

Comprendre le son des tubes

Le retour des tubes en audio peut surprendre certains et pourrait être considéré comme un effet de mode. En fait, les avantages en audio de cette technologie abandonnée il y a vingt ans sont parfaitement explicables et mesurables pour peu qu'on prenne le problème par le bon bout.

LE MYSTERE DES TUBES

Les tubes ont pratiquement disparu en audio, dans les années 70, quand les transistors ont permis de réaliser des circuits moins volumineux, moins lourds, moins gourmands en énergie, moins chers et offrant des performances mesurées supérieures. Tant d'avantages avaient entraîné une évolution qui semblait irréversible. Il y eut bien quelques amateurs (ils ne s'appelaient pas encore audiophiles) et quelques joueurs de guitare électrique pour continuer à préférer les électroniques à tubes, mais ils faisaient figure d'obscurantistes tournés vers le passé.

Depuis, la situation s'est retournée, la supériorité subjective des électroniques à tubes s'est imposée comme une évidence pour de nombreux amateurs de haute-fidélité et les tubes font un retour fracassant dans l'audio haut de gamme. Pourtant, si cette supériorité est admise par beaucoup, peu sont capables d'en fournir une explication rationnelle. Les hypothèses souvent avancées (la fonction de transfert des tubes, leur impédance d'entrée, les spectres de distortion, les tensions élevées etc.) n'ont jamais été confirmées par des mesures ou par des moyens d'améliorer les électroniques à transistors.

La contradiction entre les mesures et les résultats des tests subjectifs (elle ne concerne pas uniquement les tubes) suggère un «mystère des tubes». Elucider ce mystère, c'est répondre à deux questions : pourquoi

les mesures ne savent-elles pas rendre compte des qualités subjectives des circuits audio ? Quel est le phénomène physique ou électrique qui rend les tubes meilleurs ? En réponse à ces questions, cet article vous propose deux explications qui sont confirmées par des mesures et des expériences subjectives.

LE PROBLEME DES MESURES

Si la mesure et l'écoute se contredisent, c'est qu'au moins une des deux se trompe. Les adversaires des audiophiles ne se sont pas privés de proclamer que des résultats de tests subjectifs contraires à la mesure ne peuvent être dus qu'à des erreurs expérimentales ou à l'imagination de ceux qui écoutent. Pourtant les évidences sonores sont là et il faut bien admettre que la mesure se trompe.

Comprendre pourquoi la mesure se trompe n'est pas simple. La mesure des distorsions (linéaires et non-linéaires) utilise des signaux de test sinusoïdaux en application des théories mathématiques de Fourier. Ces méthodes d'analyse des signaux et des systèmes sont utilisées avec tant de succès dans de si nombreux domaines de l'électronique et de la physique qu'il est difficile d'admettre qu'il en aille différemment en audio. Les raisons d'un tel particularisme existent pourtant : les signaux audio combinent une très large bande (16 Hz- 16 kHz représentent une bande gigantesque de 10 octaves, équivalente à une bande incluant toutes les

ondes radio - HF, VHF, UHF - et une bonne partie des bandes radar) et une très grande dynamique (92 dB pour le standard CD).

Ces deux particularités font que les mesures actuelles ne sont pas adaptées dès lors qu'on recherche une qualité extrême en audio. Bien sûr, les théories mathématiques de Fourier - qui sont rigoureuses - restent parfaitement valables. En revanche, les approximations faites pour les appliquer sont prises en défaut. En effet, les théories de Fourier ne s'appliquent en toute rigueur qu'à des systèmes parfaitement linéaires ; comme les systèmes audio ne remplissent pas cette condition, il est habituel de faire l'hypothèse que leur fonction de transfert est suffisamment linéaire pour que la valeur de la non-linéarité mesurée avec des signaux sinusoïdaux soit fiable. Comme, en audio, on mesure ainsi des non-linéarités faibles qui semblent valider a posteriori l'hypothèse de départ, tout le monde est satisfait de ces mesures, ... enfin, tant qu'on ne prend pas la peine d'écouter !

L'erreur de cette approche métrologique qui semble absolument rigoureuse est de chercher à caractériser la fonction de transfert, sans prendre la peine de vérifier qu'elle est unique. Une analyse rigoureuse du comportement des circuits électroniques révèle que la fonction de transfert n'est pas fixe pour de nombreuses raisons. Celle-ci dépend de nombreux paramètres physiques qui varient ; en particulier, beaucoup de ces paramètres dépendent du signal traité. La fonction de transfert dépend donc du signal. Cette dépendance faisant parfois intervenir des constantes de temps électriques ou thermiques, on peut même dire que la fonction de transfert se «souvient» du signal passé.

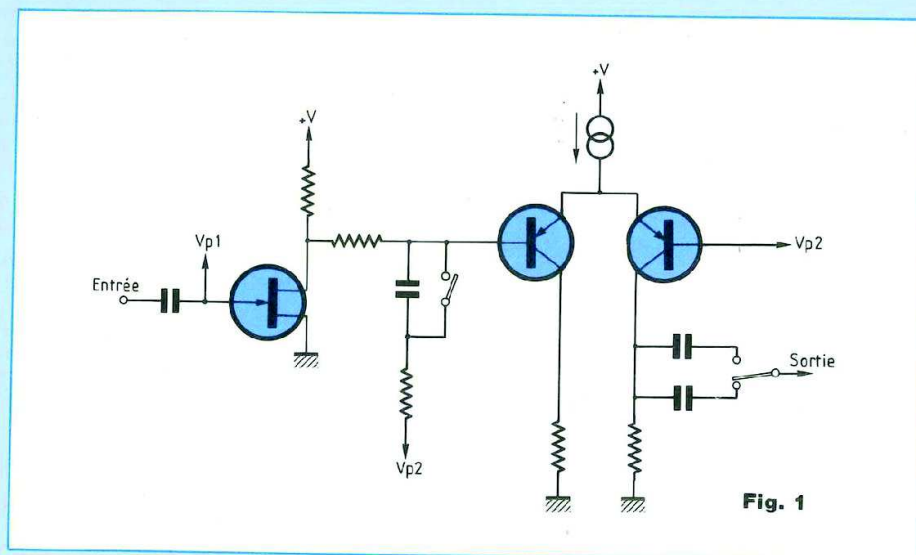


Fig. 1

Bien sûr, l'amplitude de ces phénomènes reste habituellement limitée et ils sont difficiles à mettre en évidence. Mais ils sont suffisants pour invalider les mesures traditionnelles car celles-ci, faites avec des signaux particuliers, ne savent pas révéler des phénomènes pouvant intervenir avec d'autres types de signaux. On peut considérer que les mesures classiques de distorsion sont des mesures statiques : elles ne prennent en compte qu'une fonction de transfert particulière, celle qui correspond à un signal sinusoïdal stable en amplitude et en fréquence ; elles ne permettent pas de caractériser le fonctionnement dynamique pour tous les signaux. Le mystère des tubes ne traduit finalement qu'une limite des mesures de distorsion habituelles !

LA PREUVE PAR LA MESURE

Pour prouver que cette analyse est plus qu'une hypothèse gratuite, il est possible de montrer que deux circuits peuvent avoir exactement le même

comportement pour des signaux sinusoïdaux (la même bande passante et le même spectre de distorsion) et avoir un comportement différent pour d'autres signaux, en particulier pour des signaux audio. Cela veut aussi dire qu'ils ont un son différent !

Pour obtenir un comportement identique, la meilleure solution est d'utiliser les mêmes composants dans un circuit pouvant commuter entre deux fonctionnements différents. Le schéma de la figure 1 permet ainsi de réaliser un circuit pouvant, par commutation, basculer entre les deux schémas de la figure 2, en intercalant un filtre ou un atténuateur entre les deux étages.

Les spectres de la figure 3 montrent que la position de l'interrupteur n'a pas d'influence sur la distorsion mesurée avec des sinusoïdes. De même, des figures de Lissajous (figure 4) montrant la distorsion absolue (la différence entre le signal de sortie atténué et le signal d'entrée) en fonction du signal d'entrée prouvent la grande similitude de fonctionnement dans toute la bande audio, pour des

Comprendre le son des tubes

signaux sinusoïdaux.

En revanche, pour un signal modulé en amplitude à très basse fréquence, on constate des divergences dans le fonctionnement (figure 5). Cette différence est due aux non-linéarités générées dans le premier étage. Ces non-linéarités contiennent des signaux correspondant à la modulation du signal (c'est le principe utilisé en radio pour la détection de la modulation d'amplitude), et donc à très basse fréquence. Dans un cas, ces signaux basse fréquence sont atténués entre les deux étages comme le signal de test ; dans l'autre cas, ils sont moins atténués et un peu déphasés avant d'intermoduler fortement avec le signal de test dans le second étage. Bien sûr, dans les circuits audio courants, les fluctuations de la fonction de transfert n'ont pas une telle amplitude ; sinon, il y a longtemps que ces phénomènes de modulation de la fonction de transfert auraient été décrits. Ce circuit est une caricature qui exagère des phénomènes réels pour les rendre évidents avec une mesure aussi simpliste que celle utilisée pour obtenir les figures de Lissajous.

L'utilisation de ce circuit avec des signaux audio est révélatrice. Pour de fortes amplitudes d'entrée, la mesure donne des figures de Lissajous (figure 6) montrant des comportements notablement différents ; en intercalant ce circuit dans une chaîne performante entre le lecteur de CD et le préamplificateur, on constate que les sons correspondants sont extrêmement différents. Pour la position atténuateur, le son est acceptable ; pour la position filtre, le son est affreusement distordu, inacceptable.

Pour des signaux d'amplitude plus faible (obtenus en intercalant un atténuateur de 20 dB en entrée), les figures de Lissajous ne sont plus

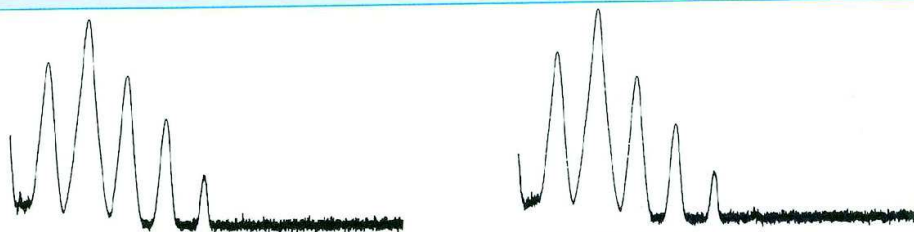
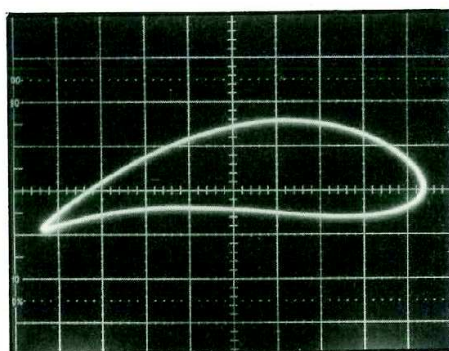
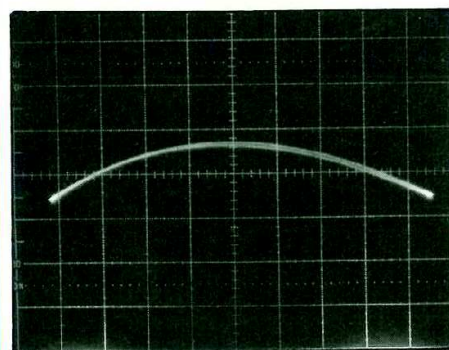
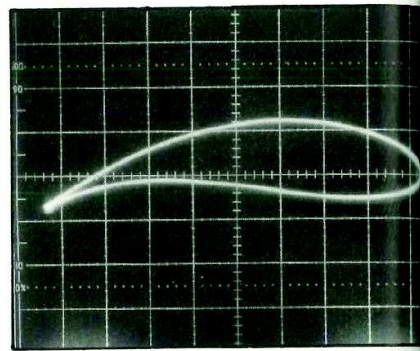


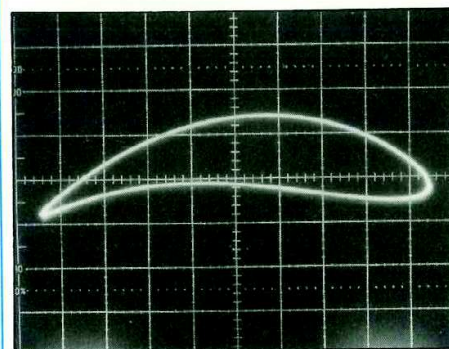
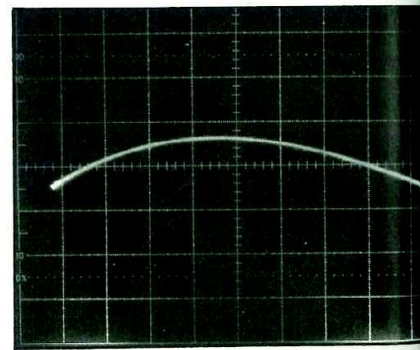
Fig. 3 : Les deux spectres de distortion pour $V_{out} = 3V$ (à gauche avec l'atténuateur, à droite avec le filtre).



10 kHz



1 kHz



100 Hz

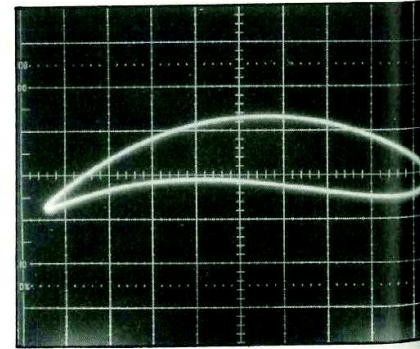


Fig. 4 : La distortion absolue pour $V_{out} = 3V$ (à gauche avec l'atténuateur, à droite avec le filtre) visualisée en figures de Lissajous pour trois fréquences.

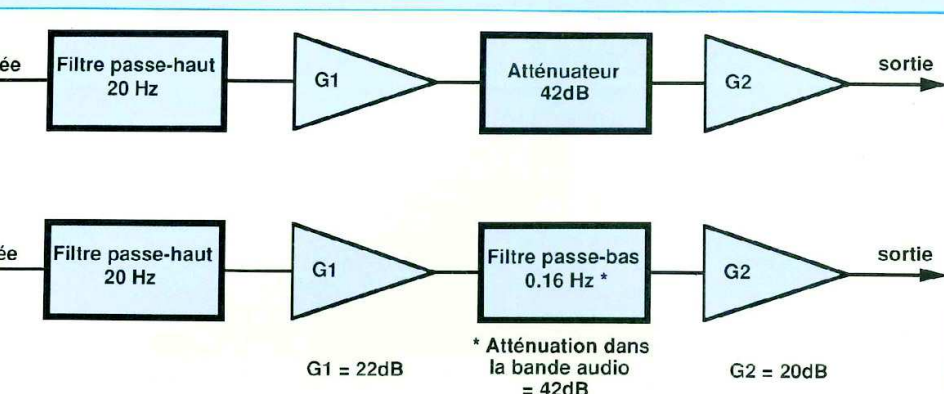


Fig. 2 : Les deux schémas correspondant au circuit de la figure 1.

capables de révéler la moindre différence. En revanche, l'écoute est encore nettement différente : pour la position atténuateur, les effets du circuit sont difficiles à distinguer ; pour la position filtre, le son est distordu, et la distorsion entendue a le son caractéristique des électroniques à transistors.

Ces expérimentations prouvent, sans appel, que les mesures de distorsion habituelles ne sont pas valables pour mesurer les circuits audio de qualité élevée. Elles expliquent pourquoi beaucoup de circuits conçus et mesurés avec des signaux sinusoïdaux ne «sonnent» pas bien, pourquoi l'empirisme de ceux qui écoutent leurs oreilles permet d'obtenir un meilleur son que l'illusoire rationalité de ceux qui ne croient qu'aux distorsiomètres.

LE SECRET DES TUBES

Comprendre le secret des tubes revient donc à comprendre pourquoi les circuits à tubes ont une fonction de transfert plus stable que celle des circuits à transistors. Les deux principales raisons sont liées aux composants eux-mêmes et aux circuits qui les utilisent.

De base, un tube présente des caractéristiques plus stables ; les phénomènes physiques susceptibles de faire évoluer ses caractéristiques sont :

- la variation de température de la cathode,
- le vieillissement et l'appauvrissement de la cathode,
- une dégradation du vide,
- une modification de la géométrie des électrodes (dilatation ou effet microphonique).

Ces phénomènes sont maîtrisables ou ont une grande constante de temps.

Au contraire, les caractéristiques d'un

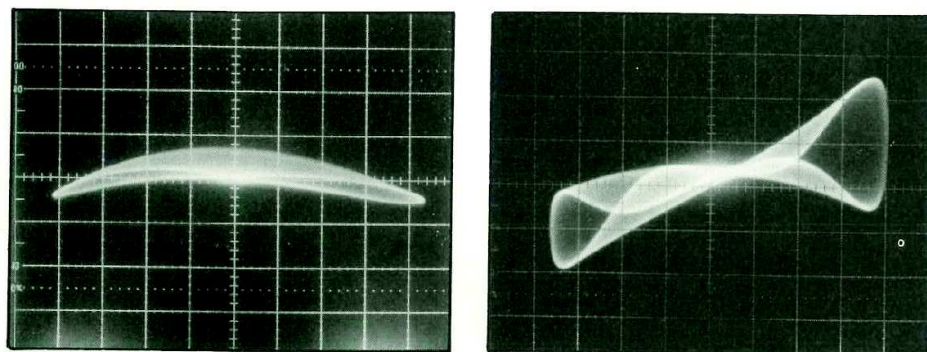


Fig. 5 : La distorsion absolue pour un signal sinusoïdal modulé en amplitude, visualisée en figures de Lissajous (à gauche avec l'atténuateur, à droite avec le filtre).

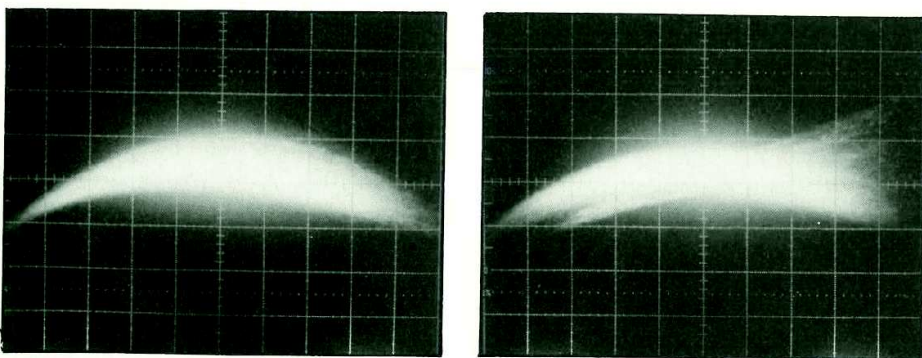


Fig. 6 : La distorsion absolue pour un signal musical, visualisée en figures de Lissajous (à gauche avec l'atténuateur, à droite avec le filtre). Pour les figures 4 à 6, les échelles sont les mêmes.

Comprendre le son des tubes

transistor sont moins stables ; elles dépendent fortement de la température de la jonction base-émetteur. Celle-ci est très proche (pour obtenir l'effet transistor) de la jonction base-collecteur où se dissipe la puissance absorbée par le transistor. Cette contre-réaction thermique ne se manifeste guère pour des signaux sinusoïdaux, mais les amplitudes ($2,2 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$) et les constantes de temps (quelques ms) mises en jeu montrent l'intérêt de sa prise en compte pour des circuits de précision dans la bande audio.

Le second point qui avantage les tubes concerne les circuits. Les circuits à tube utilisent des transformateurs qui éliminent des signaux parasites sub-audio résultant de la détection des variations d'amplitude ou de dérive thermique. Au contraire, les transistors amplifient les signaux continus.

De plus, les transistors autorisent des taux de contre-réaction élevés. Ceux-ci semblent accroître la linéarité mesurée par les distorsiomètres mais l'expérience montre qu'ils dégradent la qualité du son. Cette dégradation est liée à une plus grande instabilité de la fonction de transfert ; en effet, les circuits correspondants ont une mauvaise linéarité en boucle ouverte et un grand gain. Cela favorise la génération de signaux parasites sub-audio importants, résultant de la détection des variations d'amplitude ou de dérive thermique. Ces signaux sont combattus par la contre-réaction ; cela engendre une intermodulation entre ces signaux parasites et le signal audio, qui se traduit par une modulation de la fonction de transfert. Pour les signaux sinusoïdaux utilisés dans les mesures traditionnelles, tout est parfaitement stable et des taux de contre-réaction élevés semblent donner des circuits presque parfaits (pour la mesure !).

APPLICATION

L'identification de ces phénomènes permet de les combattre. Il est possible de réaliser des circuits à transistors dans lesquels la puissance dissipée dans les transistors critiques est stabilisée. Les résultats sonores de ces circuits sont excellents ; on obtient une qualité de son que beaucoup croyaient impossible avec des transistors. Malheureusement, de tels circuits restent compliqués et sont encore difficiles à mettre en œuvre.

En revanche, l'association harmonieuse des tubes et des transistors obtenue empiriquement dans un amplificateur - qui sera bientôt décrit dans les pages de cette revue et qui présente un rapport qualité/prix difficile à surpasser aujourd'hui - est une bonne application des théories exposées ci-dessus. Son schéma associe une amplification en tension réalisée avec des tubes facilement disponibles et d'un coût raisonnable à une amplification en courant fournie par un montage utilisant des MOSFETs en classe A. Les excellentes qualités subjectives ainsi obtenues sont faciles à comprendre.

L'amplificateur de tension présente une fonction de transfert stable grâce aux caractéristiques stables de ses tubes et grâce à son taux de contre-réaction modéré. L'amplificateur de courant utilise des MOSFETs ; la raison de leur supériorité subjective sur les bipolaires est principalement due à une meilleure stabilité thermique (cela leur évite également les phénomènes de seconde avalanche). La grande supériorité subjective de la classe A pour les circuits à transistors résulte d'une dissipation plus constante pour des signaux dont l'amplitude varie (comme les signaux audio). Il est connu que pour des signaux de test (d'amplitude fixe), la

mesure ne révèle guère d'avantage à l'utilisation de la classe A dans les circuits à transistors.

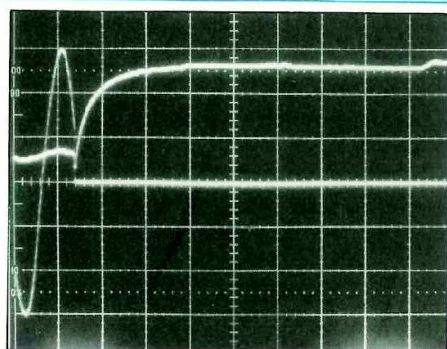
Enfin, la boucle de contre-réaction ne prend pas en compte l'étage de sortie. Cette disposition originale, qui se traduit par des chiffres de distorsion (mesurés avec des signaux sinusoïdaux) plus élevés, permet d'éviter que le fonctionnement de la boucle de contre-réaction ne soit perturbé par des signaux parasites générés dans l'étage de sortie soumis à de fortes dissipations. Ces signaux sont moins gênants pour l'oreille que les effets de leur atténuation par la boucle de contre-réaction.

QUAND LA MESURE CONFIRME L'ECOUTE

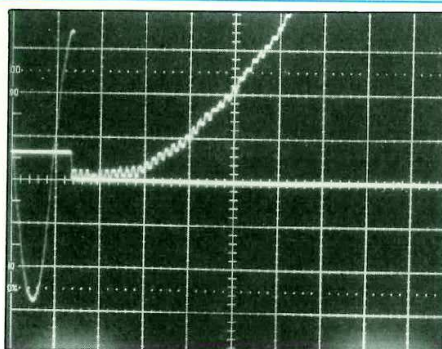
La mesure des fluctuations de la fonction de transfert est difficile, car elles peuvent être produites par des phénomènes divers et avec des signaux différents. Toutefois, si la mesure de mémoire proposée par MM. Pierre Johannet et Philippe Guuic dans le n° 32 de L'Audiophile ne permet pas de rendre directement compte de tous les phénomènes de fluctuation de la fonction de transfert, elle semble déjà bien définir la tendance à la stabilité ou à l'instabilité de la fonction de transfert d'un montage. C'est pourquoi elle donne une bien meilleure indication sur la musicalité d'un amplificateur que les mesures traditionnelles.

La figure 7 montre les résultats obtenus avec une mesure de mémoire utilisant le même principe, pour différents amplificateurs :

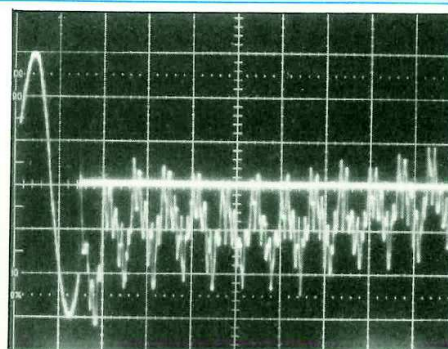
- un amplificateur traditionnel à transistors ayant de très bonnes mesures de distorsion, mais ayant le vilain son des transistors,
- un amplificateur à tubes triodes



Amplificateur traditionnel à transistors. 1 mV par div. pour le signal de mémoire.



Excellent amplificateur à tubes. 2 mV par div. pour le signal de mémoire.



Amplificateur à transistors stabilisé. 50 μ V par div. pour le signal de mémoire.

Fig. 7 : Signaux de mémoire obtenus en court-circuitant un signal sinusoïdal à l'entrée de différents amplificateurs. Le signal d'entrée, visible à gauche avant la commutation, est un signal de $\pm 6V$ à 60 Hz sur une charge de 4 Ω . L'échelle horizontale est de 10 ms par division.

ayant une excellente musicalité malgré de très mauvais chiffres de distortion,

- un amplificateur à transistors expérimental conçu pour que la fonction de transfert ait la plus grande stabilité possible et qui sonne mieux que l'am-

plificateur à tubes triodes.

Les résultats de cette mesure confirment le classement des tests subjectifs.

CONCLUSION

Le son des tubes est une réalité tout à

fait rationnelle et mesurable. Mais cette réalité ne peut pas être observée avec des signaux sinusoïdaux, car souvent fonction de transfert varie, bien fol est qui s'y fie.

Héphaïstos

ABONNEZ-VOUS A

Led

Je désire m'abonner à LED (6 n^{os} par an)

(Ecrire en CAPITALES, S.V.P.)

FRANCE, BELGIQUE, SUISSE, LUXEMBOURG : 125 F AUTRES* : 175 F

NOM

PRENOM

N° RUE

CODE POSTAL VILLE

* Pour les expéditions « par avion » à l'étranger, ajoutez 50 F au montant de votre abonnement.

Ci-joint mon règlement par : chèque bancaire ☐

C.C.P. ☐

mandat ☐

Le premier numéro que je désire recevoir est : N°

A retourner accompagné de votre règlement à :

Service Abonnements, EDITIONS PERIODES 1, boulevard Ney 75018 PARIS - Tél. : 44.65.80.88 poste 7315