 1)^2} = \frac{pT - 1}{pT + 1}$$

Cette fonction passe-tout identique à celle du troisième ordre, courbe 3_a (2) (inversion de la phase électrique). Cette fonction présente les inconvénients suivants par rapport au troisième ordre de n'avoir pas de résistance constante à l'entrée, d'avoir des inclinaisons plus faibles dans les bandes à rejeter et d'avoir des transitions plus lentes dans la réponse en amplitude.

Pour ces raisons les filtres du deuxième ordre et en général les filtres d'ordre pair sont à rejeter.

Réalisation pratique des filtres

La figure 1 donne les schémas

de filtres de coupure du premier, troisième et cinquième ordre dans les deux configurations possibles : série et parallèle. La figure 3 donne sous la forme de tableaux les valeurs des éléments pour certaines fréquences de coupure pour des filtres du premier et du troisième ordre. Toutes ces valeurs ont été calculées à l'ordinateur. Les formules pour les obtenir sont également données.

Le premier ordre a pour lui le gros avantage de la simplicité. Cependant Small nous fait remarquer que si l'excursion du haut-parleur augmente de 12 dB/oct. quand la fréquence décroît jusqu'à ce que la fréquence de résonance soit atteinte, la pente du filtre de coupure du tweeter devrait être d'au moins 12 dB/oct. même si cette excursion ne se produit qu'à des niveaux plus faibles. Il est facile de montrer que l'addition d'un ordre supérieur de filtrage améliore considérablement le résultat dans la « bande de bruit » et dans la zone de valeur maximale de l'excursion. Cela justifie largement le choix du filtre à 18 dB/oct. donc du troisième ordre, avec en plus l'avantage d'un taux rapide de la coupure passe-bas quand la réponse du woofers commence à être tourmentée au-delà de son fonctionnement en piston.

La dépense d'un filtre du cinquième ordre limitera probablement son usage aux cas extrêmes. Cependant si un tweeter a une valeur élevée de son Q_c et que sa fréquence de résonance n'est pas très éloignée de sa bande de rejet, le pic obtenu justifiera peut-être une atténuation plus forte. On doit noter, dans ce contexte, que les configurations séries des figures 1_b, 1_d et 1_f sont préférables aux configurations parallèles de 1_a, 1_c et 1_e, tout simplement parce que l'élément inductif en parallèle présente une

impédance basse, dans le cas du tweeter, aux fréquences suffisamment éloignées dans la bande de rejet et peut alors produire un amortissement maximal à tout pic produit par une fréquence de résonance basse.

Les réseaux compensateurs

Si l'on veut que les réseaux diviseurs s'accordent parfaitement, il est nécessaire que l'impédance du haut-parleur soit raisonnablement la plus proche possible de sa valeur résistive. C'est un facteur déterminant pour une bonne transition. Dans quelques cas il sera suffisant de compenser l'inductance seule de la bobine mobile en utilisant le réseau résistance-capacité en série proposé par Small, dans d'autres cas il sera nécessaire de compenser à la fois l'inductance et l'impédance motionnelle. Ceci se produit plus fréquemment dans le cas des tweeters où l'inductance de la bobine est faible et où l'impédance motionnelle a comparativement une importance plus grande que dans le woofers : exemple du réseau de la figure (4). Si la résistance R_{c2} peut être réalisée à partir de la résistance cuivre de l'inductance compensatrice, la constante de temps L/R de la bobine peut être conservée très basse, de sorte que la self à air utilisée dans le réseau pourra être réalisée avec du fil fin sera donc peu encombrante et peu coûteuse.

Soit une impédance comprenant une résistance R_0 en série avec une impédance Z_1 . Nous voulons compenser Z_1 de manière à réduire l'impédance globale à la valeur R_0 . La figure 4(c) nous montre que la compensation se fera en mettant en série avec une résistance R_0 un réseau d'impédance R_0^2/Z_1 , le tout placé en parallèle sur l'impédance globale. R_0^2/Z_1 est le réciproque ou le dual de Z_1 ,

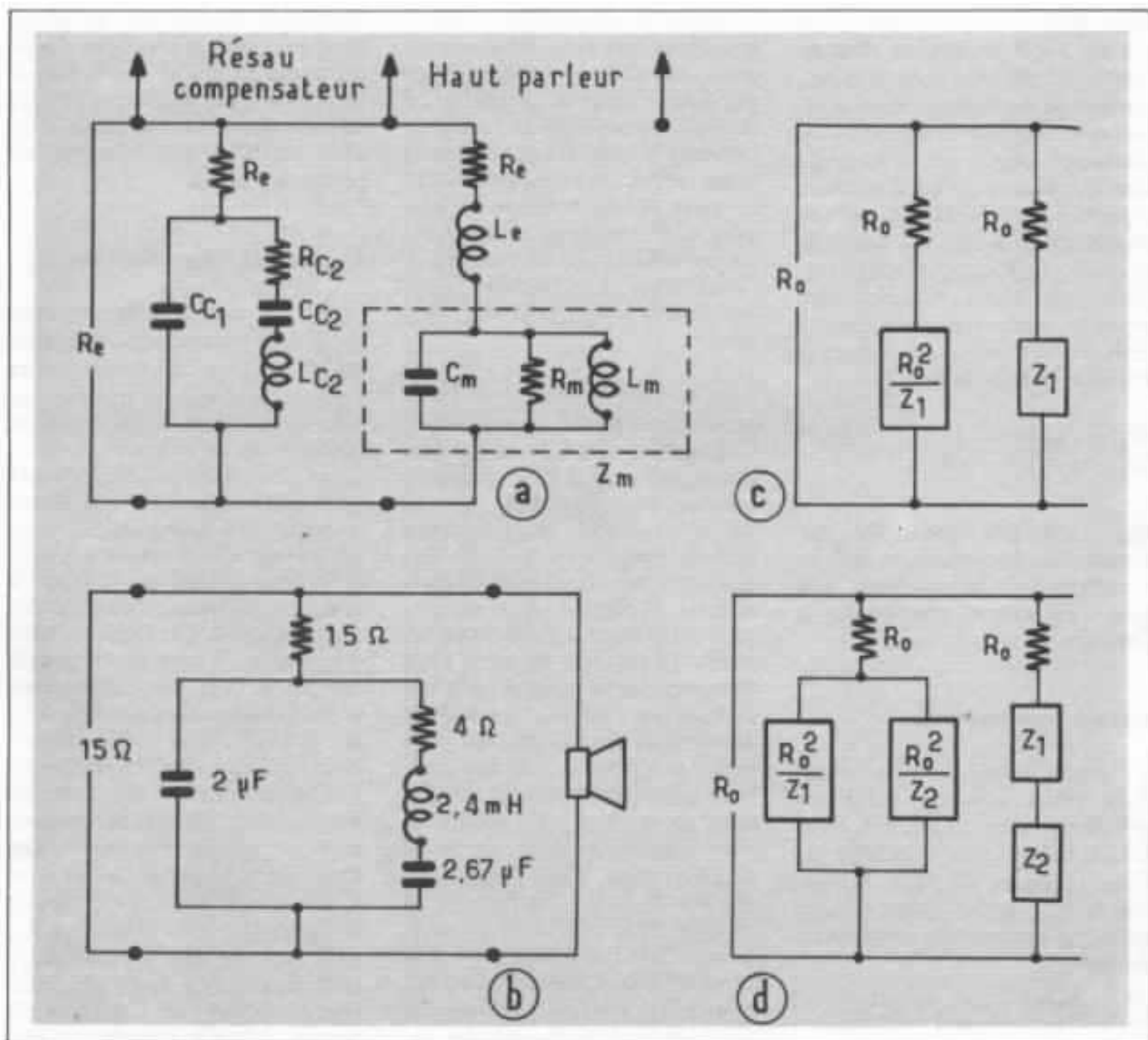


Fig 4 : Réseaux compensateurs

par rapport à R_0 . Deux points doivent être analysés. Tout d'abord le dual est seulement celui de Z_1 et non pas de $R_0 + Z_1$.

Dans l'application présente, R_0 sera pris généralement comme la résistance en continu de la bobine qui est indubitablement en série avec d'autres valeurs indirectes, voire capacitives. Le deuxième point est le suivant : quand Z_1 comprend deux composants en série Z_2 et Z_3 par exemple comme dans la figure

4d, le réseau compensateur comprend R_0 en série avec un autre réseau qui est la mise en parallèle de R_0^2/Z_2 et R_0^2/Z_3 duals respectifs de Z_2 et Z_3 . Ceci résulte, en fait, de la propriété générale qui pour un nombre d'éléments en série, le dual global est obtenu par une mise en parallèle de chacun des duals.

Aussi pour le cas pratique du haut-parleur figure 4a nous substituons Z_2 par L_e et Z_3 par l'impédance notionnelle Z_m . Le dual comprend tout d'abord C_{c1}

et en parallèle avec lui la combinaison série de R_{c2} , C_{c2} et L_{c2} . Le lecteur pourrait être tenté de traiter les deux problèmes séparément et de faire deux compensations séparées, l'une compensant L_e comprenant une mise en série de R_c et C_{c1} , le tout en parallèle avec l'autre réseau compensateur de Z_m comprenant R_e en série avec R_{c2} , C_{c2} et L_{c2} . Une telle démarche est erronée.

La compensation ne sera jamais parfaite ou totale mais il

est possible de l'approcher le mieux possible dans la plupart des cas du haut-parleur traditionnel où les deux réseaux séparés couvrent largement des bandes séparées de fréquences. Dans les cas simples le réseau compensateur de l'impédance motionnelle sera omis. dans les tweeters, l'interaction entre L_e et Z_m est plus masquée. Le réseau de la figure 4_a pourra compenser effectivement des fluctuations indésirables de l'impédance.

$$C_{c1} = \frac{L_e}{R_e^2} \quad R_{c2} = \frac{Q_e R_e}{Q_a}$$

$$C_{c2} = \frac{1}{Q_c R_e \omega_s} \quad L_{c2} = \frac{Q_e R_e}{\omega_s}$$

La figure 3b illustre le réseau compensateur d'un tweeter typique de 15 Ω , $f_s = 2$ kHz, c'est-à-dire $1/\omega_s = 80 \mu s$, $Q_a = 7,5$, $Q_e = 2$, $L_e/R_e = 30 \mu s$. La résistance de 4 Ω R_{c2} est réalisée

avec la résistance cuivre de la self L_{c2} de 2,4 mH.

Avec cette égalisation d'impédance toute interdiction entre les réponses du tweeter et du réseau diviseur disparaît.

Conclusion

Si on doit faire appel à des réseaux séparateurs passifs dans le système multi-voies, ceux-ci doivent être des paires complémentaires de passe-haut et de passe-bas, d'ordre impair et de configuration Butterworth, avec les transducteurs connectés dans les sens de phase électrique qui procurent la moindre erreur dans la distribution des retards suivant les fréquences. Soit dans le même sens relatif pour le premier et le cinquième ordre, en sens opposé pour le troisième.

Le premier ordre est le seul

dans lequel une réponse totale idéale est obtenue. Le troisième ordre semble nécessaire quand l'excursion du tweeter limite la tenue en puissance ou provoque de la distorsion, voire la destruction. la seule contrepartie est une petite erreur de retard à travers la bande.

Le cinquième ordre produit même une transition de la réponse plus rapide entre boomer et tweeter mais au prix d'une erreur de retard quelque peu supérieure et une complexité plus élevée.

Bibliographie

- THIELE IREE, July 75.
- SMALL Constant Voltage crossover Network design IREE March 70.
- ASHLEY and HENNE « operational amplifier implementation of ideal electronic crossover networks » JAES January 71.

**Page non
disponible**

Pour une philosophie de l'écoute

Jean-Pierre Bugnard

La réalisation d'un local d'écoute, découle d'une approche progressive de la restitution sonore. Cette restitution devant être au fur et à mesure de l'exigence de l'auditeur de plus en plus proche de la réalité. Cette perfection étant le concert, le but est de restituer chez soi autant que faire se peut « la réalité du concert ».

Celle-ci ne sera jamais atteinte, bien évidemment, mais le confort d'une audition « a volonté » peut provoquer un niveau de plaisir proche ou même supérieur à ce que le concert dispense, à condition que tout participe à ce plaisir. L'essentiel, alors, est d'être chez soi dans l'environnement le plus favorable à l'écoute. Dans cet article, Jean-Pierre Bugnard nous relate son expérience. Laquelle, on le remarquera, a été grandement guidée par les goûts musicaux de l'auteur.

La salle d'écoute - son approche

Parler dans ces lignes de l'acoustique des salles peut sembler présomptueux. Car, après la série exhaustive, de Monsieur Gilles Cantagrel : la voix dans les églises, il semblerait que tout est dit. Mais si tous ces articles nous donnent les bases pour « harmoniser » la voix et la musique dans le local, il reste malgré tout que ce local n'est pas vraiment prévu pour cela. Notre propos sera donc inverse et, à partir de la

musique, du son, d'en déduire les bases de notre salle d'écoute.

Il est de fait que la salle d'écoute est le maillon par excellence de la chaîne haute-fidélité. On fait généralement très attention au choix des divers maillons, que ce soit la platine de lecture avec son bras et sa cellule, le préamplificateur, l'amplificateur et les enceintes. On essaiera de coupler cellule-enceintes de façon à avoir une linéarité parfaite dans la réponse. On prendra un soin jaloux de l'électroni-

que. Les transports de modulation seront confiés à des câbles sophistiqués et puis, cet ensemble sera installé dans une pièce où finalement rien ne sera vraiment étudié pour le rendu de la musique.

Notre but sera ici de dégager dans les grandes lignes les caractéristiques de ce maillon primordial, car enfin, c'est oublier que la musique, dans sa presque totalité, a été écrite pour « l'intérieur ». Certes il y a la Musique Militaire, les « Water » et autres



Fig 1 - *Syntagma Musicum*. Michael Praetorius (1571 - 1621).
L'art de bien jouer de la viole de bras. Remarquer la forme de l'archet.

« Firework's Music », mais justement ces œuvres tiennent compte des caractéristiques extérieures : perte très rapide du son, absence totale de résonance.

L'opéra où se jouaient les œuvres lyriques de Haydn à Esterhaz ne comportait que quatre cents places... C'est l'époque romantique, le XIX^e siècle, qui a « boursofflé » les œuvres musicales des siècles passés, ne l'oublions pas.

Ainsi donc sachant cela, la salle de concerts se réduit au salon. Les Rois, les Princes, les Hobereaux Musiciens, Mélomanes, et certainement Audiophiles

(aux vues et à l'écoute des œuvres de l'époque Baroque où la recherche sonore conduisait à des associations instrumentales extraordinaires), possédaient de vastes salons. Les dimensions de ces pièces d'apparat et de musique étaient supérieures à cent cinquante mètres carrés avec des hauteurs sous-plafond de six à dix mètres, certaines avoisinaient les cinq cents mètres carrés : Versailles, Schonbrun, Sans Soucis en sont l'exemple et là dans ces salles somme toute très peu meublées (tel que nous l'entendons aujourd'hui) se donnait le Concert pour le plaisir du Prince.

Plus tard, à l'avènement du romantisme et à la démocratisation du Concert tel que nous le connaissons maintenant nous aurons des salles immenses ; mais ces salles sont prévues pour l'orchestre romantique, La puissance de l'orchestre Beethovenien sonne alors dans les salles où l'acoustique, si celle-ci est réussie, va de pair avec le nombre des places offertes à l'auditoire : la salle sonne et vit à la musique. Les rattages actuels des salles où l'acousticien règne en maître donne des résultats bien souvent déplorables qu'il n'est pas besoin de nommer. Ces salles se voulant polyvalentes ne sont finalement que des hérésies musicales.

Mais revenons à nos Princes Mécènes et à leurs salons. Avec dix instruments sonnans dans neuf cent mètres cubes (salle « normale » peut-on dire, de quinze mètres de long, dix de large et six de hauteur) la musique sonne vraiment, avec une réverbération de une à deux secondes, cette salle respire, la musique y chante et, connaissant la sonorité des instruments de l'époque : la richesse en harmonique des instruments à cordes tendus de boyaux et joués avec des archets moins rigides que les nôtres, les bois dont la perce moins parfaite sonnent différemment, un peu flou, moins fort aussi, les cuivres eux, sans piston, naturels avec une certaine raucité qui nécessite un volume d'air important justement pour « lisser » les imperfections de la tessiture, alors, sachant cela on imagine aisément la beauté sonore que cette musique pouvait avoir grâce à la décroissance lente du son.

Donc pour en revenir au local d'écoute et si l'on veut que celui-ci puisse nous donner des émotions esthétiques, il lui faudra un peu des caractéristiques des salons anciens. Ce qui va suivre retracera pas à pas l'étude et la conception ainsi que la réalis-

tion de la salle d'écoute du signataire de ces lignes. J'ajouterai que n'étant ni prince, ni financièrement capable de dépenses somptuaires, je me suis borné au minimum requis pour avoir une salle agréable et l'ai intégrée dans l'habitation puisqu'elle est en même temps salle de séjour et salle à manger

Etudes préliminaires

Si l'on veut bénéficier pleinement d'un trente deux pieds d'orgue chez soi, à condition bien sûr que le transducteur électro-acoustique en soit capable, une certaine longueur de pièce est indispensable : les 16 périodes par seconde du jeu de l'orgue de trente deux pieds nous donnera : 10,62 mètres de longueur. Je m'explique : sachant que le son se déplace dans l'air à la vitesse de 340 mètres seconde et connaissant la fréquence la plus basse désirée nous en déduirons la longueur d'onde. La demie longueur d'onde nous donnera la dimension minimum pour bénéficier des seize périodes/seconde sans affaiblissement important.

Formulation :

$$\lambda = \frac{V}{F} = \frac{340}{16} = 21,25\text{m}$$

$$\text{soit } \lambda/2 = 10,625\text{m.}$$

De plus, sachant que la vitesse du son augmente de 62 centimètres par seconde et par degré centigrade, pour une écoute confortable à 20°C nous trouverons :

$$[(0,62 \times 5) + 340] / 16 = 21,443$$

$$\text{soit } \lambda/2 = 10,721\text{m.}$$

J'ajouterai que le problème de température du local s'il joue sur les éléments de la chaîne, et de façon très importante : membranes de H.P. et suspension élastique du porte-diamant de la cellule, influe aussi énormément sur le son.

A basse température un corps sonore quelconque sera perçu

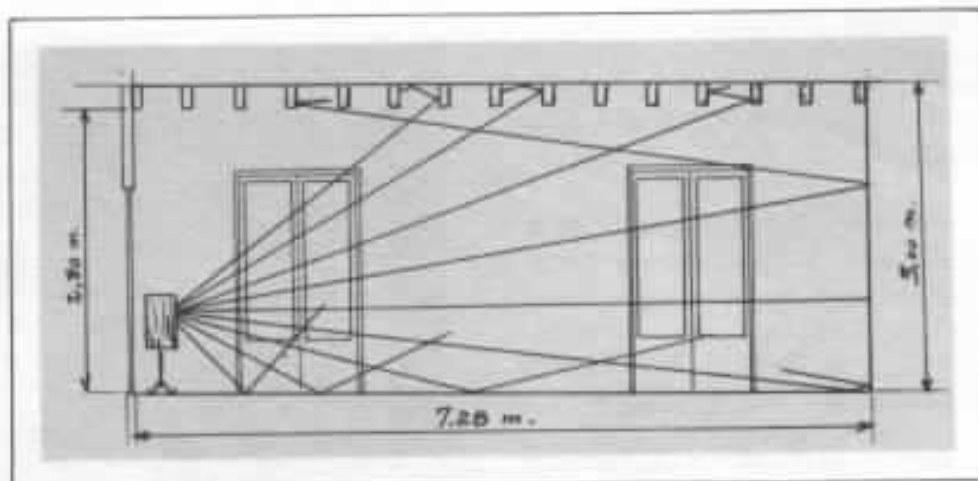


Fig 2 - Effet de «piège» du plafond dit à la française.

plus aigu, plus clair qu'à haute température ; il n'est que de se souvenir des sonorités de cloches en hiver et en été. Une variation de 25 à 30°C. transforme radicalement l'émission sonore de cette cloche. Faut-il y voir aussi la montée aberrante du diapason qui depuis 2 siècles et surtout ces cinquante dernières années est passé d'environ 420 à 440 Hz : diapason international normal

1939, et Conférence de Londres 1953 et bientôt 445 Hz, il est déjà de 442 Hz à l'Opéra de Paris ainsi qu'à la Philharmonique de Berlin, exigeant des instruments de musique et de la voix humaine des records ridicules. Ceci étant peut-être dû à nos salles de concerts de plus en plus chauffées et d'où la musique semble de moins en moins brillante pour un diapason normal. Mais laissons là

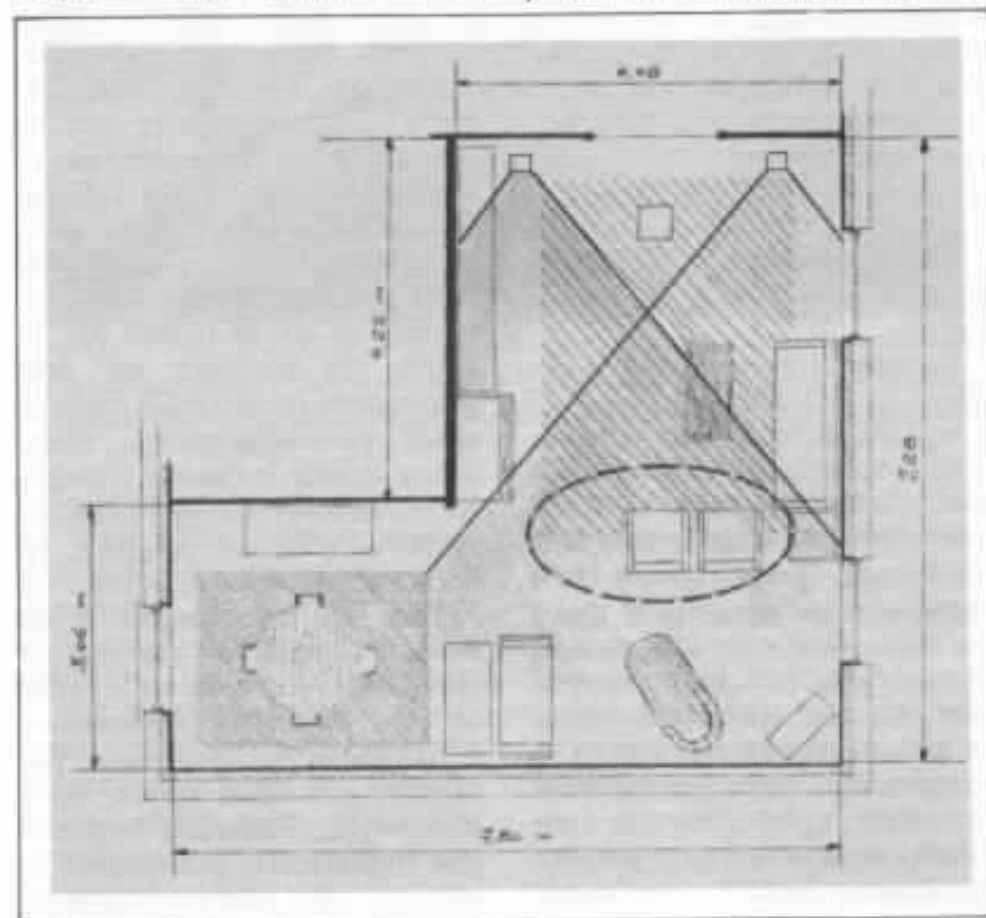


Fig 3 - Dimension du «salon de Musique» et zone d'écoute
Hauteur sous plafond = 2,80 m.

l'agitation thermique des molécules de l'air ambiant s'opposant au passage de nos chères ondes sonores et revenons à nos propos.

Puisque nous avons déjà déterminé la longueur de notre salle ou tout au moins que nous en connaissons les limites, voyons maintenant ses autres dimensions.

Le son tout comme la lumière sur une surface réfléchissante, rebondira sur l'obstacle avec un angle identique à l'angle d'incidence et, selon les dimensions de la pièce, nous aurons un faisceau de fréquences avantagées par rapport aux autres. Ainsi la forme cubique, la plus désastreuse, aura tendance à favoriser une fréquence bien déterminée, fonction de la dimension de la pièce. Les harmoniques de cette fréquence seront eux aussi privilégiés, toutefois, ils seront de moins en moins perçus au fur et à mesure de leur hauteur, du fait des diffractions apportées par les petites irrégularités de surface, si bien que nous aurons une salle extrêmement redondante dans les basses.

Quelles solutions s'offrent à nous pour remédier à cet état de fait ?

La première consiste à diminuer la réflexion des murs ; nous installerons des rideaux, nous poserons des tapis sur les sols, quelques canapés et quelques fauteuils confortablement rembourés. Tout ceci ne fera finalement qu'accroître le mal : les aigus diffractés très rapidement s'éteindront, les graves peu sensibles à ce traitement seront de plus en plus prépondérants et la pièce, très mate, produira un roulement grave très vite fatigant : ainsi ce qui peut paraître satisfaisant devient catastrophique et l'on se heurte à un problème insoluble. Donc proscrire toute forme de pièce carrée et à



Fig 4 - Salon de Musique - vu de l'entrée.

fortiori cubique ayant tendance à favoriser une zone du spectre sonore. Ainsi donc nous tâcherons de construire une pièce parallélépipédique. Pour ne pas alourdir cet article, les calculs étant longs, fastidieux, répétitifs nous ne déterminerons pas les dimensions de ladite pièce par ce moyen, un essai a été fait sur ordinateur donnant ainsi pour des pièces allant jusqu'à mille mètres cubes les dimensions optimaux : ce qui se traduit par un listing de quelques six cent dimensions sur les trois côtés de notre parallélépipède... Nous allons utiliser le fameux Nombre d'Or. Celui-ci comme tous les nombres d'Or en peinture, en architecture est le fruit de chance, de tâtonnement et de calcul. L'équilibre parfait des façades de Versailles est le résultat de patientes recherches. L'harmonie des ouvertures par rapport aux murs pleins, leurs dimensions, hauteurs, largeurs, leur emplacement par rapport au sol, aux toits, aux extrémités et, entre elles, sont tout droit sortis de dimensions ayant entre elles un rapport constant, ce rapport

est toujours un multiple d'un nombre d'Or valable en architecture.

En acoustique on s'est aperçu que les dimensions dans le rapport suivant de 1 - 1,6 - 2,6 pour des salles jusqu'à mille mètres cubes ne favorisaient pas trop la redondance sur l'ensemble du spectre sonore, tout en gardant à la pièce une dynamique de bruits très agréables.

Ainsi, à partir de ce nombre d'Or : 1 - 1,6 - 2,6 nous pourrions facilement calculer les dimensions de notre pièce.

La première dimension sera bien évidemment la hauteur sous plafond : celle-ci conditionnant toutes les autres ainsi d'ailleurs que toute la construction. Pour 2,50 m. de hauteur nous aurons en largeur : $2,5 \times 1,6 = 4,00$ mètres, et en longueur : $2,5 \times 2,6 = 6,50$ mètres.

Pour 6,50 mètres nous aurons comme limite inférieure audible 26,6 Hz, ce qui peut sembler correct. Mais dès lors que l'on a la possibilité de remonter le plafond (cas de la construction

d'une villa individuelle), nous pourrions choisir 2,80 mètres de hauteur sous plafond ce qui nous donnera 4,48 mètres de large et 7,28 mètres de long et l'on descendra à 24,26 Hz.

Les dimensions choisies il nous restera à traiter les surfaces de façon à ne pas se priver de la « luminosité musicale » de notre pièce.

Réalisation

Reprenons le salon de musique des demeures princières. Aux siècles passés, les plafonds, les murs, les sols étaient par eux-mêmes des éléments du décor. Le prestige du Prince y était tout engagé. Les plafonds à la française, aux poutres régulières, les plafonds à caissons peints et dorés, les stucs en rosaces, girandoles, et moulures rendaient ceux-ci absolument aptes à diffracter les sons, à les avaler, à les disperser dans toutes les directions. Ce qui avait l'avantage étonnant, toute proportion gardée de servir de plafond... « sourd » ; et quel meilleur traitement acoustique finalement qu'un plafond à la française ?

Les sols en bois, en marbre, en pierre étaient lisses, leur dureté favorisant la réflexion des sons. Pour en diminuer ces effets des tapis nombreux mais peu épais étaient jetés et n'étouffaient que légèrement ceux-ci. Aux murs, des tableaux, des toiles et des tapisseries représentaient souvent notre Prince en gloire, à la chasse, à la guerre glorifiant ses exploits. Plus prosaïquement des Verdures (tapisseries ornées d'un décor de feuillage) servaient de... chauffage empêchant le froid de la pierre des murailles d'irradier leurs frigories sur les habitants. Aux fenêtres très hautes, pas ou peu de rideaux. Très souvent, des volets de bois intérieurs avaient la même finalité que les



Fig 5 - Détail du sol : Grès d'Artois (11 X 22 cm) posé de façon très irrégulière à joints larges et creusés. Les tapis recouvrent environ le tiers de la surface du sol.

tapisseries et faisaient obstacle au froid. Ces fenêtres étaient profondément encastrées dans l'épaisseur des murs, rompant ainsi leurs surfaces. Tout ceci, tableaux, tentures, tapisseries n'était finalement qu'un traitement « léger » n'enlevant pas la sonorité de la pièce. Les meubles étaient, sinon rares, disproportionnés en taille par rapport à la salle qui les recevait et n'avaient que peu d'effet sur les sons. Tout ceci n'est pas pure invention de ma part, il suffit de regarder les

témoignages picturaux des siècles passés pour s'en convaincre.

En définitive, le seul traitement acoustique de ces salles était l'auditoire. Debout et assis il provoquait, un peu comme dans nos églises actuellement, l'amortissement nécessaire à l'obtention d'une bonne acoustique, une diminution de la résonance du local. Et comment douter de la sonorité de ces salons ?

Essayons donc d'intégrer tout ceci dans une construction



Fig 6 - Meuble technique ou bibliothèque - Ensemble modulable à volonté, outre la facilité de mise en œuvre et le faible coût, ce meuble peut être composé et dessiné en fonction de l'encombrement de chacun des éléments de la chaîne. D'autre part il forme un ensemble de cases dans lesquelles le son est « piégé » ce qui traite cette face du parallélépipède.

moderne. Evidemment pas question de nous offrir le luxe d'une cour qui nous permettrait d'avoir le « traitement » acoustique idéal « pour la pièce digne de « notre château »... Reprenons nos esprits et donnons-nous comme maximum une pièce de 2,80 m. de hauteur sous plafond. Celui-ci sera bien évidemment traité à la française. Poutrage de 0,20 x 0,10 mètres environ avec comme dimension entre les axes 0,50 mètres. Bien sûr celui-ci sera installé perpendiculairement au mur contre lequel seront placées les enceintes. Ce plafond sera traité comme tel, c'est-à-dire qu'il servira de plancher au niveau supérieur à condition que le traitement acoustique en soit correct (afin d'éviter toutes transmissions de bruit, et

d'impacts de pas). Ou bien il sera réalisé en fausses poutres de plastique posées et collées sur le plâtre de votre plafond. Le résultat sera le même quant au « piégeage » des sons.

Pour une installation de cet ordre, la hauteur à envisager pour les dimensions en largeur et en longueur de la pièce sera la hauteur comprise entre le sol et la base des poutres. Le volume d'air compris dans la profondeur des poutres ne venant pas influencer sur les sons puisque ce volume d'air sert de piège.

Si la pièce ne doit servir que de salon de musique on peut fort bien la concevoir parallélépipédique. Si par contre celle-ci est intégrée dans l'ensemble habituellement appelé salle de séjour

du fait de cette forme, celle-ci sera peu agréable d'utilisation. Je préconise donc une pièce en forme de L dont la partie principale sera le côté musique, repos, quant à l'autre partie on pourra l'utiliser en tant que « salon de dames » ou salle-à-manger...

De part ce schéma et en fonction de la zone principale de la pièce les transducteurs seront donc placés en A et A' et la zone d'écoute sera évidemment en B. Ce découpage de salle vous donnera une multitude de possibilités en fonction du mobilier, du nombre de personnes invitées à partager vos soirées d'écoute, etc... L'idéal étant, j'en suis persuadé par expérience, d'avoir derrière soi un volume inutilisé important.

Ce volume inutilisé réagit comme « caisse de résonance », en fonction du plan sonore déterminé par l'emplacement des enceintes acoustiques et de la zone privilégiée représentée par la position des deux fauteuils. La distance comprise entre les auditeurs et le mur, derrière ceux-ci, étant de trois mètres environ, le décalage de temps entre le son direct et le son réfléchi, revenant du mur arrière, sera de l'ordre de vingt millisecondes. Extrêmement faible donc et ne sera pas perçu comme résonance encore moins comme écho. Ce léger déphasage donnera subjectivement une impression d'espace remarquable et, si bizarre que cela puisse paraître tendra à élargir, à « volumiser » le message sonore direct en provenance des enceintes. Les très nombreux essais pratiqués, les positions d'écoute diverses et variées, en s'éloignant de la source sonore, donc en diminuant le volume arrière, corrobore ces impressions. Ainsi l'on recrée les conditions, toutes proportions gardées, du concert, on redonne par ce biais un volume au son, une liberté, une aération que l'on perd irrémédiablement si l'on se colle le dos au mur.

Par ailleurs, pour des auditions d'enregistrements très réverbérées, orgue par exemple où l'acoustique du lieu est très particulier et où « l'effet de salle » est déjà très important, on aura la possibilité de diminuer ce « vide arrière » et donc d'atténuer l'effet de notre salon d'audition. De même, pour des écoutes à très forte puissance, il sera aussi possible de prendre un certain recul car à haut niveau et suivant, peut-être, les matériels mis en œuvre, l'étalement, surtout en profondeur, se restreint : la musique semble sortir d'une boîte.

Enfin, et découlant de ce que nous venons de dire, le mur



Fig 7 - Raccordement de l'antenne rotative : connecteur Souriaux

opposé aux enceintes ne sera pas absorbant, donc non tendu de rideaux, son traitement acoustique consistera à être orné de plusieurs tableaux, encadrements, sous-verres. Ceux-ci accrochés de façon à ce qu'ils ne soient pas parallèles au mur mais faisant avec celui-ci un angle plus ou moins important ; toujours, bien sûr, dans le but de diminuer les surfaces parallèles les unes aux autres et de provoquer des diffractions supplémentaires.

Après avoir vu le traitement du plafond de notre pièce ainsi d'ailleurs que celui du mur arrière, voyons un peu les autres côtés. Pour une bonne réalisation il nous faudra obligatoirement trois faces absorbantes et trois faces réfléchissantes ; des deux faces déjà « connues » :

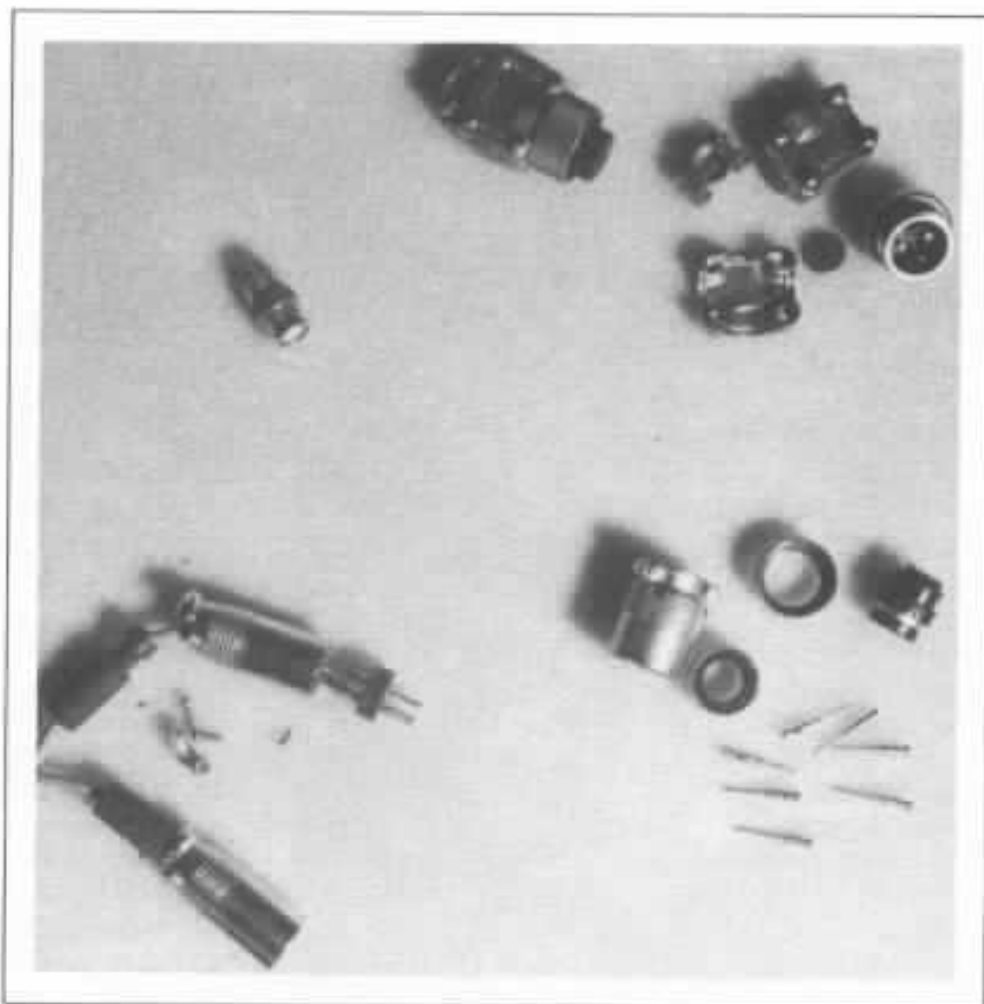
plafond et mur opposé aux enceintes seul le plafond est absorbant il nous reste donc à trouver deux côtés absorbants, deux côtés réfléchissants.

Le sol

Celui-ci sera traité dans le même esprit que le sol des salons de nos demeures princières. Le bois est par nature le matériau noble mais, outre son prix il est d'un entretien coûteux et constant. Le marbre, même sans en considérer le prix est froid ; autant d'apparence que de contact, d'autre part avec un plafond à la française le choix n'est pas très judicieux du point de vue esthétique. Pour en revenir au problème qui était le mien : maison individuelle et de plain-pied, mon choix s'est porté sur un Grès d'Artois (n'y voir aucune publicité) non vernissé. Celui-ci posé à l'ancienne avec des joints de ciment larges et creusés apporte sa part à l'amortissement de la pièce. De plus ce sol s'harmonise très bien avec le plafond à la française et n'est pas d'entretien délicat. La correction acoustique, nécessaire malgré tout, est apportée par deux tapis représentant un peu plus du tiers de la surface totale de la salle soit environ dix huit mètres carrés, ces tapis seront plus ou moins importants selon le reste du mobilier mais n'anticipons pas, il nous reste à terminer notre construction.

Les cloisons

Elles seront classiquement de briques creuses plâtrées, leur épaisseur sera la plus élevée possible compte tenu des grandes surfaces de séparation soit de cinq centimètres. Les briques de trois centimètres seront utilisées pour les doublages des murs extérieurs à condition de procéder à l'étalement de ces



*Fig 8 - Hardware : Fiches de connections professionnelles :
 en haut à gauche : fiche coaxiale B.N.C.
 à droite : fiche à 3 contacts et blocage Jaeger.
 en bas à gauche : fiche à trois voies Canon. Tous ces accessoires sont plaqués
 argent.
 en bas à droite : fiche à 7 contacts or, de marque Souriaux.*

doublages grâce à du bois baké-
 lisé. Ce traitement de ces doublages nous garantira une absence quasi totale des vibrations aux basses fréquences et le choix du bois baké-
 lisé nous évitera les ennuis de craquellement et de fissures des plâtres car celui-ci est absolument insensible aux variations d'hygrométrie. D'autre part, dans toutes les constructions actuelles, l'isolation thermique étant poussée nous n'aurons pas à craindre les ponts thermiques du fait de ces raidisseurs baké-
 lisés.

Les ouvertures extérieures

Celles-ci portes, porte-fenêtres, fenêtres seront évidemment garnies de vitrages isolants, leur

épaisseur, leur montage en sandwichs étanches, ormis l'économie de chauffage réalisé leur assurent une excellente stabilité vis à vis des vibrations engendrées par les fréquences basses. Autres avantages : ces vitrages vous isoleront fort bien des bruits extérieurs. Ne pas choisir ces surfaces vitrées trop importantes, l'esthétique ancienne apportée par le plafond à la française ne se conçoit qu'avec des ouvertures moyennes. Mais si vous aimez les grandes baies, traitez-les en « petit bois », cela créera des ruptures dans les surfaces vitrées et ces ruptures seront toujours bénéfiques à la musique.

Le revêtement final des murs pourra se faire de plusieurs

façons et chacun pourra donner libre cours à son imagination. Soit un crépi intérieur pas trop irrégulier, soit un revêtement de papier peint ou paille de riz à la japonaise, ce qui aura tendance à assourdir très légèrement la pièce. Pour mon compte un papier peint m'a donné entière satisfaction. Je ne préconise pas de tendre du tissu sur les murs : ce traitement est toujours beaucoup trop important, son action bien trop efficace, le son semble provenir alors des haut-parleurs, ponctuellement, et nulles réflexions sonores ne viennent « éclairer » le message sonore.

Pour terminer cette pièce, ce salon de musique, il reste à le meubler. Ici la personnalité du propriétaire pourra s'affirmer et



Fig 9 - Ecoute. L'ensemble de reproduction sonore est composé des éléments suivants :

- table de lecture Harman Kardou ST 7 Cellule Audiotechnica AT 20 SLA.
- ampli-préampli Central 340 de Prodisc filtre actif à 3 voies.
- enceintes ensemble 303 de Prodisc, deux satellites médium-aigu, un caisson sous basse.
- tuner Revox A 76 - magnétophone Revox A 77 MK 2
- magnétocassette Teac A 103 (pour les enfants !!!) - antenne rotative Kenpro + Wisi - D.B.X. 122...

diverger de l'exemple proposé, sans pour autant oublier que la multiplication des meubles capitonnés et rembourrés est un facteur important dans le traitement acoustique de la pièce. Mais avant d'aller plus loin il faut un troisième et dernier côté pour absorber nos sons. Nous avons déjà traité du plafond, nous avons abordé le sol et ses tapis, il nous faut maintenant prévoir un mur et c'est ce mur destiné à la chaîne justement qui servira de troisième côté absorbant. La réalisation artisanale visible sur les photographies est composée d'un ensemble de rayonnage « auto-stabilisé », si je puis dire, et entièrement modulable et démontable. Ce genre de meuble est extrêmement pratique pour tout amateur de changements : il

nous permettra de faire évoluer notre chaîne haute-fidélité sans que nous ayons besoin de changer de meuble support, puisque ce mur doit être absorbant la meilleure des solutions consiste en une bibliothèque ouverte : les caissons réservés aux livres, objets, disques, ainsi d'ailleurs qu'à l'électronique seront autant de « pièges à sons », les différents éléments diffracteront et étoufferont les sons, ainsi le mur complet sera traité. Si par contre on préfère un meuble moins important il est évident que l'on pourra traiter ce troisième côté en choisissant le mur possédant les ouvertures. Ici les deux portes-fenêtres pourraient être garnies de rideaux et de doubles rideaux. Leurs importances, plus ou moins grandes, joueraient le

rôle d'écrans absorbants réglables et l'on retrouverait, alors, la possibilité de corriger l'acoustique de la pièce d'une manière variable.

Dans mon exemple le meuble alvéolé outre le fait qu'il peut-être modifié à tous moments, comme je l'ai dit, devient un élément du décor. La chaîne haute fidélité peut y trouver une place volontairement technique ; le camouflage n'étant pas alors de mise ; ainsi les ouvertures n'ont plus besoin d'être occultées par les rideaux, le jour entre mieux et l'on bénéficie d'une vue sur la campagne...

Nous sommes donc maintenant en possession de nos trois faces absorbantes. Les 3 autres faces

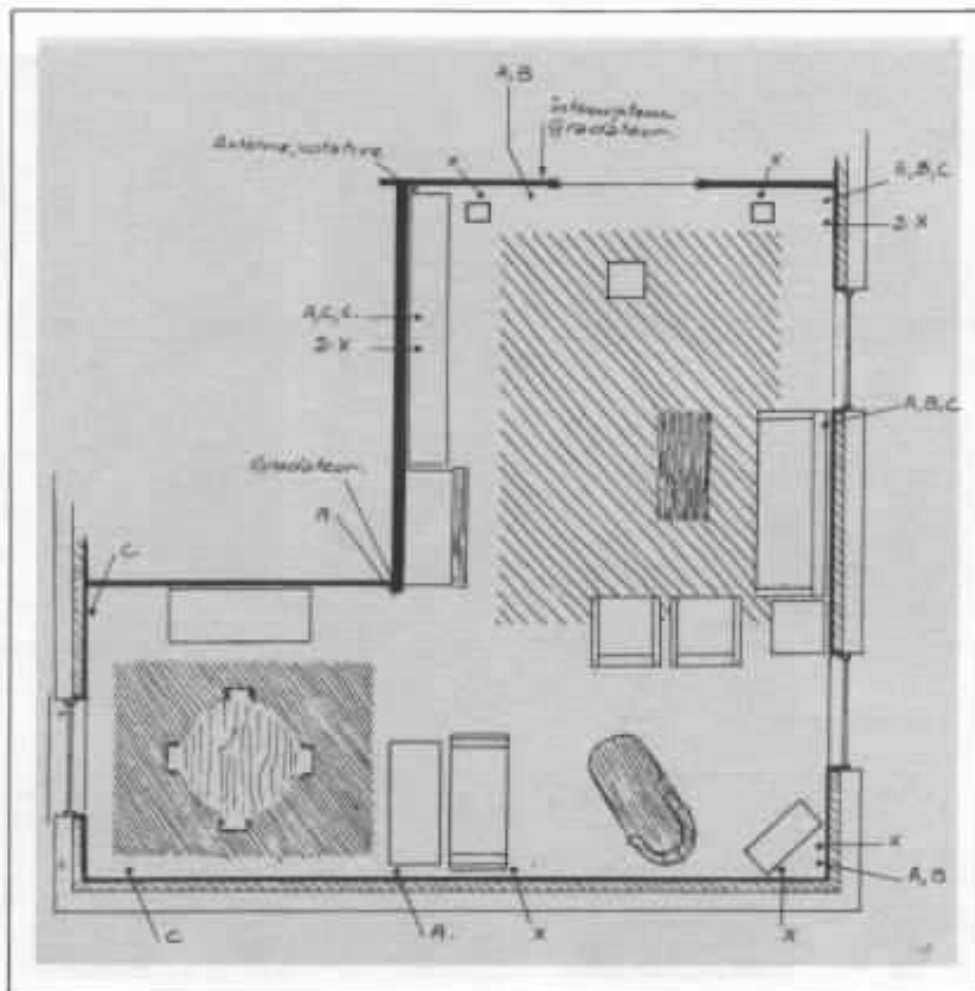


Fig 10 - Installation électrique :

A : prises commandées par gradateur de lumière.

B : prises commandées par interrupteur simple.

C : prises sans coupures.

X : prises pour transport de modulation : H.P.

seront réfléchissantes. Les lignes qui précèdent sont finalement, avec le nombre d'Or, et le volume d'air important dans le dos des auditeurs, à mon avis, et après expérience personnelle, les conditions nécessaires et suffisantes pour bien réussir une salle de musique.

Avec cet acquis on peut être assuré de ne pas faire d'erreurs flagrantes et si, dans la pièce réalisée sur ce schéma, il y a encore de légers défauts ceux-ci sont minimes et très facilement corrigibles par l'ameublement.

Avant de prendre possession de notre salon, il reste encore à y amener tout le confort d'utilisation : il serait vain de ne pas y prévoir dès le début de l'étude les

facilités qu'apporte un câblage encastré pour tout ce qui touche aux transferts de modulation, aux arrivées d'antennes, aux alimentations électriques. Le nombre d'appareils à brancher, leur place dans le dit salon commande déjà une installation de prises de courant nombreuses. Il faut même prévoir les prises d'arrivées d'antennes de modulation de fréquence et de télévision au besoin ; si la proximité d'une frontière vous autorise la réception d'émetteurs étrangers il sera bon de prévoir une antenne rotative et donc de procéder à l'installation de tout le câblage nécessaire à son alimentation et à sa télécommande. Si financièrement l'installation n'est pas prévue dans l'immédiat on installera tout de même dans

les cloisons les tubes nécessaires aux câblages futurs, ainsi que des boîtes d'accès à ces tubes. Il est peu coûteux d'ajouter quelques mètres de gaines alors que l'installation complète à posteriori nécessite de casser les cloisons pour y encastrer ces gaines et cela devient alors d'un coût prohibitif.

Les câbles de liaisons amplificateurs-enceintes acoustiques seront installés dans les murs, on prévoiera de plus les encastresments nécessaires pour y fixer les fiches d'entrée et de sortie ; ces fiches seront choisies de façon à ne pas avoir de difficulté de repérage de la phase des haut-parleurs. A l'heure actuelle, les branchements sont extrêmement facilités par le choix des prises

de type divers : Cannon, Jaeger, Amphenol, Souriaux, etc... Il en existe de nombreux types destinés aux industries de pointe qui font pâlir les matériels mis à la disposition des audiophiles, fiches à multi-contacts, blocages de sécurité, contacts or, blindages amagnétiques, sections de contacts supérieurs à 2 mm², etc...

Enfin, l'éclairage de notre salon se doit d'être étudié avec une extrême attention. La musique pour être pleinement goûtée nécessite un environnement confortable. L'écoute attentive demande en plus un calme absolu, peu de lumière, au maximum l'auditeur fermera les yeux de façon à n'être pas distrait dans son attention. Ainsi tout devra concourir au calme d'une écoute attentive. Le classique luminaire central suspendu au plafond ne sera pas utilisé. Tout au moins pendant les écoutes :

on lui préférera plusieurs zones de lumière réparties à la périphérie de la pièce et commandées d'un ou deux points pour le confort de l'utilisation. Ces commandes seront réalisées non à partir d'interrupteurs simples, mais à partir de variateurs de lumière qui permettront de régler l'éclairage de façon progressive et continue. L'installation sera réalisée de manière à pouvoir évoluer dans le temps, c'est-à-dire qu'un même gradateur commandera un nombre important de prises de courant réparties au pourtour de la pièce. Une partie de ces prises seulement seront utilisées en fonction du décor et toutes modifications ultérieures de ce décor pourra être envisagée sans avoir à multiplier les cordons rallonge. On pourra même selon les dimensions de la pièce installer des plinthes électriques qui permettront alors de placer les prises de

courant au point exact de leur utilisation. A chaque instant, donc, l'on pourra en fonction de l'œuvre musicale écoutée, adapter le niveau de lumière et apprécier l'œuvre musicale d'autant plus que tout concourra à concentrer notre attention sur celle-ci.

Nous aurons dans ces quelques pages, voulu donner non pas des conseils, cela serait par trop arrogant, mais proposer à tout amateur de musique, mélomane ou audiophile, une réflexion sur la salle d'écoute. La salle est, je le répète, le maillon essentiel de la chaîne de reproduction sonore et faire bénéficier l'amateur exigeant de mon expérience et de mon cheminement peut justifier ces pages.

Il reste que n'étant moi-même amateur et non professionnel de l'acoustique le résultat obtenu peut-être certainement perfectible.

**Page non
disponible**

L'approche du subjectif

Timbre et

information acoustique

G. Altieri

Deux sons présentant la même intensité et la même hauteur peuvent produire chez un auditeur une image acoustique très différente. Cette distinction au niveau perceptif trouve ses origines dans la structure physique des signaux qui peut mettre en évidence des caractéristiques particulières, tout en maintenant identiques les deux paramètres cités plus haut. Les différences ainsi établies sont englobées dans le terme timbre. Ce concept est à l'origine de la reconnaissance des instruments musicaux par un récepteur d'écoute. Notons, donc que lors de la reproduction artificielle de la musique, la reconnaissance adéquate des instruments, et par conséquent la fidélité de l'image sonore originale est dépendante de la capacité du système électro-acoustique à transmettre les paramètres physiques qui contiennent l'information nécessaire. Notre première tâche consistera en l'étude et à l'identification éventuelle des conditions réunies par un groupe de signaux permettant de reproduire la sensation d'un timbre différencié

«Le recueil de normes françaises» préparé par l'AFNOR (Association Française de Normalisation) établit que «le terme *timbre* est appliquée au caractère de la sensation auditive qui différencie deux sons de même hauteur et de même intensité et qui permet la reconnaissance de l'origine ou de l'appartenance à un groupe de sons donnés. L'attaque, les composants du

son agissent sur le timbre. Physiquement, le timbre est lié à la composition spectrale d'un son et à son évolution».

Naturellement cette base strictement physique est superposée, lors du phénomène perceptif, aux particularités du système auditif humain. Rappelons qu'au commencement de la chaîne perceptive, la distribution spectrale d'un son est responsa-

ble, déjà, de la formation d'une image spéciale, dérivée de l'effet de filtrage au niveau de l'oreille. Plus précisément, les composantes de basse fréquence et les composantes de très haute fréquence sont perçues avec plus de difficulté que celles qui correspondent à la région du spectre audible, considéré donc comme une zone privilégiée et située aux alentours de deux mille hertz (fig

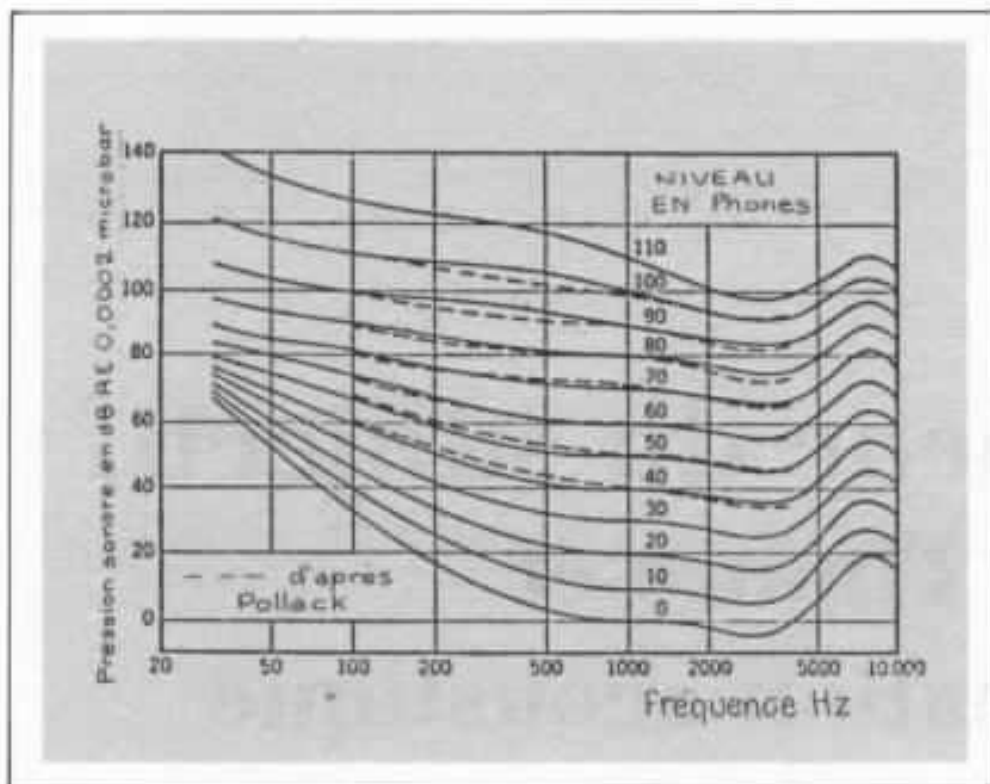


Fig 1 Courbes de sonorité équivalente pour sons purs (Churcher et King)
 «On dit que le niveau d'isophonie d'un son ou d'un bruit est de n phones quand la sonie du son ou du bruit est jugée équivalente par un auditeur normal moyen à celle d'un son pur de 1000 Hz, se propageant par ondes planes face à l'auditeur, et dont la pression acoustique est de n dB au dessus de la pression acoustique de référence $20\mu\text{Pa}$ » (NF 08-25-055)

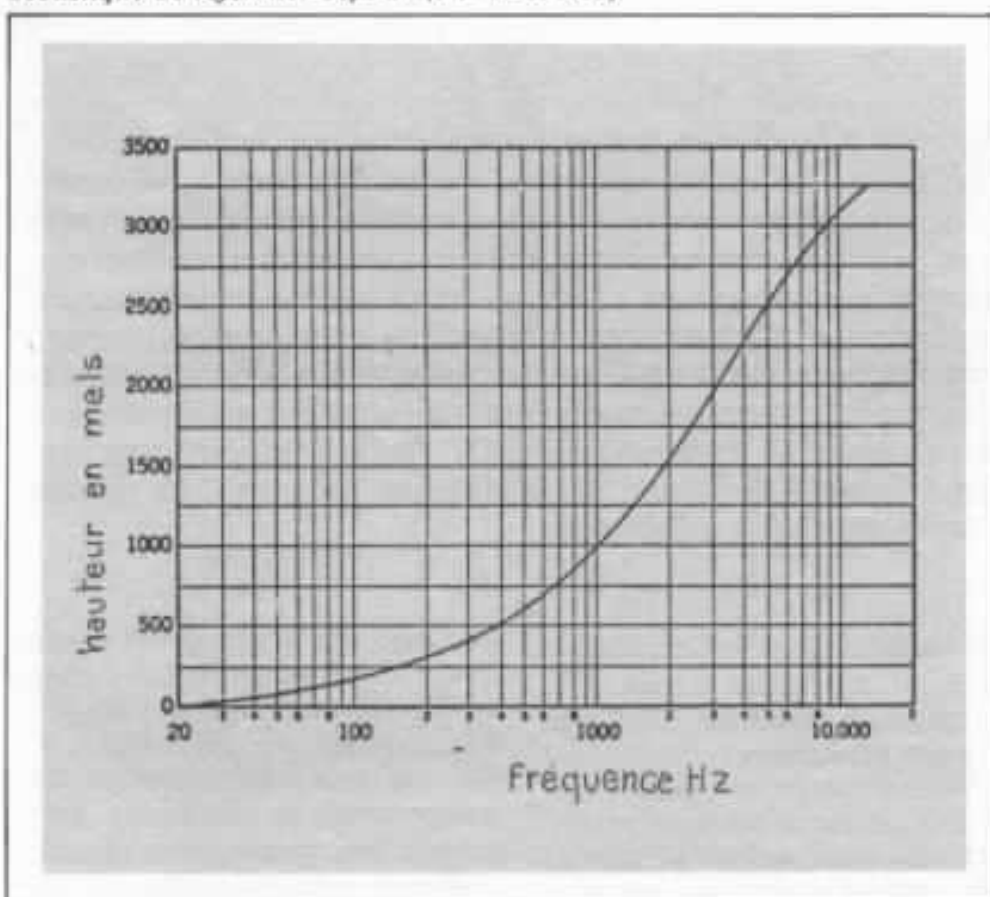


Fig 2 Rapport entre la hauteur subjective (en mels) et la fréquence
 mel - unité utilisée pour caractériser la tonie «Par définition, la tonie d'un son pur ayant une fréquence de 1000 Hz et un niveau de pression acoustique de 40 dB par rapport à $20\mu\text{Pa}$ est de 1000 mels (NF 08-25-020)

1, 2, 3). Les composantes d'un son complexe ont donc une importance relative variable entre elles, en rapport avec les propriétés de l'appareil récepteur. Prenons un exemple qui a déjà été cité par Leipp (1977).

La représentation sonographique d'un son de 500 Hz, présentant 11 harmoniques d'égal niveau est indiquée dans notre figure 4. Dans ce type d'analyse acoustique un signal est décomposé en trois éléments institutifs principaux : fréquence, niveau et distribution temporelle. La fréquence est indiquée dans l'axe perpendiculaire, tandis que l'intensité est représentée par le noirçissement plus ou moins intense des marques imprimées. Un son pur de 500 Hz sera donc visualisé comme un trait horizontal pendant toute la durée de l'analyse. Si l'intensité est maintenue constante, l'image visuelle du son sera uniforme dans toute sa longueur.

Dans notre cas, nous avons un premier trait horizontal correspondant à la fréquence de 500 Hz et une succession de segments équidistants présentant ici la même épaisseur représentative de leur intensité. Remarquons, d'ailleurs, que l'analyse sonographique exprime l'évolution temporelle de l'intensité et de la fréquence, ce qui donne une image bien adaptée à nos besoins actuels.

Or, la structure physique du son est interprétée par le système auditif selon les conditions de filtrage déterminées dans la première partie de notre étude, c'est à dire que le stimulus d'origine présente pour l'auditeur l'image corrigée, montrée dans la figure 4b. C'est ainsi qu'une transposition spectrale provoque un changement de timbre en rapport avec les conditions de superposition des paramètres physiques avec la courbe de réponse du système auditif.

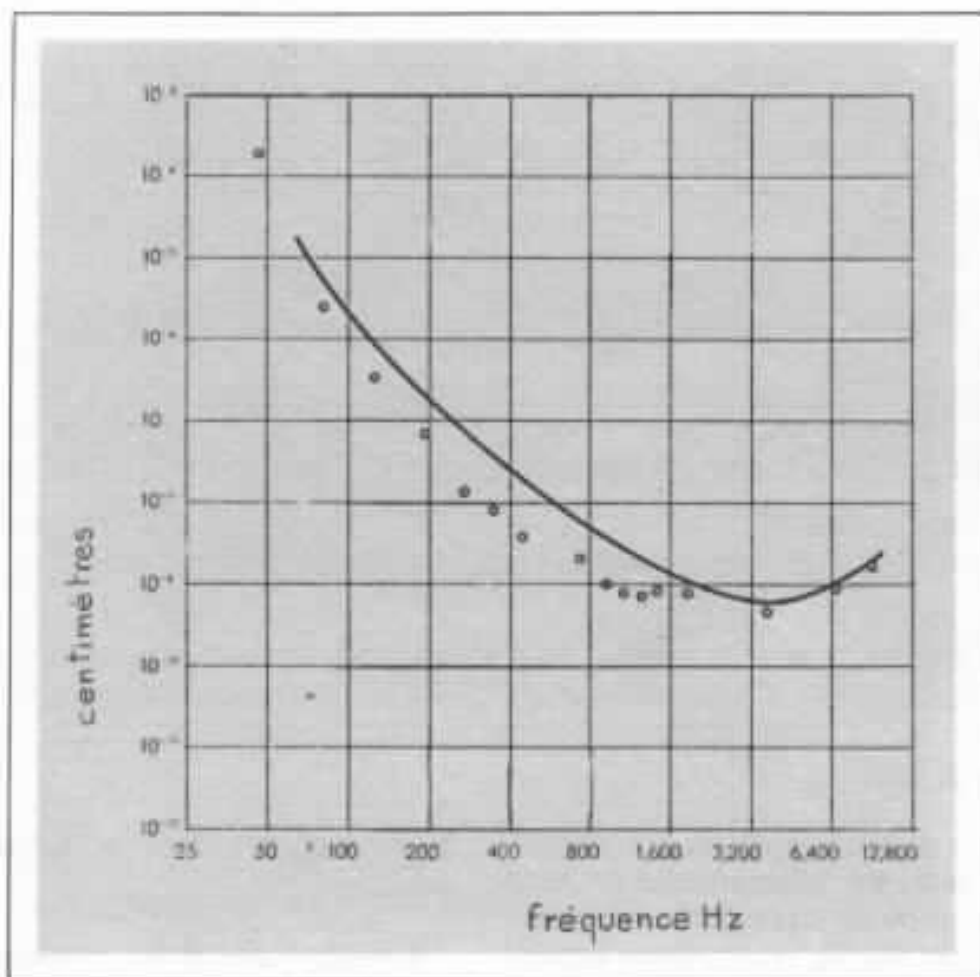


Fig 3 Expression de la sensibilité de l'oreille. La courbe montre le rapport entre le déplacement de la membrane tympanique et la fréquence du son qui a activé le mécanisme.

On comprend donc, que la capacité de restitution des diverses régions du spectre audible montre dans la reproduction musicale des conséquences perceptives capables de modifier la signature originale d'un message sonore.

Nous avons évoqué ainsi, un premier aspect de la perception du timbre, aspect qui découle de la connaissance du fonctionnement partiel de l'oreille. Avant de rentrer dans des considérations plus profondes, il est intéressant de discuter une expérience concrète dans le domaine de la discrimination du timbre dans les formes musicales.

Recherche des propriétés de discrimination du timbre

Dans la bibliographie spéciali-

sée, nous remarquons que les recherches achevées dans le domaine de la perception du timbre des sons musicaux comprennent presque exclusivement l'étude de stimuli isolés. Or, les conditions de l'écoute musicale ne correspondent pas à une telle simplification physique. Les difficultés d'ordre technique ont donc empêché l'exécution d'études se rapprochant des conditions réelles. John Grey a proposé récemment la comparaison entre les capacités de discrimination du timbre dans des contextes tonales isolés et celles qu'on peut détecter dans les formes musicales complexes.

On arrive à comparer ainsi la capacité de discrimination entre deux versions synthétiques différentes de trois instruments dans plusieurs conditions expérimen-

tales : tons isolés, formes mélodiques à source unique, formes musicales à sources multiples. Les trois instruments considérés sont : une clarinette, un basson et une trompette. Les stimuli sont représentés sous forme de notation musicale dans notre figure 5. L'analyse spectrale des sons utilisés lors des tests a permis la connaissance précise de l'expression physique du phénomène (à ce sujet, voyez la figure 6). D'autre part, tous les auditeurs (au nombre de 13) ont été sélectionnés parmi des spécialistes bien connus dans le domaine de la musique traditionnelle et de la musique synthétisée et ont en général, une expérience préalable dans des tests de discrimination de timbre.

La procédure de travail a été conçue en respectant les plus sévères exigences scientifiques en

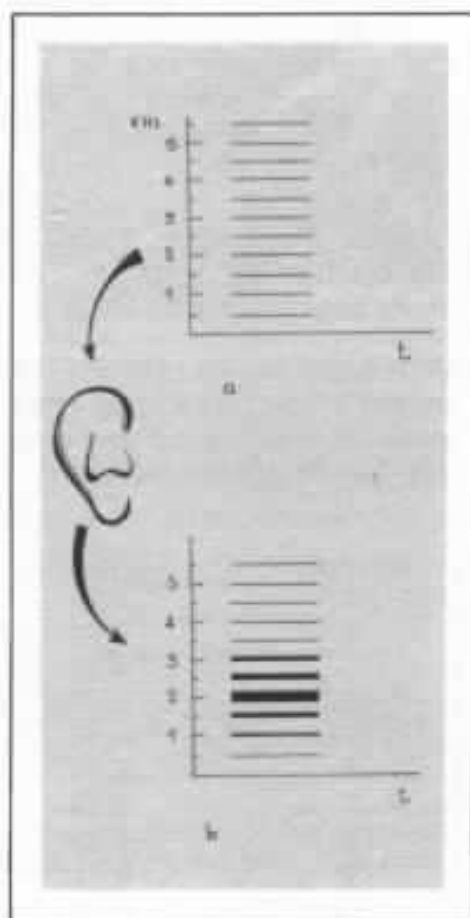


Fig 4 Représentation sonographique d'un son dans son aspect physique (a) et dans son aspect perceptif (b)

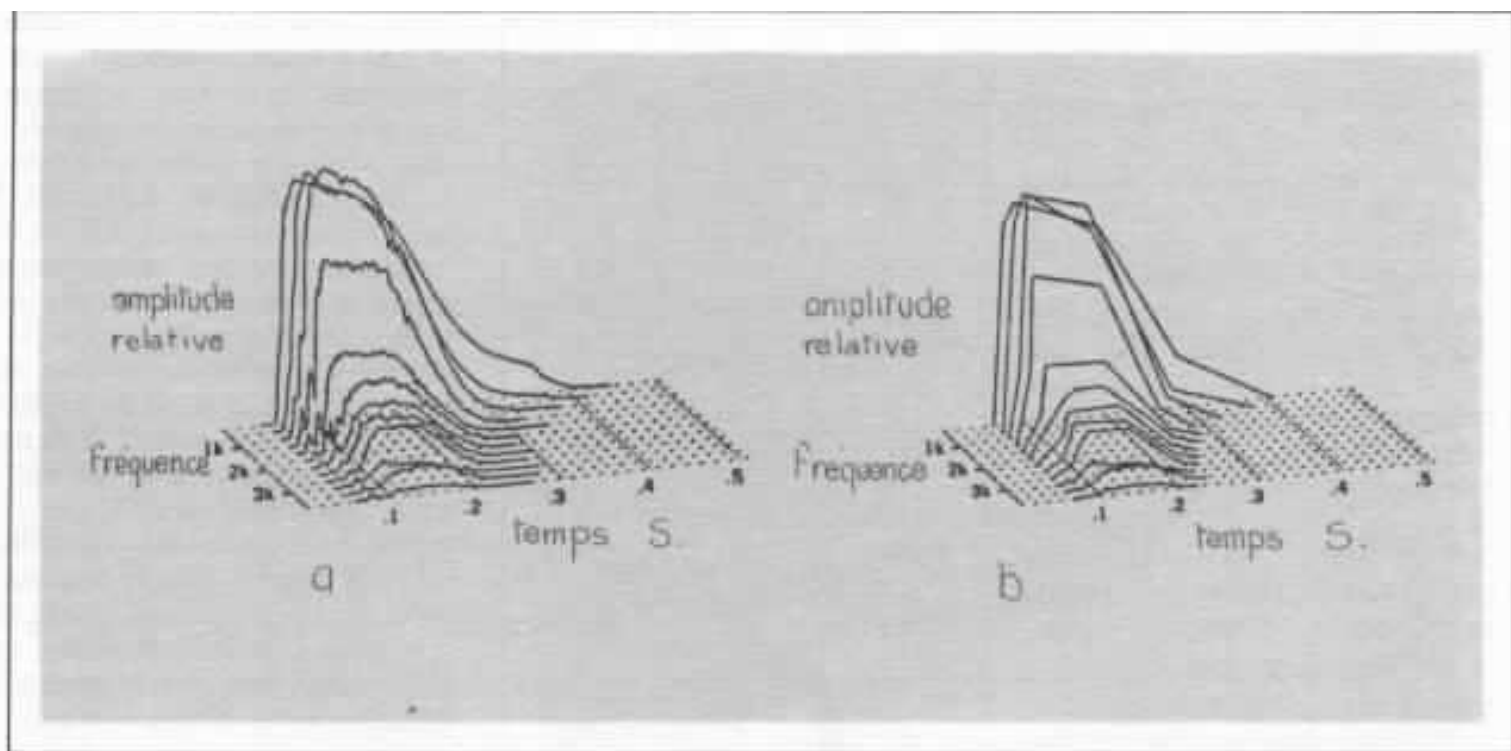


Fig 5 Evolution du spectre en fonction du temps a - trompette b - clarinette

matière d'essais comparatifs et évolution des résultats d'écoute.

Les réponses individuelles ont été combinées avec des appréciations prévues dans le protocole. Ces appréciations sont du type «pas sûre», «sûre», et «très sûre». La combinaison de ces deux facteurs peut-être exprimée en termes de caractéristiques relatives d'opération, forme de représentation suggérée par Swets sous le nom de «ROC».

Dans notre cas les résultats correspondant aux 12 stimuli représentés dans la figure 5 sont montrés dans le tableau suivant :

Si nous rapportons les résultats de discrimination sous forme de représentation graphique (fig 7), nous notons rapidement le rapport existant entre la discrimination du timbre et le contexte sonore global. Dans le cas de la clarinette et de la trompette, la discrimination est meilleure pour les sons isolés. La baisse des performances est telle que dans la dernière condition, les résultats comparatifs se rapprochent du hasard.

Le cas du basson présente des caractéristiques nettement différentes et qui sont d'ailleurs faci-

les à visualiser dans le même schéma.

L'analyse global des résultats permet d'affirmer que la capacité de discrimination du timbre est la conséquence d'un concours de plusieurs facteurs qui sont en plus, différemment dosés pour chaque instrument. C'est ainsi que l'image spectrale est un principe fondamental dans le processus de reconnaissance mais qu'elle présente une évolution particulière dans le temps qui joue un rôle de toute première importance dans le processus global. La distribution temporelle d'un stimulus donné contribue de cette façon à la multiplication des paramètres qui au niveau perceptif déterminent une signature acoustique.

La distribution temporelle des composantes d'un signal sonore présente une importance toute particulière lorsqu'on considère le début et la fin d'un stimulus. Le phénomène transitoire qui a lieu dans ces circonstances constitue un élément fondamental dans le processus de reconnaissance acoustique. Les sonagram-

Stimulus	Clarinette	Basson	Trompette
1	0,76	0,85	0,80
2	0,74	0,90	0,73
3	0,76	0,82	0,72
4	0,74	0,79	0,75
5	0,57	0,89	0,65
6	0,65	0,91	0,65
7	0,73	0,91	0,66
8	0,66	0,91	0,73
9	0,51	0,80	0,54
10	0,53	0,84	0,56
11	0,59	0,86	0,62
12	0,48	0,87	0,54



Fig 6 Stimulus utilisés lors des expériences de M. Grey

mes de la figure 8, empruntés à Leipp montrent, dans une distribution spectrale similaire, les différences existant dans les transitoires d'attaque entre les trois instruments. Les particuli-

tés observées constituent une partie clef dans la signature acoustique d'une source. Le fonctionnement de l'oreille en tant que détecteur de transitoires, ne fait que renforcer le rôle

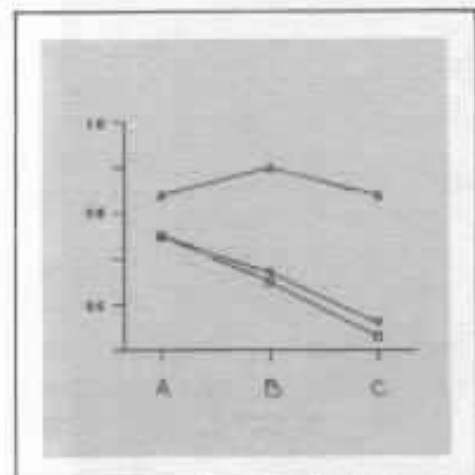


Fig 7 Capacité de discrimination dans les situations

- A - Stimulus 1, 2, 3, 4
 B - Stimulus 5, 6, 7, 8
 C - Stimulus 9, 10, 11, 12
 Δ - Basson
 □ - Clarinette
 ▽ - Trompette

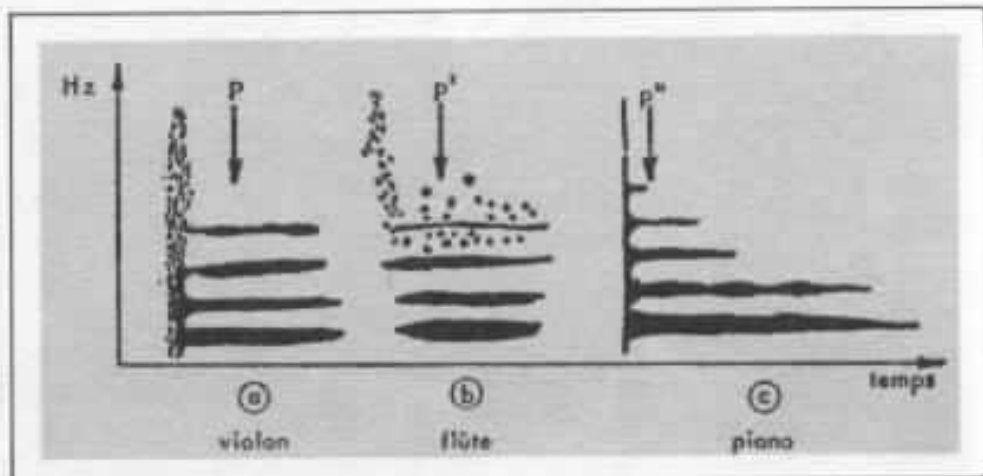


Fig 8 L'image analytique des transitoires permet de détecter le frottement de l'archet, le bruit de souffle, l'attaque en fuseau de la flûte et la hachure verticale de l'attaque du piano (Leipp 1976)

de ces phénomènes de courte durée, qui nous le savons, sont porteurs d'une précieuse information.

Conséquences dans un système de reproduction musicale

Il est évident que si la reconnaissance des sources est faite à partir de la discrimination du timbre caractéristique, la reproduction fidèle doit tenir compte des paramètres qui déterminent les variations du timbre. La distribution spectrale des signaux et surtout son évolution temporelle doivent être scrupuleusement respectées. Et il est exigé aussi que la reproduction des transitoires soit capable de représenter les variations rapides des paramètres qui sont propres à la source sonore.

Enfin, étant donné que l'écoute est réalisée dans un espace géométrique qui introduit de fortes modifications spectrales, la perception du timbre passe en définitive par l'éventuelle correction acoustique des lieux d'audition musicale.

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

Activités des constructeurs

L'évaluation du comportement des enceintes acoustiques selon Kenwood

Les lecteurs connaissent certainement les remarquables réalisations de Monsieur Ohara du département amplificateur de Kenwood, père des 0 9M, 0 7M, 0 5M.

Remettant en cause, nombres de critères solidement enracinés, Monsieur Yamazaki, ingénieur de la division enceinte acoustique a suivi la même démarche. L'étude qui suit est un condensé des recherches qui ont abouti à une gamme de trois enceintes acoustiques, LS-1900, LS-1600 et LS-1200.

Il faut noter l'approche résolument nouvelle prenant en compte un très grand nombre de facteurs pour cerner aussi précisément que possible les problèmes de la restitution sonore. Laquelle répétons-le est loin d'être définie par les mesures conventionnelles qui ne représentent qu'une vision ponctuelle et non global des phénomènes.

Deux aspects principaux ont guidé le développement :

- Améliorer la linéarité à la fois de la réponse en fréquence et de la réponse en puissance.
- Éliminer les recouvrements entre les haut-parleurs de grave, médium, aigu, causés par les interférences tant électriques qu'acoustiques.

1 - Linéarité de la réponse

La dynamique est un facteur essentiel de la musique. Aussi convient-il de la reproduire aussi linéairement que possible des pianissimo aux fortissimo.

Il faut bien voir que généralement la courbe de réponse d'une enceinte acoustique donnée présente une allure qui varie en fonction du niveau délivré. Lors d'écoute de messages musicaux, il y a un balayage permanent en niveau. Une mauvaise linéarité en puissance provoque des zones de fréquences accidentées, entachées de « bavures ».

Kenwood s'est attaché à concilier une réponse en fréquence aussi régulière que possible alliée à une excellente linéarité de la réponse en puissance.

Notons que cette forme d'analyse faisant intervenir une excursion en fonction du niveau, fournit une quantité d'informations infiniment plus

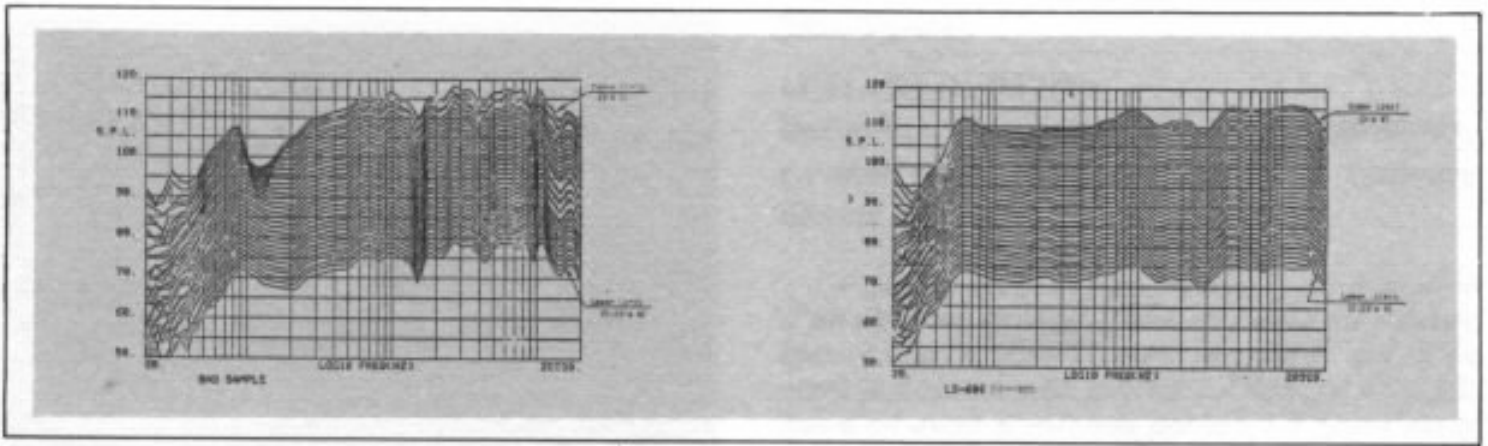


Fig. 1 : Linéarité et non linéarité en niveau.

grande que celle procurée par une simple courbe de réponse. Un soin particulier a été apporté aux transducteurs pour obtenir ces caractéristiques de linéarité de la réponse :

- Le haut-parleur de grave comporte un circuit magnétique dont la forme lui confère des caractéristiques de distribution du flux magnétique uniforme. Ce circuit utilise un aimant réalisé à partir d'un alliage à très faible perte de flux. Le cône papier est pressé sous air chaud ce qui améliore le module d'Young et le facteur d'amortissement de la substance,
- Le haut-parleur de médium est original de par son système de support central qui supprime les vibrations partielles du cache bobine. Ce dernier est très souvent la cause de non linéarité et de perturbations de régime transitoire.
- Le haut-parleur d'aigu utilise une chambre de compression à pavillon à diffraction.

2 - Diaphonie

Ce terme a rarement été utilisé dans le domaine des haut-parleurs. Cependant, des interférences mutuelles se manifestent tant sur le plan mécanique que sur le plan électrique entre chacun des haut-parleurs.

Cette forme de distorsion a été analysée en détail :

- *Diaphonie électrique* : elle a pour principale origine le filtre répartiteur. Lorsque celui-ci est réalisé de manière conventionnelle, la répartition n'est pas parfaite. De nombreuses pertes d'énergie se produisent par mutuelles inductions entre les bobines. Une autre cause provient de ce qu'il existe des différences du potentiel entre les divers points du filtre et la masse commune du circuit. Ces problèmes ont été atténués par l'implantation du filtre ; espacement très important entre les selfs, câblage en étoile.

- *Diaphonie mécanique* : elle a pour origine les vibrations transmises par chacun des transduc-

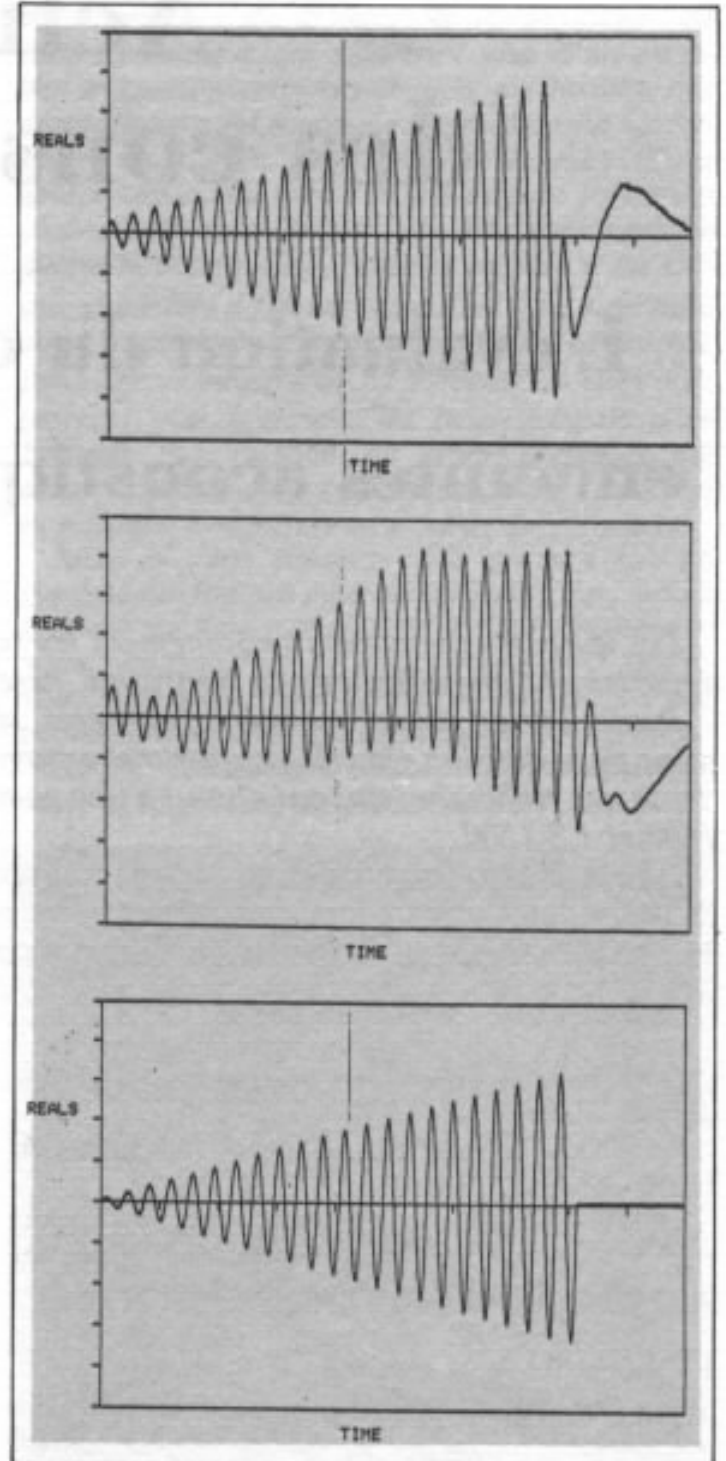


Fig. 2 : Stimulus et types de réponse relative à la linéarité en niveau.

teurs aux baffles qui lui sont associées. Principalement, le haut-parleur de grave «module» par les vibrations qu'il transmet le médium et le tweeter. La solution de cavité séparée entre le grave et le registre médium-aigu a été adoptée.

3 - Matériaux :

Des investigations ont été menées en corrélation avec de nombreux tests d'écoute pour la réalisation des cônes et des enceintes :

- les cônes pressés sous air chaud sont réalisés sous un jet d'air chauffé à très haute pression.
- l'aggloméré employé pour la réalisation des coffrets est issu de recherches sur les particules de bois et sur les résines.

A noter que tous les composants passifs employés ont été sélectionnés pour leur faible perte et leur bonne tenue aux vibrations.

4 - Mesures

Toutefois, un des plus grands intérêts de cette étude réside dans les méthodes de mesure développées pour analyser chacun de ces facteurs. La place nous manque dans ces colonnes pour les analyser en détail. Aussi nous limiterons-nous à quelques exemples des plus significatifs.

a) - Mesures de la linéarité en puissance :

Comme nous l'avons noté, l'analyse de ce paramètre a été essentiel dans le développement de la nouvelle série d'enceintes acoustiques. Les mesures ont été faites suivant deux aspects : l'un électrique l'autre mécanique. La figure 1 représente les mesures effectuées avec un microphone comme capteur. Les résultats obtenus peuvent être visualisés de diverses manières tant en repère à deux ou à trois dimensions. Par ailleurs, des mesures de linéarité ont été effectuées à partir d'un capteur opto-électronique traduisant en

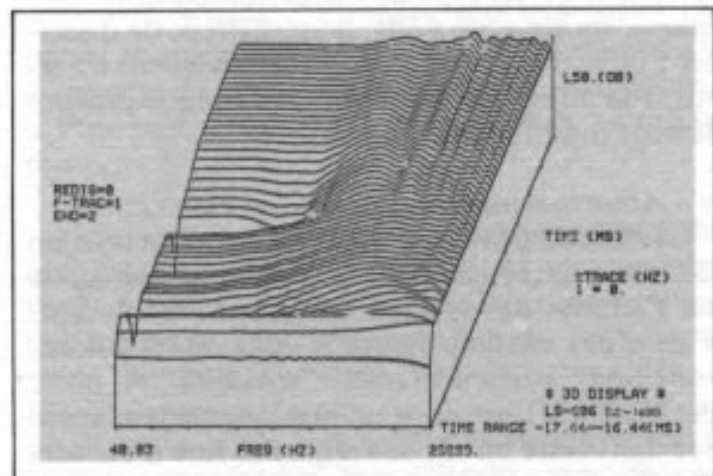


Fig. 3 : Caractéristique de la réponse à un front de montée.

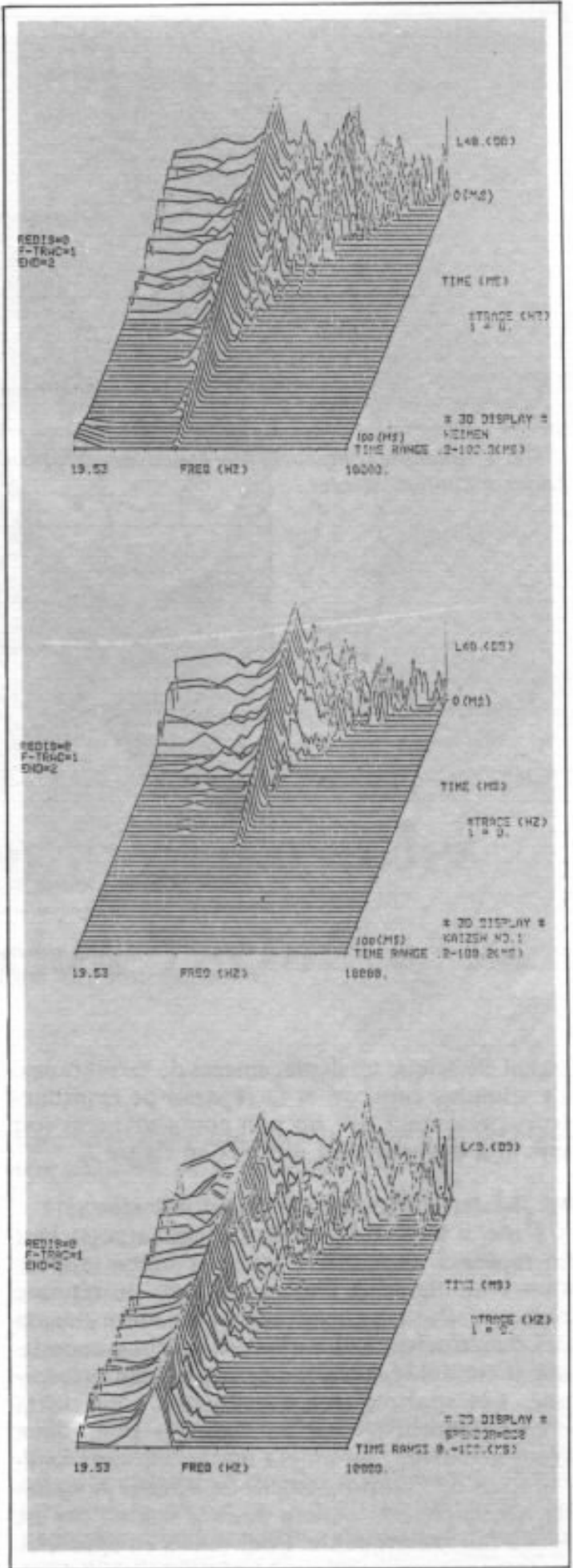


Fig. 4 : Réponses à une impulsion pour deux types de baffles et d'une enceinte conventionnelle

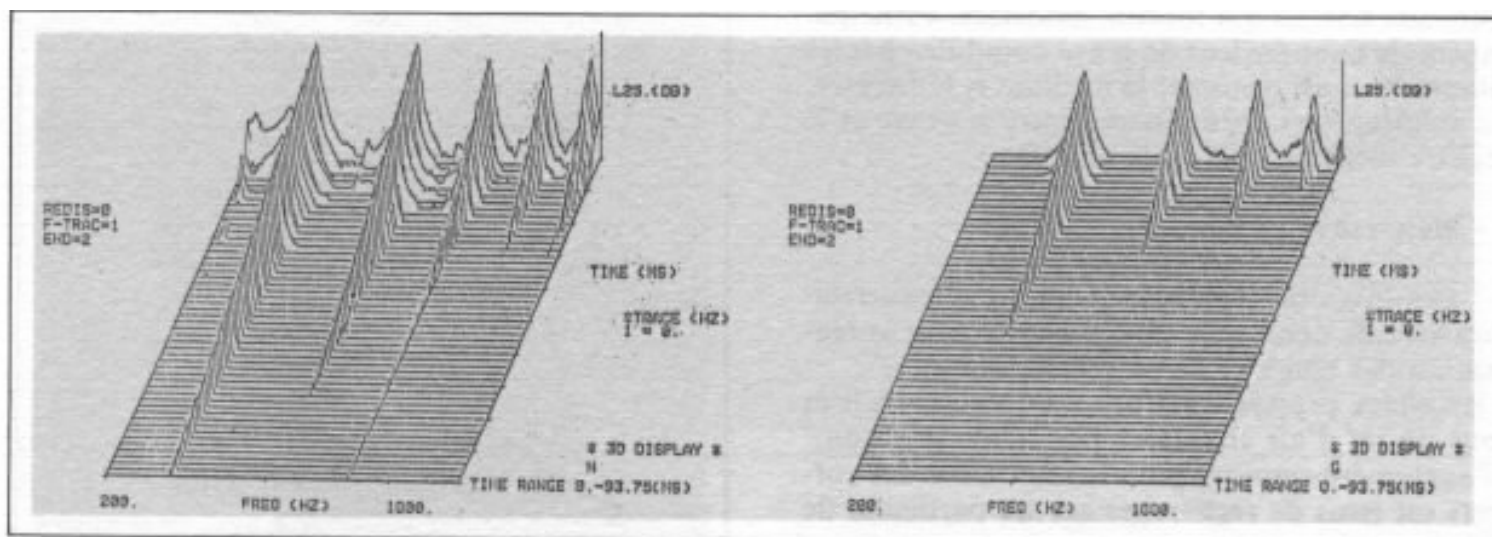


Fig. 5 : Réponses obtenues pour deux types d'agglomérés utilisés pour la réalisation de l'enceinte, mettant en évidence l'amortissement.

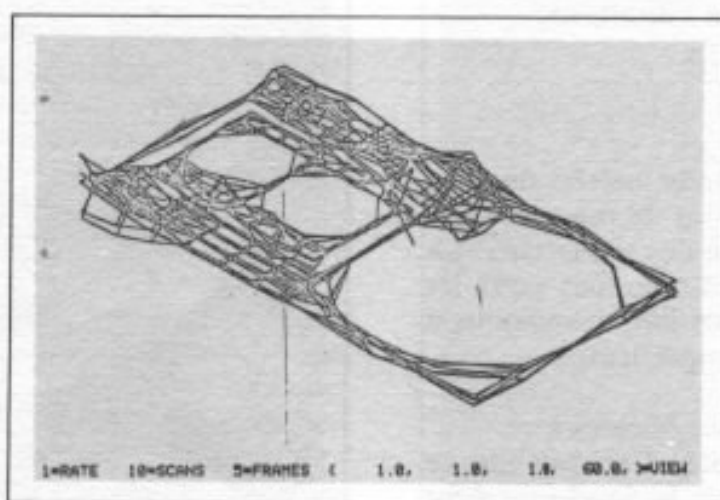


Fig. 6 : Résultat obtenu par simulation du comportement vibratoire du baffle.

signal électrique les déplacements de membranes. Le stimulus employé et la réponse de transducteurs présentant soit un bon comportement soit une non linéarité sont illustrés en figure 2.

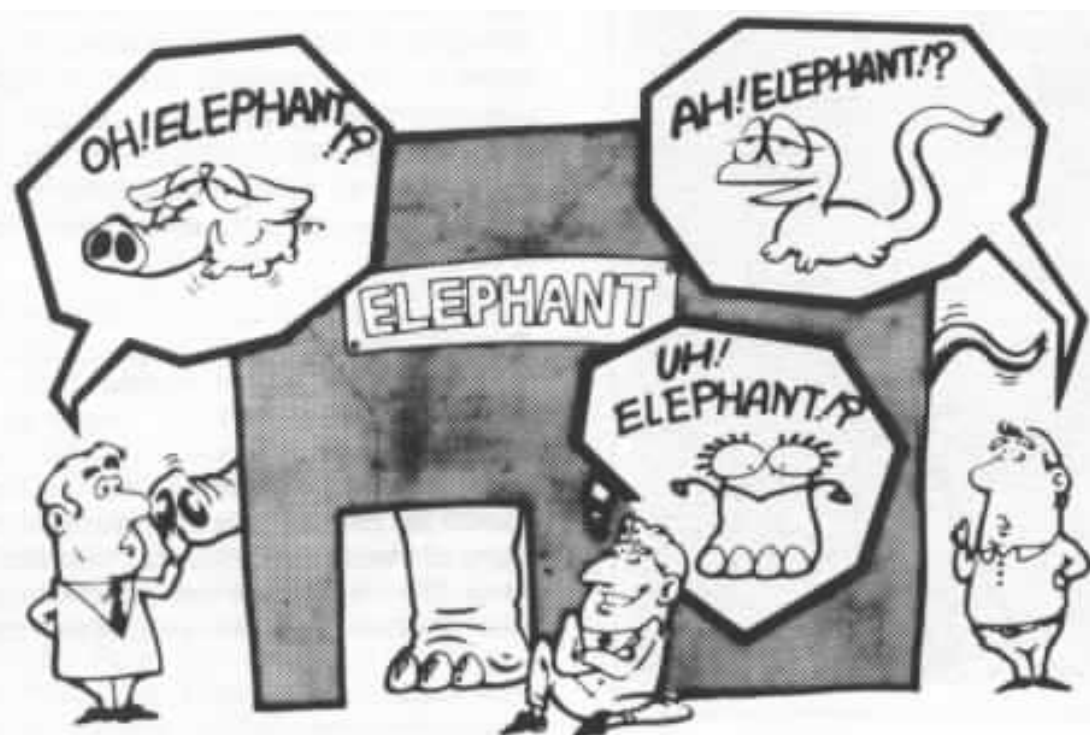
b) - Analyse de la réponse impulsionnelle

Celle-ci a été étudiée sous divers aspects tant en repère à deux dimensions qu'à trois dimensions. La figure 3 illustre un type de réponse obtenue. Par ailleurs, la diaphonie entre chacun des transducteurs d'une même enceinte acoustique a été analysée en détail sur le plan mécanique. Les spectres tri-dimensionnels sont riches d'enseignements, ainsi en figure 4 pour deux types de baffles, on notera une très grande amélioration de l'amortissement de l'onde. A signaler que le résultat obtenu dans le second cas est tout à fait remarquable. Pour mieux en apprécier la valeur, nous publions la réponse équivalente d'une bonne enceinte acoustique soumise à la même analyse. On remarquera que les différen-

ces obtenues sont de l'ordre d'une centaine de milli secondes ce qui est considérable lorsque l'on pense que l'oreille est capable de discrimination de l'ordre de dix milli secondes. Sur le plan perceptif, un tel type de distorsion est considéré comme un flou, un voile, il est difficile de discerner l'impact original du son effectivement transmis. Par ailleurs, le contenu harmonique profondément modifié dans le temps.

c) - Amortissement des parois de l'enceinte

Le développement d'aggloméré présentant un facteur d'amortissement supérieur a été guidé par l'analyse des spectres tri-dimensionnels dans la zone bas médium figure 5, zone où les colorations sont particulièrement sensibles. A noter que l'énergie transmise est pratiquement concentrée dans cette bande de fréquence lors d'écoutes de messages musicaux. Les études de modélisation et de simulations du baffle ont été poussées très loin, la figure 6 en donne un exemple.



L'analyse tridimensionnelle et les amplificateurs chez Technics

Le monde de l'Audio évolue. Nous réalisons que tout n'est aussi simple qu'on aurait pu le penser il y a quelques années, que le nombre des paramètres est considérable et qu'il est désormais nécessaire de pousser très loin les investigations, si l'on veut comprendre un peu mieux ce qui se passe.

Les outils, les techniques ne manquent pas. Ils existent et ont été développés pour l'aérospatiale, l'industrie... Les possibilités de l'analyse numérique où mémorisation, corrélation, traitement sont illimitées, peuvent grandement aider à mieux cerner pourquoi un préamplificateur ou un amplificateur sonne mieux qu'un autre. Car il ne faut pas se leurrer, la qualité du son ne dépend pas seulement de la linéarité de la réponse en fréquence ou d'un taux de distorsion mesuré sur la

base d'un signal qui n'a rien à voir avec le caractère aléatoire de la musique.

Henning Muller de Bruel et Kjaer a fait un remarquable papier en février dernier à l'A.E.S. Il s'intitulait « Multidimensional Audio », la conclusion de l'auteur est qu'il est nécessaire d'avoir recours à un plus grand nombre de dimensions dans l'analyse des phénomènes. Le « dessin de l'éléphant » illustre bien des choses.

L'oreille est le système perceptif qui lui est associé, n'est pas un simple instrument de mesure, comme un analyseur de spectre, un distorsiomètre ou autre. Toutes les données sont analysées simultanément, comparées, corrélées avec une quantité de données incroyables accumulées, stockées en mémoire au fur et à mesure de l'expérience du sujet.

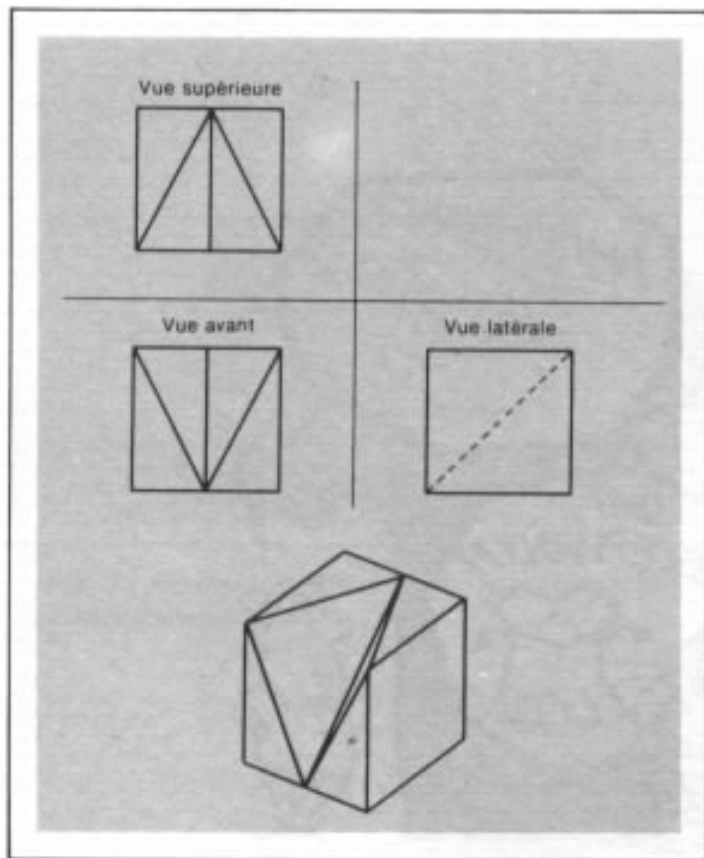


Fig 1 - Projections et représentations tridimensionnelles d'un solide

Compte tenu de cela, il serait bien utopique de croire que trois ou quatre chiffres suffisent pour déterminer un matériel.

L'article dans ce numéro « La mécanique s'entend... ! » ne fait que le confirmer.

De nombreuses firmes l'on compris. Cet automne à l'Audio Fair de Tokyo les spectres d'analyse tridimensionnels foisonnaient. Il ne faudrait tout de même pas qu'ils ne deviennent un argument de marketing comme l'on été certaines mesures il y a encore peu d'années.

Nous n'en sommes qu'au b a ba, les méthodes d'investigation existent, encore faut-il les exploiter aussi rationnellement que possible pour que dans un avenir proche elles deviennent représentatives de ce que l'on entend.

Pour bien montrer ce désir de progresser dans la connaissance de l'Audio nous parlerons dans ce numéro des nouvelles méthodes d'évaluation des amplificateurs proposés par la firme Technics portant sur deux aspects : l'analyse tridimensionnelle et l'analyse de la distorsion entrée / sortie.

ANALYSE 3 DA TRIDIMENSIONNELLE

a - Pourquoi trois dimensions : Nous l'avons dit dans l'introduction, il est nécessaire, voire indispensable, d'analyser simultanément le plus grand nombre de paramètres pour se rapprocher, si l'on peut dire du processus de perception. Une analogie visuelle est donnée en Fig 1 ; chacune des coupes en deux dimensions, est loin d'être représentative du volume en trois dimensions.

Pour les grandeurs couramment utilisées en électroacoustique, cela peut sembler très différent. Toutefois, il n'en est rien. Il suffit de regarder attentivement la Fig 2 pour s'en persuader. La quantité d'informations obtenues en diagramme tridimensionnel est infiniment plus grande et permet une meilleure interprétation. Naturellement, le choix des spectres est quasiment illimité suivant les coordonnées choisies pour chacun des trois axes, leur sens de variation...

b - L'application et l'évaluation du comportement des amplificateurs :

Pour ces investigations, le choix des ingénieurs de Technics a été celui indiqué en Fig 3. Selon ce schéma, un amplificateur de 100 W aux caractéristiques quasiment idéales donnerait le diagramme de la Fig 4. Ce n'est malheureusement qu'un cas idéal. En pratique une telle analyse conduit à un spectre comme celui représenté en Fig 5. Obtenir ce spectre pour un amplificateur est bien, encore faut-il l'exploiter. Naturellement on peut y prélever un très grand nombre de données statistiques habituelles, là n'est pas vraiment l'intérêt.

Noter l'interdépendance entre ces diverses données, distorsions, puissance, fréquence est plus riche d'enseignements. Toutefois ce qui

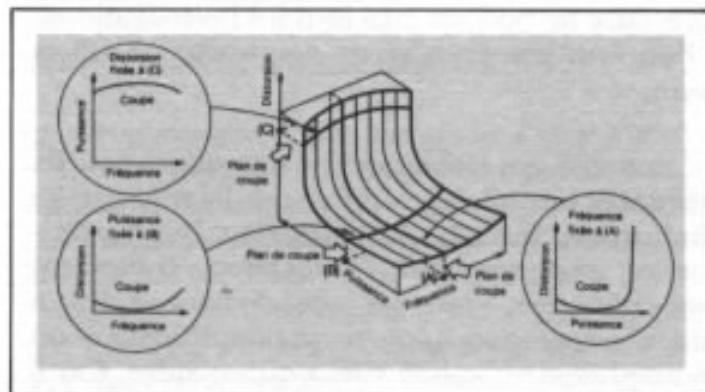


Fig 2 - Représentation des données

demeure extrêmement intéressant c'est « d'entrevoir » les caractéristiques dynamiques. Expliquons-nous.

Le slew rate ou vitesse de balayage rend compte de la possibilité qu'a l'amplificateur de débiter un fort niveau très rapidement. Le comportement de haute fréquence est représentatif. Ainsi pour un taux de distorsion donné, 0,1% par exemple, un amplificateur pourra voir sa puissance chutée lorsque la fréquence croît. Cet amplificateur ne présentera pas de très bonnes caractéristiques dynamiques. Par contre un appareil se comportant suivant la ligne en pointillé (fig. 5) offrira sur ce point de bonne performance.

Le temps de montée, il est lié à l'aptitude que possède un amplificateur à restituer les harmoniques de rang supérieur et donc des fréquences élevées. Il importe toutefois d'améliorer la largeur de bande en prenant compte de la distorsion et le niveau délivrable. Pour cela le spectre tridimensionnel aide à l'anticiper à partir des données statiques. Car il ne faut pas oublier, caractéristiques statiques et caractéristiques dynamiques sont liées, et l'optimisation d'un facteur se fait généralement au détriment d'un ou plusieurs autres. C'est d'ailleurs en cela que l'analyse tridimensionnelle apporte beaucoup pour mieux cerner les liens qui existent entre les divers paramètres et déterminer les corrélation éventuelles.

Précisément au sujet du temps de montée, il y a beaucoup de fausses idées. Ce facteur n'est pas lié directement à la largeur de bande. Seul un système du premier degré (comme réseau LR ou RC) possède une relation simple entre temps de montée et bande passante.

Un amplificateur ne peut en aucun cas être assimilé à un système du 1^{er} ordre. Un signal carré, selon l'analyse de Fourier, pour être très bien reproduit, nécessite environ onze harmoniques de rang impair. Pour un signal de fréquence de 10 kHz, cela implique pour l'harmonique de rang supérieur de 110 KHz.

Toutefois, les choses ne sont pas aussi simples. La raideur du front de montée est comme on l'a dit précédemment liée aux harmoniques de rang élevé, les résidus de distorsion d'intermodulation qui peuvent être de rang très élevé peuvent aider à reconstituer le front de montée. Cela est fictif et favorise peut-être le signal carré, lequel a un caractère de régime établi, mais en aucun cas un signal musical qui lui a un caractère aléatoire. De plus, la contre réaction dans un amplificateur

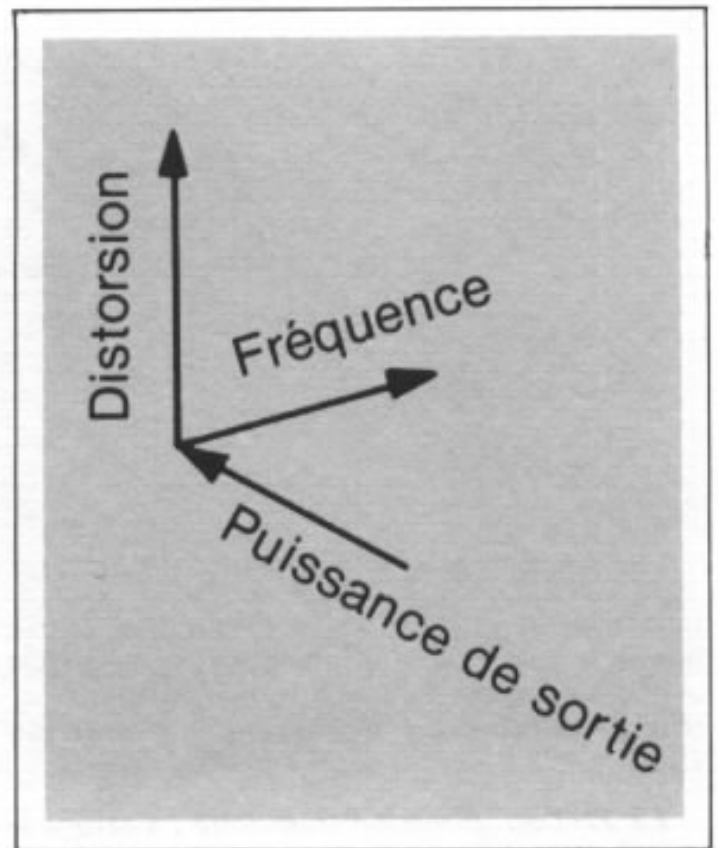


Fig 3 - Référentiel adopté par Technics

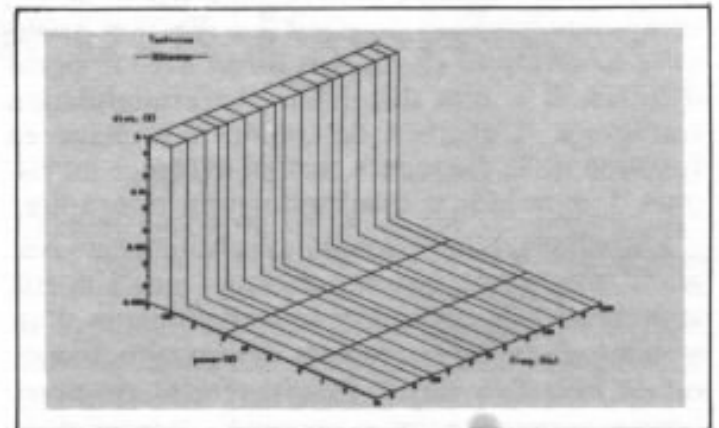


Fig 4 - Caractéristiques d'un amplificateur de 100 w idéal

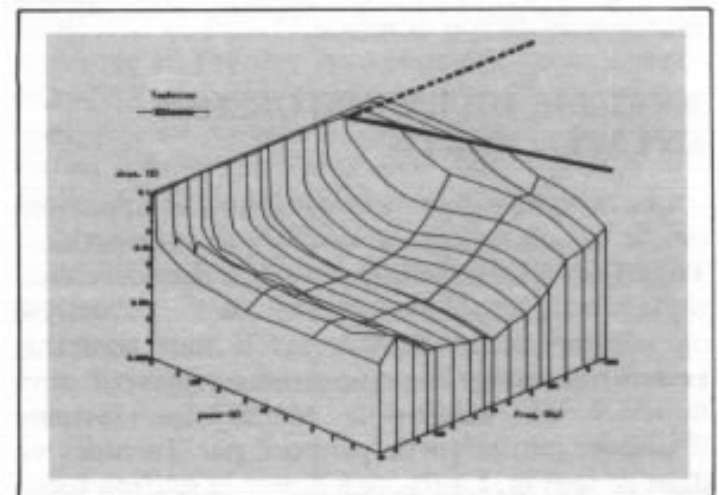


Fig 5 - Caractéristiques d'un amplificateur à faible vitesse de balayage en trait plein et en pointillés pour une vitesse de balayage élevée

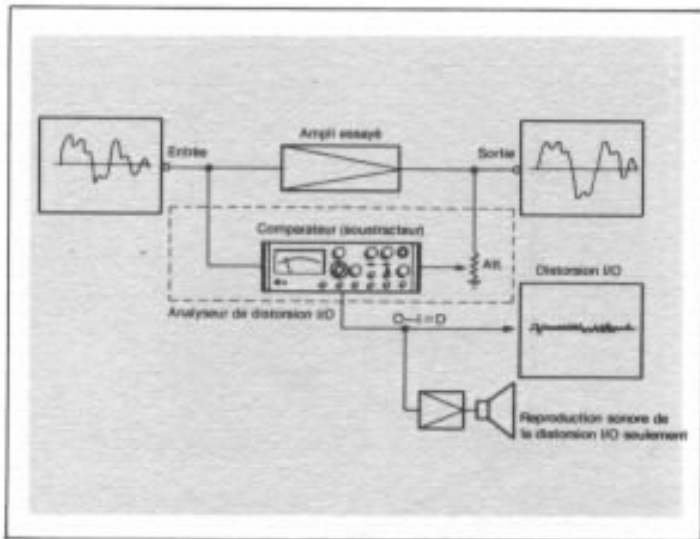


Fig 6 - Schéma bloc de l'analyse entrée / sortie.

intervient, et suivant son taux, élargira plus ou moins la bande, ce qui améliorera peut-être le temps de montée mais prédisposera l'amplificateur à distordre sur des transitoirs de niveau élevé.

La TIM ou distorsion transitoire : Lorsque le signal d'entrée est transitoire et donc riche en composantes de fréquences élevées et que le niveau de ce signal est élevé, une partie de ces composantes seront écrêtées. La réaction appliquée ne sera plus en rapport direct avec le signal d'entrée, il y aura distorsion d'intermodulation transitoire. L'examen des points d'écrêtage en fonction de la fréquence met en évidence les risques d'apparition d'intermodulation transitoire.

L'analyse tridimensionnelle regroupant un très grand nombre de données statiques aide à mieux appréhender le comportement dynamique d'un système. C'est un instrument de travail puissant, car le fait d'envisager simultanément de nombreuses caractéristiques permet d'optimiser l'ensemble et non pas une performance ponctuelle qui n'a plus aucune signification lorsqu'elle est dégagée de son contexte.

ANALYSE DE LA DISTORSION ENTREE / SORTIE

Les investigations tridimensionnelles apportent on l'a vu, un très grand nombre d'informations. Toutefois, elles ne vont pas au delà des caractéristiques statiques, même si elles aident à l'analyse du comportement transitoire. Il faut toutefois pouvoir contrôler le comportement effectif d'un matériel en utilisation réelle. Le système d'analyse entrée/sortie proposé par Technics va dans ce sens là. La figure 6 donne le schéma fonctionnel du système de mesure. Sommairement il consiste en la comparaison entre la forme d'un signal avant et après amplification moyennant

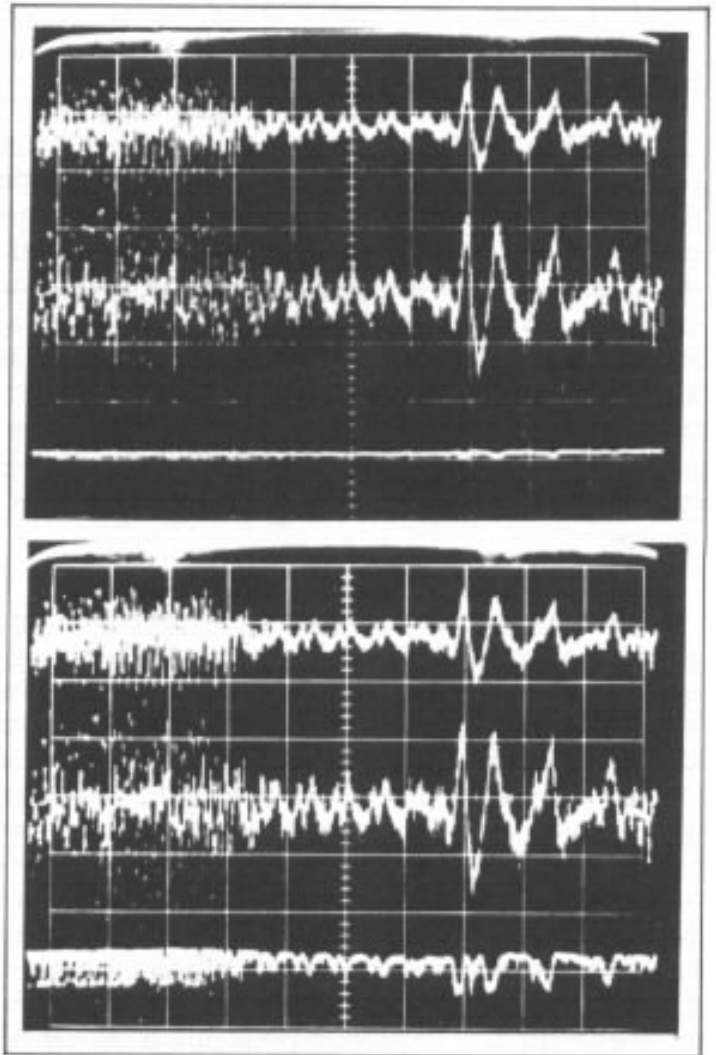
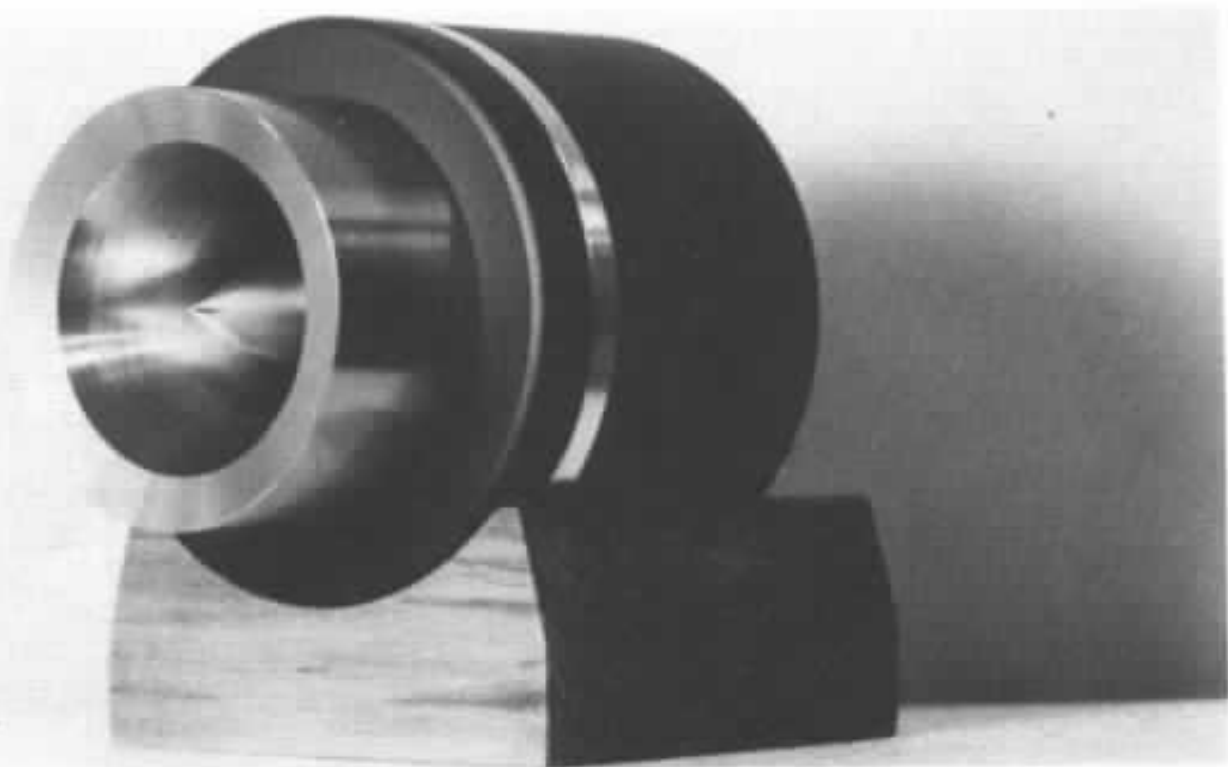


Fig 7 - Oscillogrammes obtenus pour deux amplificateurs (cf texte).

bien naturellement une différence de gain. Le comparateur extrait le signal différence qui n'est autre que la distorsion. A noter que des corrections tant de phase que de réponse sont effectuées, suivant l'amplificateur analysé, pour éviter certaine forme de distorsion qui ne sont pas significative des dommages que peut subir un signal audio comme peuvent l'être la DHT ou l'intermodulation transitoire.

A titre d'exemple, la figure 7 représente les résultats obtenus sur deux amplificateurs, Sur chacun des clichés la trace supérieure constitue le signal d'entrée, la trace centrale le signal de sortie et la trace inférieure le signal différence, représentatif de la distorsion. L'amplificateur correspondant au cliché inférieur possède une forte distorsion harmonique du troisième ordre.

Les nouvelles méthodes de recherche montrent le souci qu'ont certains grands constructeurs à vouloir cerner le rendu sonore d'un amplificateur. Ces dernières années, trop de personnes se sont polarisées sur quelques chiffres. Il est grand temps d'élargir les investigations, les chiffres ont déçus tellement d'oreilles...

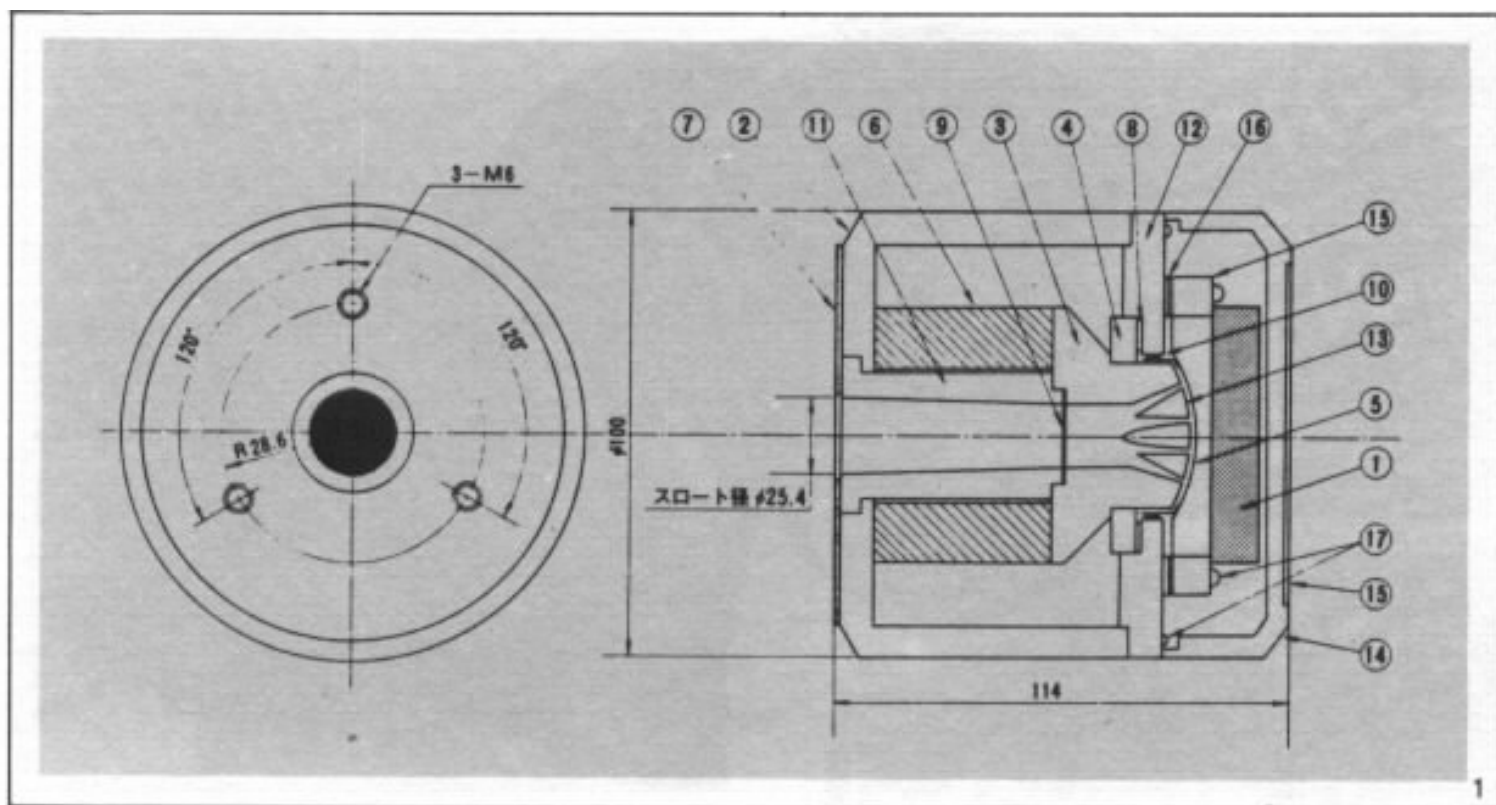


Les haut-parleurs Fostex

Voilà presque 3 ans, Jean HIRAGA décrivait dans la Revue du Son une enceinte à haut rendement : le système ONKEN. La nouveauté résidait dans l'utilisation, jusqu'à cette date mal vue, de chambres à compression dans un système à vocation très haute fidélité. Il faut se souvenir qu'à cette date, l'enceinte haut de gamme traditionnelle utilisait classiquement des haut-parleurs médium et aigu à dôme. Depuis, l'avènement de ce système au rang de référence mythique n° 1 est certainement très instructif. Il enseigne que l'audiophile n'est plus satisfait par plusieurs générations d'enceintes acoustiques dont de nombreux paramètres avaient été négligés : courbes de réponse en puissance, réponse impulsionnelle en puissance (test temps/énergie), irrégularités de réponse mesurables uniquement en temps retardé (courbes tri-dimensionnelles), compressions dynamiques, etc... Il est intéressant de noter que généralement les enceintes présentant ces défauts, sont du type à bas rendement. Cette simple constatation permet-elle de penser que manque de dynamique et faible rendement énergétique sont liés ? La relation n'étant pas techniquement évidente, il y a là un magnifique terrain d'empoigne pour critiques subjectifs. Pour

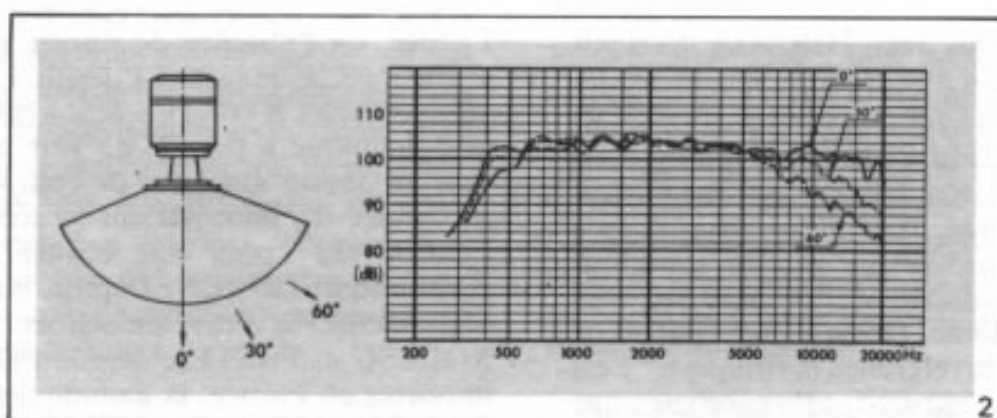
l'heure, en l'absence de norme de mesure, une étude statistique faite à l'oreille vaudrait bien un banc complet B et K. Ce renouveau en faveur de la dynamique a permis de voir apparaître, surtout au Japon une série de composants gardant la facture du haut-parleur professionnel tout en l'améliorant pour une écoute plus musicale. Ainsi naquit ONKEN. Depuis, les Japonais, ont maintenant le luxe du choix entre GOTO, KOETSU et FOSTEX depuis 1978. Récemment importée en France, la gamme des haut-parleurs FOSTEX comprend entre autres, un médium à compression associé à un pavillon en bois ainsi qu'un tweeter d'apparence très similaire au ONKEN. L'idée d'utiliser ces composants avec l'enceinte grave ONKEN vient tout naturellement vu la quasi impossibilité de se procurer les haut-parleurs d'origine pour l'instant. Les plus propices, à cet usage, sont le moteur médium D 252, le tweeter à compression T 925 et le pavillon en teck massif H 320.

Le compresseur médium D 252 est équipé d'une membrane aluminium de 38 mm pour une section de bouche de 1 pouce (25,4 mm) la figure montre ce transducteur de face et en coupe.

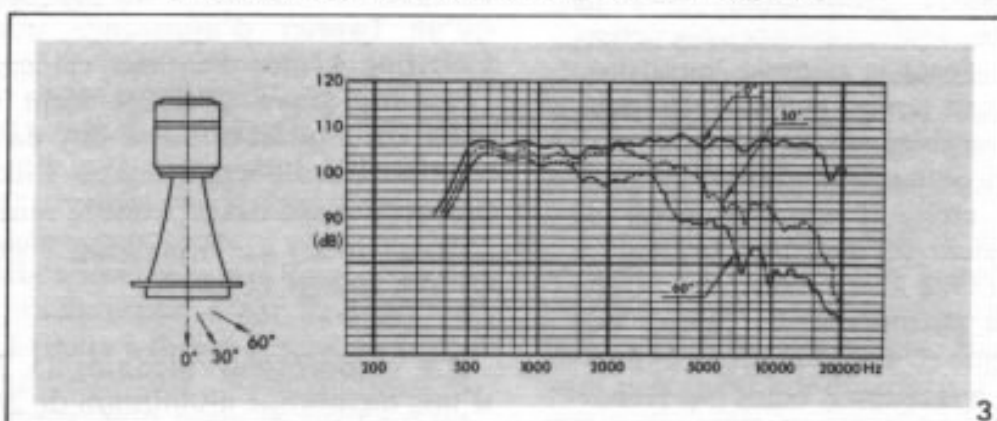


On peut ainsi voir le nombre et le type de gorges de compression adopté par FOSTEX. Le rendement est de 104 dB pour 1 Watt. La tenue en puissance est de 50 Watts maximum. La cavité arrière est remplie d'une mousse poreuse pour équilibrer les pressions avant/arrière.

La courbe de réponse ainsi que la sonorité varient suivant le type de pavillon utilisé. Outre les qualités musicales d'un pavillon en bois massif, les graphes 2 à 5 montrent l'avantage du pavillon radial sur les pavillons classiques (trompe métal + lentille acoustique) en matière de directivité horizontale :



Pavillon radial en teck massif coupant à 320 Hz :



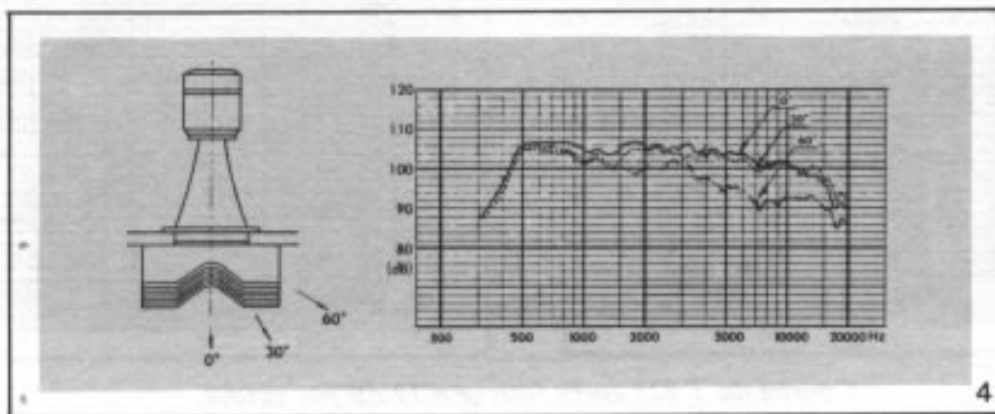
Trompe exponentielle en métal coupant à 850 Hz sans lentille acoustique.

FOSTEX fabrique trois pavillons de type radial en bois. Deux modèles, l'un en multiplis sapin, l'autre en teck massif coupant à 320 Hz (H 320 et H 325). Le dernier de la gamme, en teck, coupe à 420 Hz (H 420).

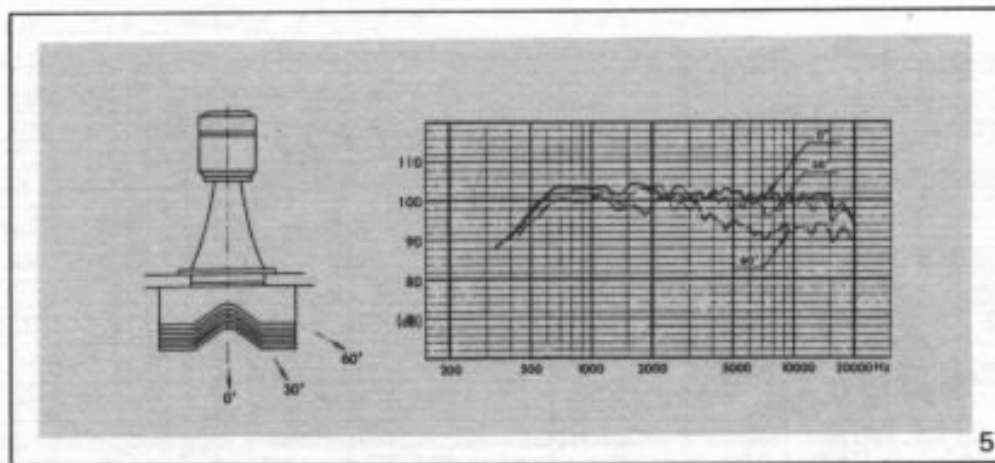
Une fois posé sur sa petite cale en bois, le tweeter T 925 FOSTEX prend alors un air de proche cousin du modèle ONKEN. De fait, il s'agit comme ce dernier, d'un tweeter à compression de type radiateur annulaire. Le rendement est de 106 dB/1 W/1 m.

La puissance admissible est de 50 Watts une fois le tweeter monté avec son filtre. Les courbes de la figure 6 rendent compte des courbes obtenues après filtrage à 6 dB par octave, pour un bon respect de la phase. Celles des graphes 7 et 8 correspondent à 12 dB par octave.

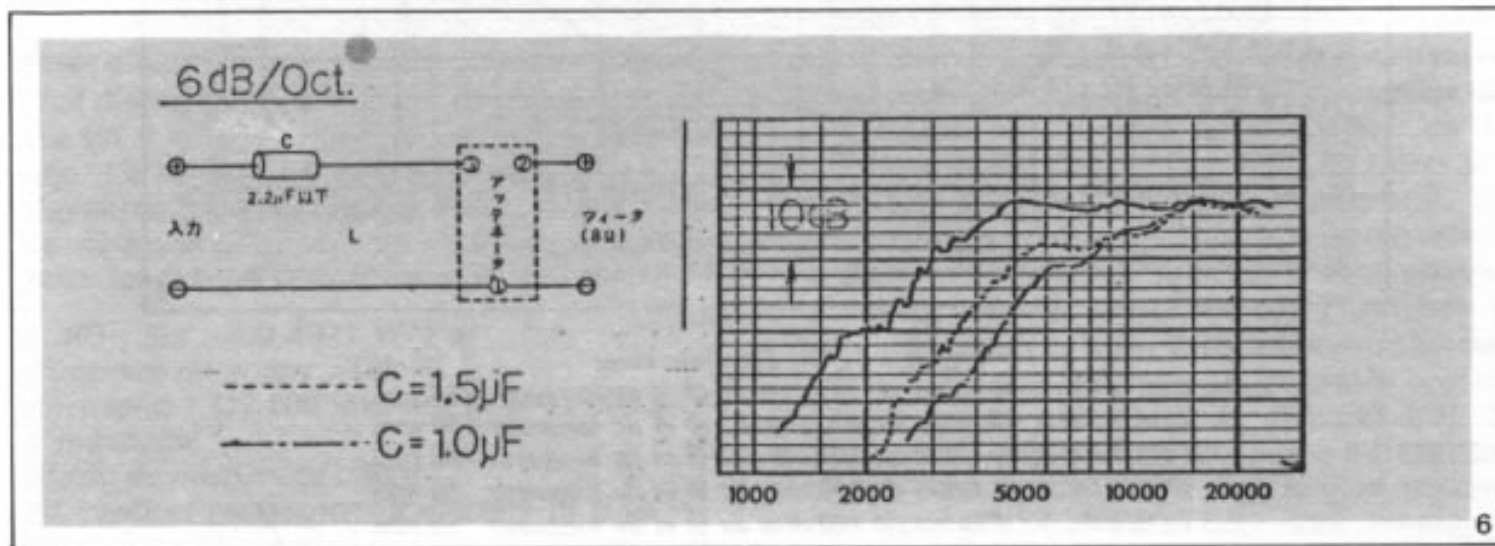
L'enceinte grave ONKEN ayant été étudiée pour le modèle ALTEC 416-8, il paraît peu recommandé d'utiliser tout autre haut-parleur en lieu et place de l'Altec. Toutefois, pour ceux qui voudraient réaliser un système complet à base



Trompe exponentielle en métal coupant à 850 Hz avec lentille acoustique.

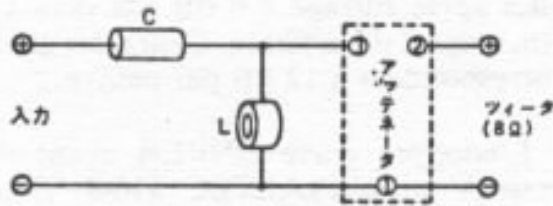


Trompe exponentielle en métal coupant à 1250 Hz avec lentille acoustique

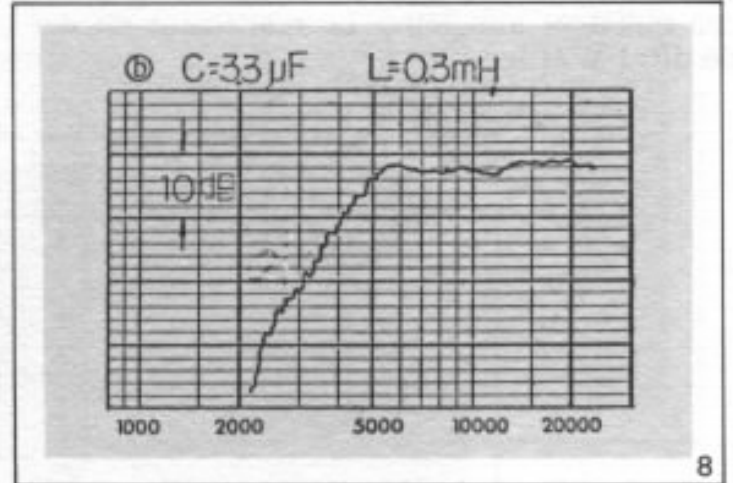
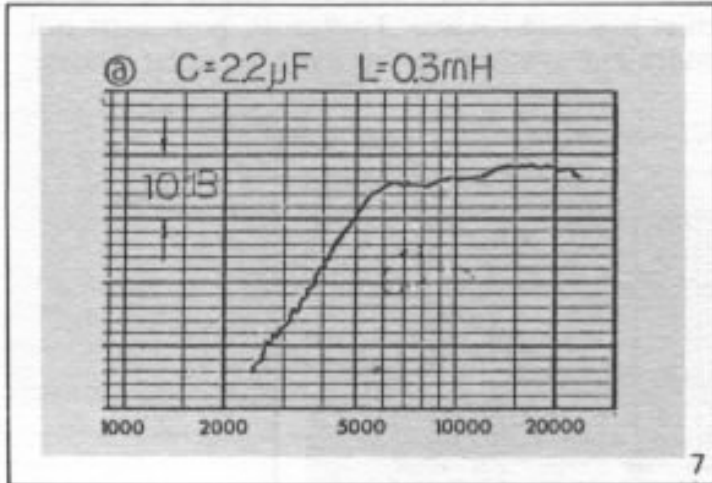


Courbe propre du T925, puis en pointillé, filtré par 1,5 MF et 1 MF.

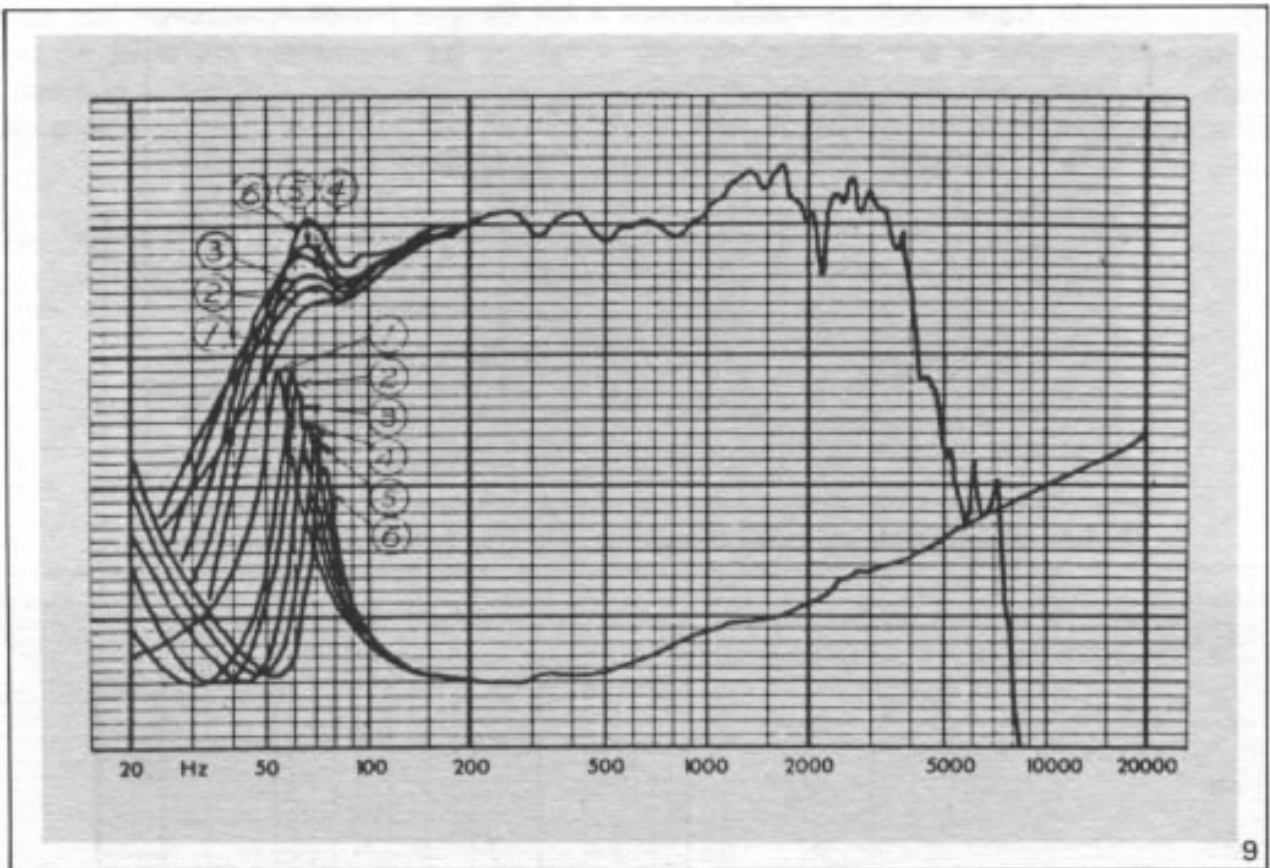
12 dB / Oct.



クロスオーバー 周波数	12 dB/Oct.	
	C (μF)	L (mH)
5,000Hz	3.3	0.3
7,000Hz	2.2	0.3
10,000Hz	1.5	0.18

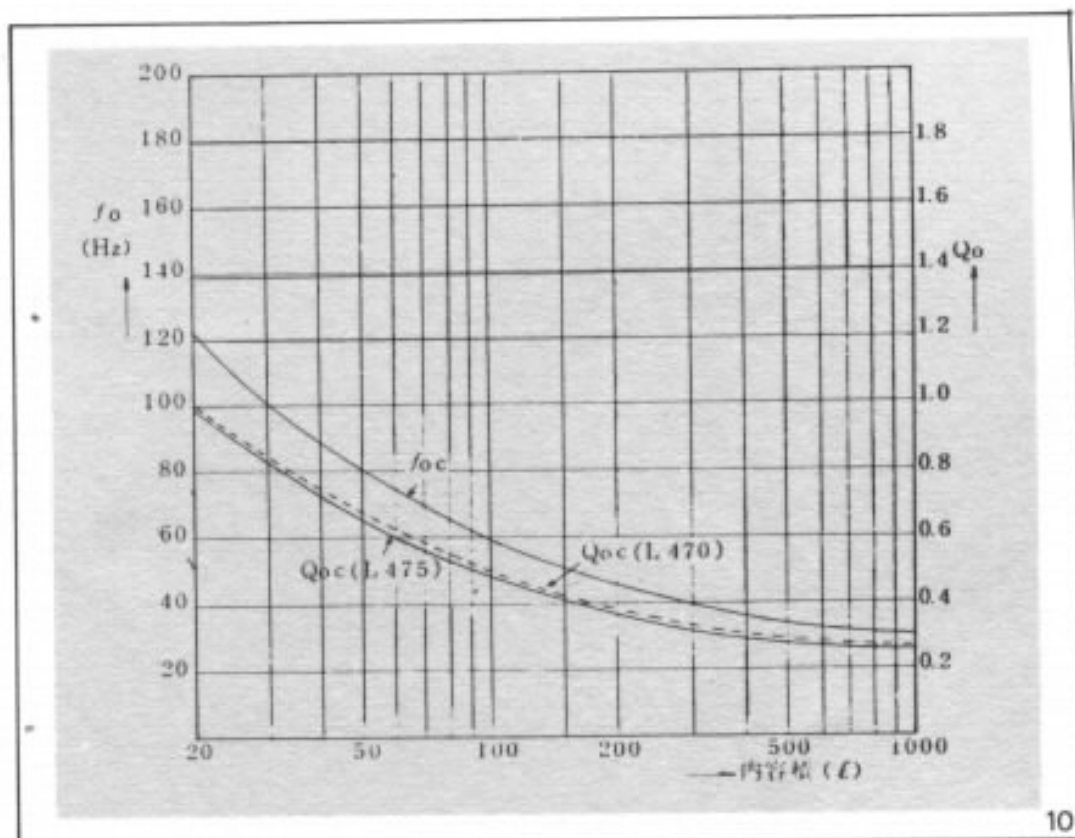


● Courbe du T 925 après filtrage à 12 dB par octave.



- COURBE 1 : Enceinte close
- COURBE 2 : 2 tubes de 100 mm de ϕ et de longueur 250 mm
- COURBE 3 : 2 tubes de 100 mm de ϕ et de longueur 150 mm
- COURBE 4 : 3 tubes de 100 mm de ϕ et de longueur 150 mm
- COURBE 5 : 2 tubes de 100 mm de ϕ et de longueur 50 mm
- COURBE 6 : 3 tubes de 100 mm de ϕ et de longueur 50 mm

Enceinte 150 l équipée du L 475



10

FOSTEX, il existe une gamme de boomers dont le chef de file est le L 475 de 40 cm. Pour l'heure FOSTEX fournit une étude sur un bass-reflex de 150 dm³. Le graphe de la fig. 9 permet de voir l'incidence de différents volumes d'évent sur la courbe de réponse et d'impédance.

Une étude sur le fonctionnement d'une enceinte ONKEN serait souhaitable dans ces colonnes. Il est en effet curieux de savoir que l'étude théorique de ce type d'enceinte à filtre acoustique passe-bas (déjà réalisé par JENSEN, voilà plus de 20 ans) n'a pas fait à ce jour l'objet d'une publication. Une telle étude permettrait d'extrapoler l'enceinte ONKEN à divers haut-parleurs dont le modèle FOSTEX L 475. Celui-ci est réalisé à l'Américaine, c'est-à-dire, châssis massif en fonte d'aluminium et puissant aimant Alnico. Ce type d'aimant est préférable aux alliages en ferite car il minimise les pertes de champ magnétique. La suspension est en gaufrage plastifié et s'apparente ainsi à celle de l'Altec 416. Ce type de suspension permet un meilleur compromis entre rendement et fréquence de résonance.

L 475 : Spl : 100 dB/1 W/1 m

Puissance de pointe : 150 W

Flux total : 312 000 maxwell pour 11 000 gauss d'induction

Masse de membrane : 90 g

BL product (puissance du moteur) 19 N/A

$Q_o = 0,2$

Q_o est la mesure du facteur d'amortissement en

circuit ouvert.

$$Q_o = f_o / \Delta f$$

f_o étant la fréquence de résonance et Δf la largeur du maxima d'impédance mesurée jusqu'à - 3 dB, le graphe 10 montre la relation du facteur Q avec le volume d'enceinte et la fréquence de coupure basse du système.

Enfin, on trouve dans les filtres FOSTEX, un étage RC pour abaisser le maxima d'impédance. Les filtres ont tous des selfs à air et des capacités au papier métal. Deux modèles (N 310, N320) utilisent des auto-transfos pour réglage minutieux du médium et de l'aigu ; Ils agissent par bond de 1 dB sur une plage de 20 dB (+ ou - 10 dB). Ces filtres tout comme ceux d'ONKEN, coupent à raison de 12 dB par octave. Ce type de filtre bien que remplissant parfaitement sa tâche n'est toutefois pas au dernier cri en matière de sophistication : la complexité anglaise en la matière est bien connue, aux USA les filtres alignés en temps se développent rapidement, les techniques de « lissage » de courbe de réponse et d'étages adaptateurs d'impédance sont maintenant monnaie courante (Kef ou JC Fourrière). Il est ainsi curieux de noter le décalage entre la relative simplicité de filtrage des systèmes professionnels et la complexité du domaine hifi. Il serait souhaitable qu'une émulation à l'anglaise vienne aider à peaufiner le réglage d'un système de type ONKEN/FOSTEX. Les amateurs anglais se limitent, pour l'heure à une étude mille fois répétée de l'association B 200 + T 27.