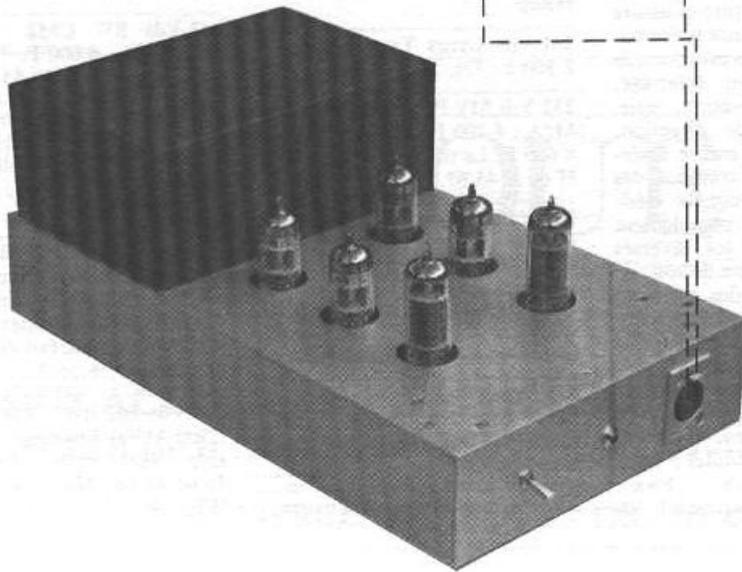


- Réalisation personnelle -



page 108
de votre
Audiophile
n° 3



AMPLI POUR CASQUE ELECTROSTATIQUE

D

*ans notre n° 3,
nous publions une réalisation particulièrement originale,
celle d'un casque électrostatique.
Cet article a suscité de nombreuses demandes,
principalement à propos du transformateur de modulation.
Toutefois la solution ultime consiste à s'en passer...
en faisant appel à un amplificateur
spécialement dédié au casque,
ses remarquables performances le méritant pleinement.
Voici donc la description détaillée d'un amplificateur
pour casque électrostatique.
A tube, bien naturellement ;
cette technologie étant parfaitement adaptée
à ce type d'application.*

Introduction

Dans l'article du n°3 de l'Audiophile « Un casque électrostatique » j'observais que l'adaptateur à transformateurs et l'amplificateur de puissance pouvaient être avantageusement remplacés par un amplificateur spécialement adapté de type OTL, attaquant directement les cellules électrostatiques. Ce choix apporte un gain très appréciable en performances objectives et subjectives, un transformateur, même de haute qualité, n'ayant pas les performances d'un amplificateur.

Après avoir examiné quelques amplis OTL à tubes et à transistors, j'aborderai la réalisation de l'un d'entre eux, cet amplificateur pourra être adapté à d'autres casques ou à des réalisations d'amateurs.

Les sources de modulation des transducteurs électrostatiques

Pour délivrer un niveau acoustique acceptable, les cellules des casques électrostatiques exigent des tensions de modulation éle-

vées, dépassant parfois 200 V efficaces, sous haute impédance toutefois, ce qui implique l'usage d'un élément adaptateur élévateur, la tension de modulation fournie par l'amplificateur ou le préamplificateur étant insuffisante. Dans la plupart des cas, il est fait appel à un transformateur de couplage à secondaire symétrique, parfois on adopte une solution plus onéreuse, mais aussi plus performante, utilisant un amplificateur travaillant sous haute tension.

Cette utilisation contraignante d'un élément supplémentaire, comportant de plus une source de haute tension connectée au

secteur pour polariser le diaphragme, est certainement la cause de la diffusion limitée des casques et haut-parleurs électrostatiques.

Transformateurs de couplage pour casques électrostatiques

L'intérêt de l'adaptation par transformateur réside dans sa simplicité de mise en œuvre et un prix de revient en principe assez bas. Le résultat est très satisfaisant si les transformateurs sont de haute qualité. J'ai adopté cette solution dans l'article du n°3 de l'Audiophile : « Réalisation personnelle : un casque électrostatique ».

L'adaptation par transformateur présente l'inconvénient de provoquer une altération du signal, minime il est vrai. La distorsion affectant le grave et l'extrême grave en particulier, de plus la bande passante est limitée à ses extrémités. D'autre part, la capacité parasite et l'inductance de fuite du transformateur forment, avec la capacité de la cellule électrostatique, un circuit oscillant dont les résonances affectent la courbe de réponse.

Autre inconvénient, aux conséquences non négligeables, c'est le risque que fait courir aux diaphragmes toute surmodulation; en effet un amplificateur de 50 W sur 8 ohms peut fournir 20 V efficaces. Si le bouton de volume est au maximum, une manipulation imprudente d'un connecteur ou une surcharge quelconque de l'amplificateur pourra donc produire une tension maximum de 1000 V efficaces à la sortie d'un transformateur élévateur de rapport 1/50, il y a alors risque d'amorçage et de perforation du diaphragme par un arc électrique, c'est le phénomène de "flashage", les électrodes faisant office d'éclateurs.

L'utilisation d'un circuit de protection à l'entrée du transfo faisant appel, en général, à une

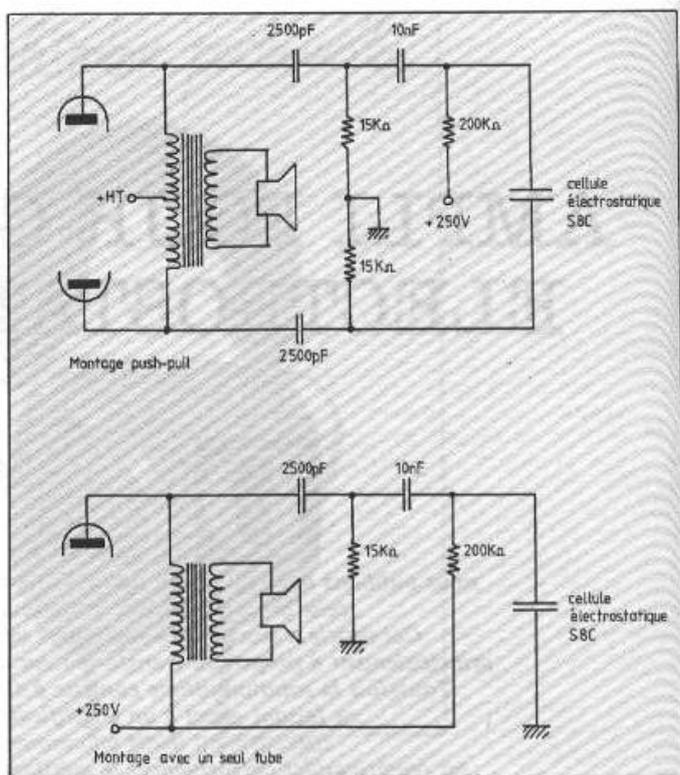


Fig 1 : Couplage direct entre les plaques des tubes de sortie d'un amplificateur de puissance et une cellule électrostatique. En haut, cas d'un montage push-pull, en bas montage à un seul tube. Schéma proposé par Audax pour alimenter les cellules SSC à la fin des années 50.

thermistance à coefficient de température positif (CTP) placée en série, ne protège pas efficacement la cellule car son action n'est pas instantanée. On obtient une protection plus efficace en utilisant comme CTP un filament de tungstène d'une ampoule à incandescence. Par exemple, une ampoule de 12 V 250 mA peut faire 5 Ω de résistance à froid et 50 Ω à chaud. Il faut remarquer que ce circuit de protection travaillera alors en compresseur de dynamique, avec une constance de temps non négligeable, le filament ayant une certaine inertie thermique. Des tweeters électrodynamiques sont parfois protégés des surintensités par ce procédé que les

audiophiles peuvent juger un peu barbare.

Dans les cas extrêmes de surmodulation, il peut y avoir une mise en court-circuit des enroulements du transformateur si l'isolation du fil est insuffisante ou le bobinage pas assez soigné, d'où l'obligation d'employer des transformateurs de qualité pour obtenir performances et fiabilité.

Tout ceci explique la réputation assez bien fondée de fragilité des casques électrostatiques. La meilleure solution pour améliorer la fiabilité consiste, à mon sens, à augmenter la robustesse de la cellule de manière à ce qu'elle puisse supporter de hauts niveaux de modulation sans risque d'amorçage.

Il faut ajouter que les amplis à transistors n'apprécient pas toujours ces adaptateurs à transformateurs, leurs circuits de protection peuvent se déclencher à la moindre surcharge. La cellule électrostatique étant un condensateur, son impédance diminue avec la fréquence, au-dessus de 20 kHz la charge de l'ampli peut se réduire à 2 ou 3 Ω ... Ce problème est particulièrement sensible avec les haut-parleurs car leur capacité dépasse souvent 1000 pF. L'adjonction de résistances en série avec les électrodes permet de limiter la surcharge et d'introduire une fréquence de coupure haute et ainsi de stabiliser l'impédance à une valeur tolérable par l'amplificateur.

Amplificateurs pour casques électrostatiques

Ils ont pour but d'élever la tension de modulation en sortie du préampli à un niveau acceptable pour les cellules électrostatiques, ces amplificateurs ont donc un gain en tension très élevé, de plusieurs centaines en général. Du fait de la nécessité de transformer un signal asymétrique bas niveau en signal symétrique très haut niveau leur principe est toujours le même : une entrée bas niveau, un étage déphaseur suivi d'un étage haute tension en classe A avec deux sorties en opposition de phase. Ils peuvent faire appel aux tubes, aux transistors ou à des solutions hybrides : entrée à transistors et sortie à tubes. La source haute tension de polarisation du diaphragme est connectée entre la masse et le diaphragme à travers une résistance de forte valeur.

Les performances sont très bonnes, on peut espérer moins de 1% de distorsion sur toute la bande passante, celle-ci est très étendue dans le grave comme dans l'aigu, mais également, la protection du diaphragme est assurée: en effet l'amplificateur écrête à une tension de sortie très

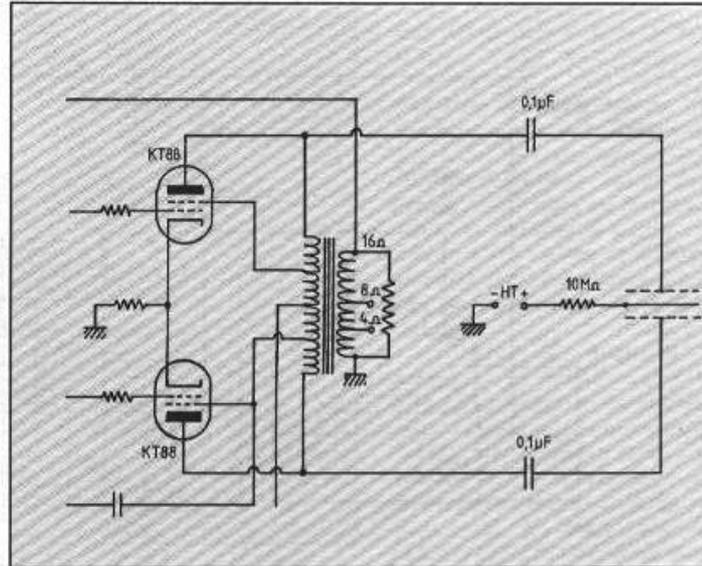


Fig 2 : Exemple d'adaptation d'une cellule électrostatique à un Dynaco Mark III, l'utilisation de condensateurs de liaison est qualitativement peu satisfaisante...

inférieure à la tension d'amorçage des cellules, par exemple, il est impossible d'obtenir 1000 V ou davantage entre les électrodes des cellules si l'amplificateur écrête avec 350 V en sortie...

Le choix d'un amplificateur à couplage direct remédie donc aux défauts de l'adaptateur à transformateurs : limitation des performances et risque d'amorçage dans la cellule. Autre avantage non négligeable, l'amplificateur de casque peut avoir un gain suffisant lui permettant d'être relié directement au préamplificateur en se passant de l'amplificateur de puissance.

Un amplificateur à tubes ou à transistors n'a finalement que l'inconvénient d'être plus complexe et coûteux qu'un adaptateur à transformateurs.

Les amplificateurs à tubes

Un couplage direct entre les plaques des tubes de sortie d'un amplificateur de puissance et des cellules électrostatiques est possible si la tension de modulation à

ce niveau est suffisante, c'est le cas pour les tweeters ou les casques. L'idée n'est pas nouvelle, par exemple en 1957 une enceinte acoustique Ducretet et Thomson équipée d'un tweeter électrostatique utilisait ce procédé. Audax proposait également d'alimenter ces tweeters électrostatiques S 8 C ou S 9 C de la même manière, voir figure 1. Il faut remarquer que les étages de sortie en classe B ne permettent pas un fonctionnement en push-pull de la cellule électrostatique.

La figure 2 donne l'exemple d'une adaptation à un Dynaco Mark III. La liaison aux électrodes de la cellule électrostatique s'effectue par des condensateurs afin d'éviter que le câble de raccordement ne véhicule la tension anodique continue, proche de 500 V, à proximité des oreilles ce qui pourrait présenter un réel danger pour l'utilisateur en cas de détérioration des isolements.

En pratique, ces condensateurs ayant un courant de fuite qui aura tendance à augmenter sous l'effet de la chaleur s'ils

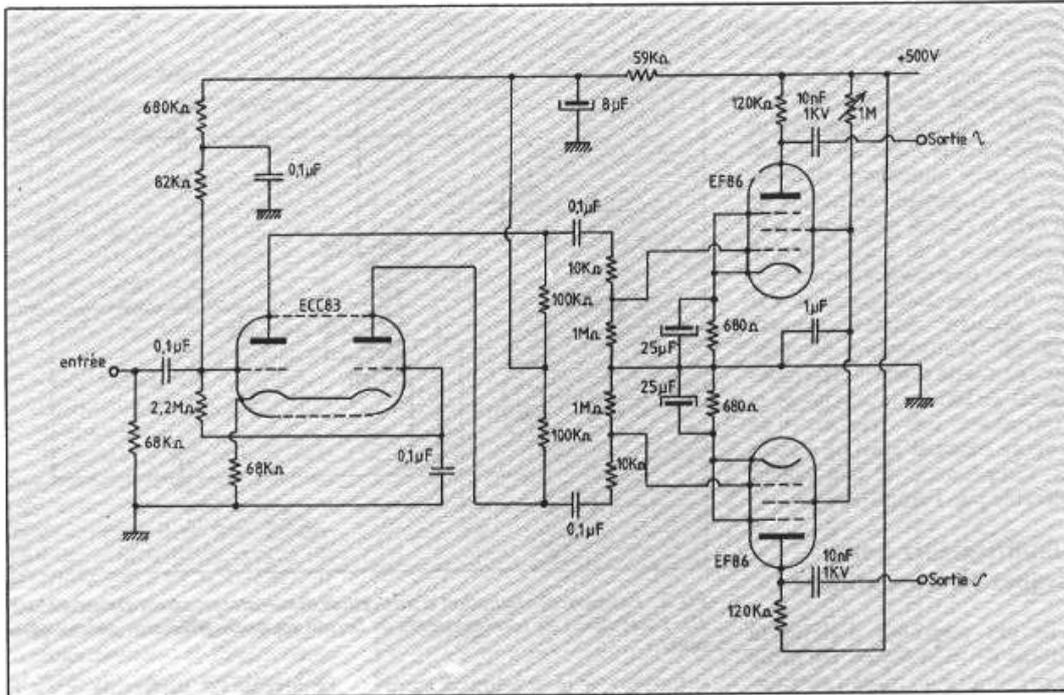


Fig 3 : Amplificateur pour casque proposé par P. Harvey en 71. La réponse en fréquence est limitée dans l'aigu par une impédance de sortie élevée.

sont placés à proximité des tubes de sortie, on finit donc par retrouver une tension continue élevée proche de la tension de plaque sur les électrodes de la cellule. La conséquence étant une diminution du champ électrique entre les électrodes et le diaphragme et, si celui-ci est polarisé positivement, du rendement acoustique. Par exemple si la tension anodique est de 480 V et la polarisation du diaphragme de 750 V, la différence de tension ne sera plus que de 270 V. Pour cette raison, certaines réalisations comportant un condensateur de liaison aux électrodes utilisent une polarisation négative du diaphragme, le but étant de conserver une valeur minimale au champ électrique tout en voulant assurer une relative protection pour l'utilisateur.

Le choix de ce condensateur est très critique, ceci concerne sa valeur, qui limite la réponse dans

le grave, et son isolation mais aussi sa qualité qui doit être excellente car il est en liaison avec la cellule électrostatique qui est aussi un condensateur. Il peut arriver de rencontrer des condensateurs presque aussi « musicaux » que des tweeters électrostatiques avec la distorsion en plus ! On donnera la préférence aux condensateurs à courant de fuite très faible, peu sensibles à la chaleur, ce qui élimine d'office la plupart des modèles au papier, seuls les condensateurs à diélectrique plastique de très haute qualité conviendront.

Enfin, des tubes de puissance du genre KT 88 ne sont pas nécessaires pour alimenter des cellules de casque qui se contentent d'une fraction de watt, il est donc préférable qu'un amplificateur à tubes pour casque électrostatique soit spécialement étudié.

Le circuit de la figure 3 a été proposé dans le numéro de novembre 1971 du magazine anglais Wireless World dans le cadre d'un article de P. Harvey « Electrostatic Headphones design » traitant de la réalisation d'un casque électrostatique très simplifié. Une ECC 83, utilisée en déphaseur de Schmitt, attaque une paire de pentodes EF 86 en push-pull. Elle est capable de délivrer un maximum de 400 V efficaces entre les 2 sorties. L'impédance de sortie élevée provoque une atténuation des aigus car, en supposant que la charge constituée par la cellule électrostatique et le cordon de liaison soit de 150 pF, avec la résistance d'anode de 120 kΩ, la fréquence de coupure se situe à 5 kHz... On remarquera les sorties par condensateurs 10 nF/1000 V.

Dans le numéro de Janvier 1972 de Wireless World, J. Hal-

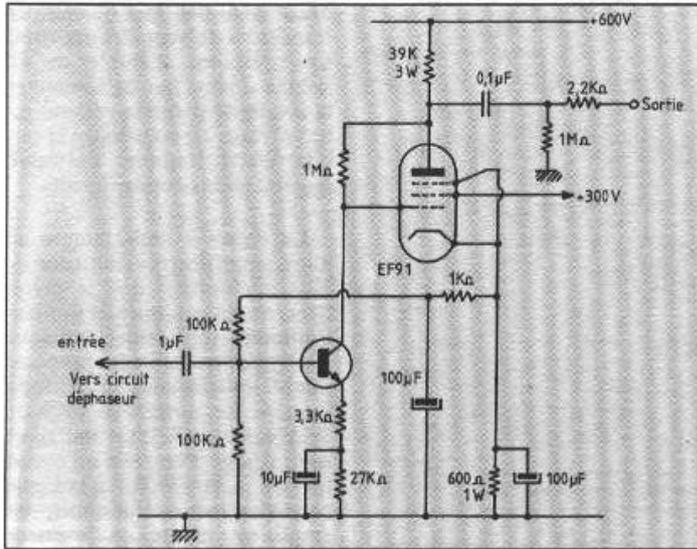


Fig 4 : Schéma proposé Par J. Halliday en 72, une seule moitié de l'étage de sortie push-pull est représentée.

liday (!) proposait une version hybride d'amplificateur dont une moitié de l'étage de sortie push-pull est représenté en figure 4.

Le schéma de la figure 5 a été proposé par Stax il y a environ

vingt ans pour les utilisateurs du casque SRX. Les amplis de casque électrostatique ont toujours figuré au catalogue de la firme japonaise. Quasiment symétrique de l'entrée à la sortie, il utilise 3 tubes double triode par

canal. Il rappelle un peu un circuit publié dans le livre de Jean Hiraga « Les haut-parleurs » dont l'auteur est Charles I. Malme. Cet américain est l'un des premiers à avoir utilisé des électrodes de transducteurs électrostatiques constituées de fines barres métalliques en remplacement des habituelles grilles perforées et à avoir réalisé des amplificateurs à couplage direct, ceci au tout début des années soixante.

La liaison au préampli est directe, le potentiomètre d'entrée qui figurait dans le circuit d'origine a été supprimé. Le circuit déphaseur inspiré de Schmitt est original avec un montage cascade et un couplage transversal, les tubes sont des ECC81/12AT7. La liaison entre le déphaseur/driver et l'étage de sortie s'effectue par condensateurs de 47 nF, les seuls utilisés dans l'ampli.

L'intérêt principal de cet amplificateur concerne son étage final, le circuit de polarisation des doubles triodes 6CG7/6FQ7 faisant appel à une tension négative.

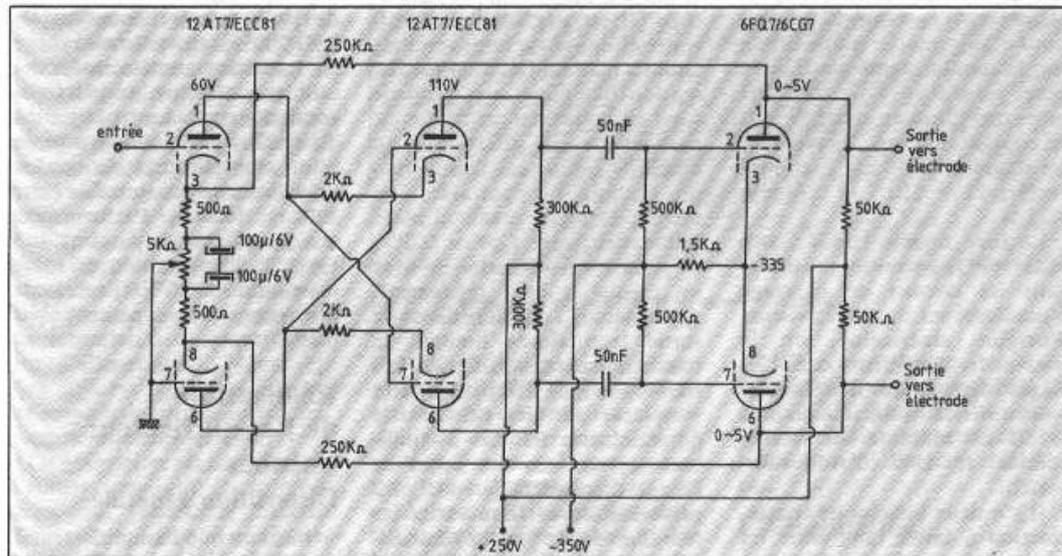


Fig 5 : Schéma proposé par Stax il y a une vingtaine d'années à l'attention des utilisateurs du casque SRX. C'est cette base de schéma qui a été retenue pour notre réalisation.

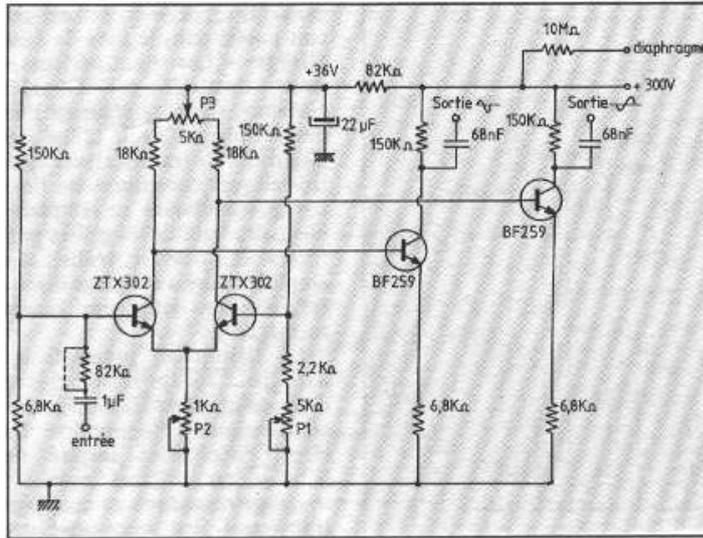


Fig 6 : Amplificateur transistorisé proposé par P. Harvey en 71, il n'est pas sans rappeler les circuits d'amplificateur pour oscilloscope.

tive de -350 V permet d'obtenir, en l'absence de signal, une tension de plaque proche de la masse ce qui autorise une liaison directe, en toute sécurité, vers les électrodes de la cellule en se débarrassant enfin du condensateur de liaison et de tous les problèmes qu'il entraîne. Si les tensions d'alimentation sont correctes, la tension anodique doit se situer entre 0 et ± 5 V. Les tubes travaillent en classe A sous un courant de 5 mA, les résistances d'anode de 50 k Ω sont connectées au + 250 V et dissipent 1,25 W.

Le tube double triode noval 6CG7/6FQ7 a souvent été utilisé dans les circuits de balayage d'oscilloscopes ou de téléviseurs d'origine américaine, on le trouve fréquemment dans les étages déphaseurs d'amplificateurs américains anciens comme le 8B de Marantz ou récents comme le D79 d'Audio-Research.

Il y a deux boucles de contre-réaction à faible taux entre les sorties et les cathodes des tubes d'entrée, cet ampli peut fonctionner sans contre-réaction.

Les amplificateurs transistorisés

Le circuit de la figure 6 a été également proposé par P. Harvey dans son article de novembre 1971 de Wireless World. Son principe rappelle les circuits amplificateurs pour oscilloscope. Il est très simple à construire et donne de bons résultats auditifs mais du fait d'un gain en tension très élevé, son bruit de fond est important, ce défaut est particulièrement gênant sur un ampli de casque car il peut rendre l'écoute insupportable. Son niveau de sortie maximal assez faible, dépassant à peine 100 V, ne permet son utilisation qu'avec un casque à haut rendement. Autre défaut : une impédance de sortie trop élevée limitant la bande passante dans l'aigu. Les transistors ZTX 302 peuvent être remplacés par des BC 107. le potentiomètre P1 sert à équilibrer les tensions des bases de l'étage d'entrée différentiel, P2 permet alors de faire varier les tensions de collecteur des BF 259, l'équilibrage de ces tensions devant s'effectuer finalement à (155 V) l'aide de P3. Cet équil-

brage étant délicat à obtenir, les transistors doivent être appariés. La résistance d'entrée de 82 kohms a pour but de commuter la sensibilité d'entrée en haut ou bas niveau. Le couplage à la cellule électrostatique s'effectue également par condensateurs.

La figure 7 nous montre un autre amplificateur transistorisé, plus performant que le précédent, destiné à alimenter une réalisation plutôt rustique de casque électrostatique. Elle fut proposée par N. Pollock dans un article du numéro de novembre 1979 de Wireless World. Il est fait appel pour l'étage d'entrée à un circuit intégré LM 3900, quadruple amplificateur opérationnel, un ampli est monté en inverseur pour l'étage déphaseur, deux autres sont utilisés en drivers. Ce principe d'utilisation de déphaseur/driver à amplificateurs opérationnels ou transistors se retrouve sur les amplificateurs intégrés aux haut-parleurs électrostatiques Beveridge et Acoustat. Les transistors BU 208, BU 209 ou tout transistor ayant un Vce de 1500 V et une puissance de 10 W peuvent remplacer les 2SD 200 qui travaillent en classe A. La liaison aux électrodes des cellules s'effectue toujours par condensateurs. La polarisation du diaphragme s'obtient à partir d'un multiplicateur de tension dont la sortie est ajustable entre 800 et 1600 V. Performances annoncées : bande passante de 3 Hz à 25 kHz, tension de sortie maximum 500 V efficaces, la distorsion ne dépassant pas 0,1%.

Réalisation de l'amplificateur à tubes

Disposition générale

J'estime que l'amplificateur à tubes convient particulièrement bien aux cellules électrostatiques, qu'il s'agisse de casques ou

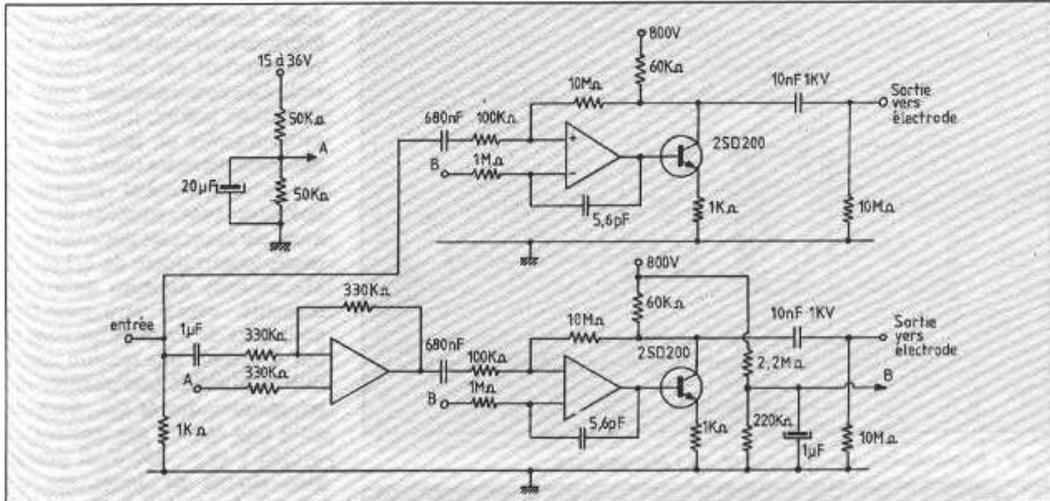


Fig 7 : Schéma d'un montage proposé par Pollock en 79. Le principe d'utilisation de déphaseur/driver à transistors ou ampli op se retrouve sur les amplificateurs intégrés aux transducteurs électrostatiques Beveridge ou Acoustat.

de haut-parleurs, il faut remarquer qu'ils ont en commun de travailler en haute impédance et haute tension. Le circuit qui a été choisi est donc un ampli à tubes, celui de la figure 5. Cet ampli est facile à réaliser et offre d'excellentes performances, son coût est à peine supérieur à celui d'un adaptateur utilisant des transformateurs de bonne qualité. J'ai eu l'occasion d'expérimenter cet ampli depuis longtemps sur plusieurs types de casques, c'est certainement celui qui offre le meilleur rapport performances/prix. Une version a été créée spécialement pour le casque décrit dans le n°3 de l'Audiophile. A cet effet, la polarisation du diaphragme en 750 V s'effectue à l'aide d'un doubleur placé sur un des secondaires du transformateur d'alimentation. Nous verrons qu'il est possible d'adapter cet amplificateur à d'autres casques, notamment les Stax.

La réalisation est assez simple d'autant que tous les composants sont facilement disponibles, sauf peut-être les condensateurs de filtrage et le transformateur d'alimentation. Des condensateurs styroflex isolés à 1000 V

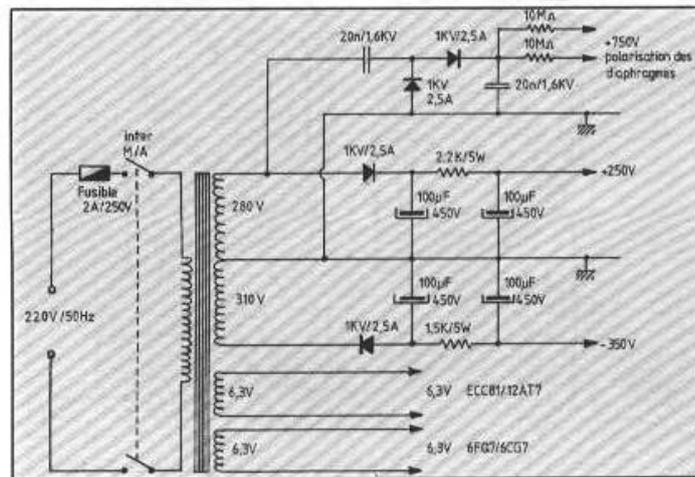


Fig 8 : Schéma de l'alimentation de notre réalisation.

ont été choisis pour la liaison entre les drivers et les tubes de sortie, mais on peut leur substituer par exemple des MKS 47 nF/630 V de chez Wima, la tension entre ces deux points est supérieure à 400 volts. Les résistances de plaque sont des 51 kΩ 1% 7 W à couche de carbone, elles sont remplaçables par des résistances bobinées vitrifiées de

47 kΩ ou par plusieurs résistances à couche montées en série. Le tube 6CG7 peut être remplacé par le 6FQ7, fréquemment ces tubes portent les deux références.

L'alimentation

Le schéma de l'alimentation est montré en figure 8. Son

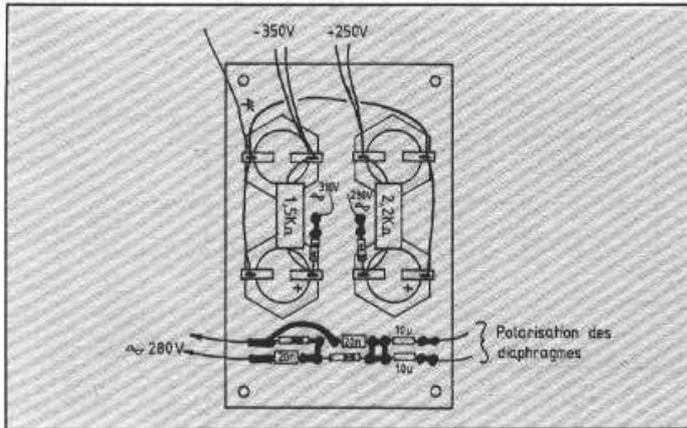


Fig 9 : Implantation, vue côté cuivre, de l'alimentation.

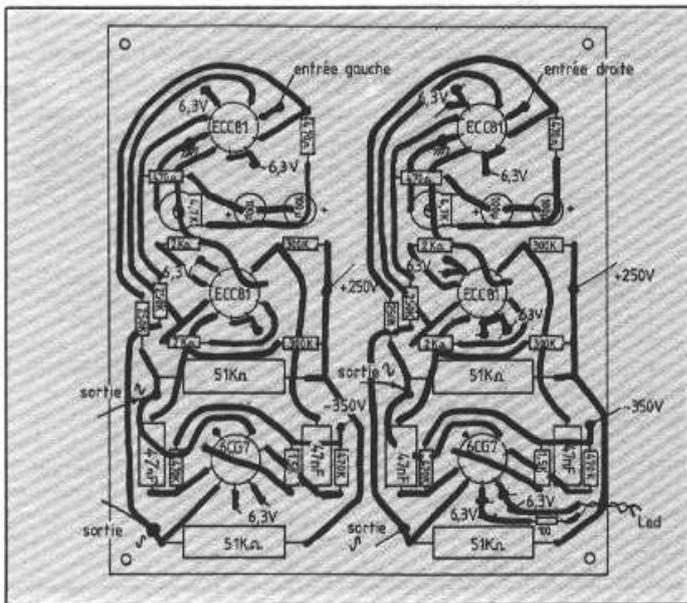


Fig 10 : Implantation du circuit vue du côté composants. Les tubes sont eux du côté piste.

implantation sur un circuit imprimé en époxy de dimensions 103×68 mm se trouve en figure 9, il supporte le doubleur de tension destiné à polariser les diaphragmes sous 750 V à travers deux résistances de $10 \text{ M}\Omega$. Bien que ce circuit ne débite pratiquement rien, il est souhaitable pour des questions de fiabilité, que les

diodes utilisées soient au moins des 1N 4007 $1000 \text{ V}/1\text{A}$, des BY 255 qui font $1300 \text{ V}/3\text{A}$ sont préférables. Il en est de même pour les condensateurs qui sont isolés à 1600 V.

Le filtrage s'effectue par cellules en Pi autour de résistances et de condensateurs $100\mu\text{F}/450 \text{ V}$ de chez CEF, ces composants

sont heureusement toujours fabriqués, ils sont fixés sur le circuit imprimé par leur écrou central. Ces condensateurs ayant le négatif au boîtier, il est indispensable d'isoler de la masse ceux qui alimentent les tubes de sortie en -350 V . Les résistances bobinées sont soudées directement sur les cosses des condensateurs, leurs valeurs de 2,2 et $1,5 \text{ k}\Omega$ ne sont données qu'à titre indicatif, car il sera peut-être nécessaire de les modifier dans le but d'obtenir une tension continue aussi faible que possible sur les plaques des 6CG7. Sachant qu'il faut obtenir des tensions de $+250 \text{ V}$ et -350 V , il semble plus simple de jouer sur les valeurs de ces résistances plutôt que de changer de transfo.

Le transformateur d'alimentation, largement dimensionné, est bobiné autour d'un circuit en E et I de dimensions $80 \times 96 \times 40$ mm. Il y a quatre secondaires :

- $1 \times 280 \text{ V } 23 \text{ mA}$
- $1 \times 310 \text{ V } 20 \text{ mA}$
- $2 \times 6,3 \text{ V } 1,2 \text{ A}$

Un transformateur de plus petites dimensions pourrait suffire, mais il faut tenir compte qu'il y a quatre secondaires dont deux haute tension et que la place pourrait manquer dans la carcasse si le fil n'est pas assez fin. Ce transformateur chaufferait davantage, ce qui n'est pas souhaitable car il a été décidé de l'enfermer pour des questions de sécurité et d'esthétique sous un capot métallique avec les condensateurs de filtrage qu'il convient donc de préserver d'un vieillissement prématuré. Les fabricants d'électrochimiques donnent des courbes de durée de vie pour leur condensateurs en fonction de la température, on peut en déduire que cette durée est divisée par 10 lorsque la température augmente de 50%. La durée de vie d'un électrochimique

que est donc étroitement dépendante de sa température d'utilisation.

Les tensions d'alimentation étant assez courantes, on devrait trouver dans le commerce un transformateur de 48 VA minimum pour amplificateur à tubes de petite puissance, en tenant compte toutefois que l'on devra disposer au moins d'une tension continue négative correctement filtrée de -350 V minimum sous 20 mA.

Câblage de l'amplificateur

Le circuit imprimé de dimensions 150 mm \times 165 mm est en verre époxy. Son schéma d'implantation est en figure 10.

Les tubes étant disposés à l'opposé des autres composants comme le montre la figure 11, les supports sont donc soudés sur le côté cuivre.

Des trous sont perforés dans le circuit imprimé sous les résistances d'anode des tubes de sortie afin de faciliter l'écoulement de l'air. Ces résistances chauffant légèrement, elles sont disposées à 5 mm de la surface du circuit imprimé.

L'alimentation des filaments en 6,3 volts s'effectue par deux câblages séparés en fil torsadé, un pour les ECC81, l'autre pour les 6CG7, le transformateur ayant deux secondaires en 6,3 V.

Il faudra prêter une attention particulière au câblage des sorties et du connecteur XLR afin d'éviter que les canaux soient en opposition de phase.

Le châssis

On aurait pu se contenter d'un châssis ordinaire, de type rack par exemple, avec aération sur le dessus, mais la volonté de donner à cet amplificateur une présentation typique avec tubes apparents oblige à réaliser un châssis plutôt compliqué. De dimensions 323 \times 180 \times 55 mm, il est constitué d'un assemblage de profilés en L et de plaques en alliage d'aluminium

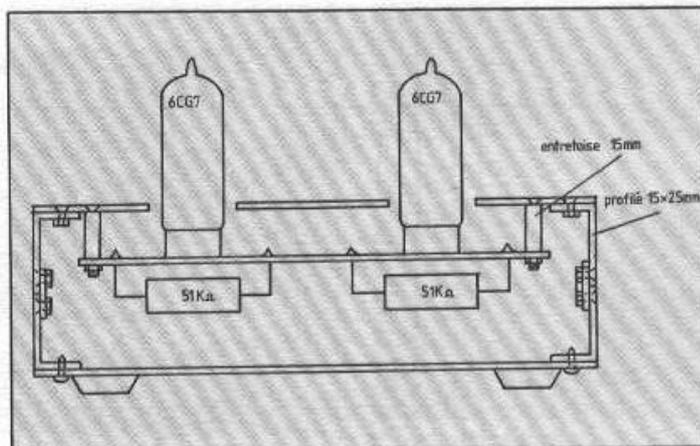


Fig 11 : Schéma de principe de la réalisation du coffret.

de 2 mm d'épaisseur. Les dimensions du capot en alliage d'aluminium dans lequel l'alimentation a été enfermée sont de 170 \times 119 \times 68 mm.

Sur la face avant, on trouve le connecteur femelle XLR de liaison au casque, l'interrupteur et le voyant de mise en marche constitué d'une diode LED alimentée par le 6,3 V à travers une

résistance de 100 Ω . Sur la face arrière, ont été disposés porte-fusible, cordon secteur et connecteurs Cinch plaqués or. Des trous sont forés dans le fond du châssis au niveau des tubes de sortie toujours pour faciliter l'écoulement de la chaleur. La figure 12 donne un plan général du châssis et la figure 13 le schéma de câblage.

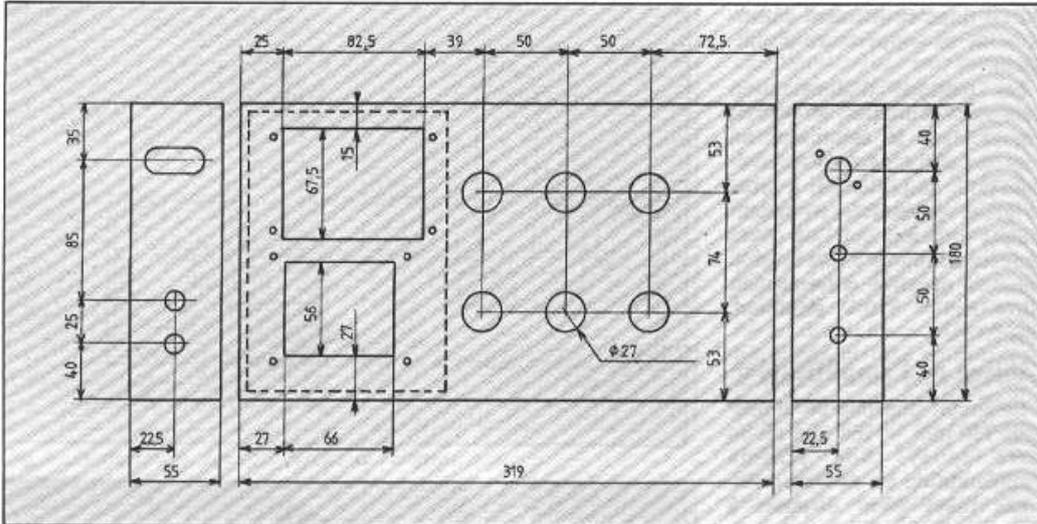


Fig 12 : Dimensions et plans de perçage du coffret.

Essais et performances

La tension entre les lignes positive et négative pouvant dépasser 600 V, il est indispensable de prendre des précautions lors des essais et de la mise au point afin d'éviter une électrocution. Un oscilloscope pourvu d'une sonde atténuatrice est utile pour équilibrer les deux branches du push-pull et contrôler les performances. Il sera peut-être nécessaire d'augmenter la tension négative vers - 360 ou - 370 V afin d'obtenir une tension continue se situant entre 0 et 5 V sur les plaques des 6CG7; en l'absence de modulation, cette tension peut varier selon les tubes. Il faut remarquer que les deux boucles de contre-réaction peuvent véhiculer du continu vers les tubes d'entrée, ce qui peut déséquilibrer le montage. Malgré leur appariement, les triodes de ces tubes peuvent présenter des caractéristiques légèrement différentes, ce défaut est plus ou moins accentué selon les marques, ainsi il est possible de mesurer 1 V sur une plaque et 15 V sur l'autre.

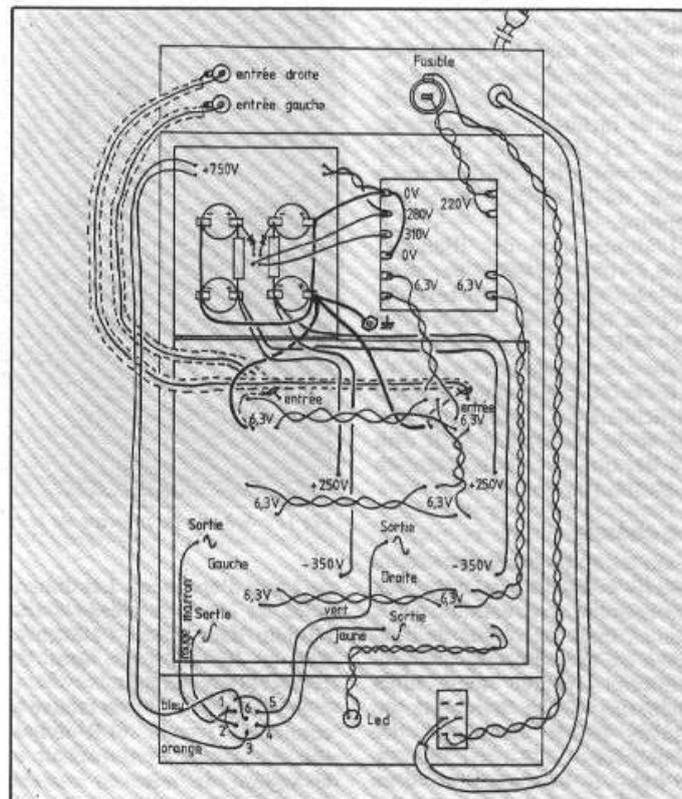


Fig. 13 : Détail du câblage.

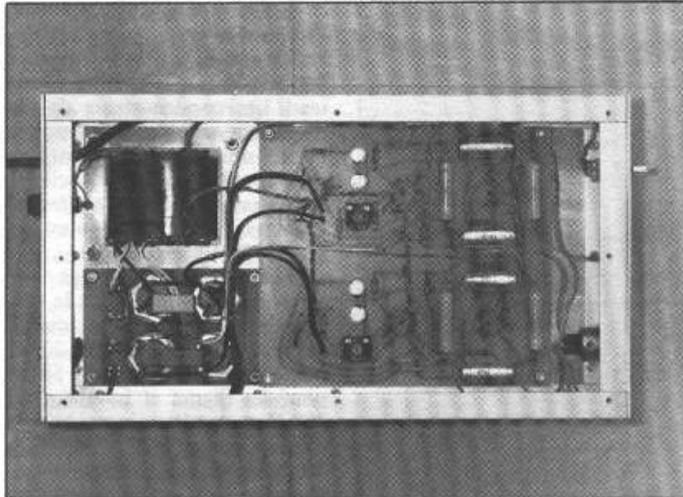


Fig. 13 bis : Vue générale du câblage.

Le niveau de sortie maximal est limité par rapport à l'adaptateur à transformateurs, mais l'écrêtage se fait en douceur.

Les sorties étant symétriques, en haute impédance et sans point de masse, les mesures sont délicates à effectuer car elles risquent d'être faussées par la charge constituée par le circuit de mesure, néanmoins avec 200 V efficaces entre les sorties, les performances suivantes ont été relevées :

- la bande passante à -3dB s'étend de 5 Hz à 60 kHz,
- la distorsion est inférieure à 0,25% à 1 kHz.

Il faut remarquer que 200 V efficaces entre les sorties donnent un niveau de pression acoustique élevé sur le casque, supérieur à un niveau d'écoute normal. Pour une tension de sortie à 1 kHz de 250 V efficaces, la sensibilité d'entrée est d'environ 500 mV. Avec une tension secteur de 230 V, la tension de sortie à l'écrêtage est de 340 V efficaces à 1 kHz.

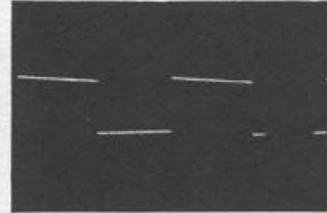
La capacité du casque étant de 150 pF y compris le cordon de liaison, on peut constater sur l'écran de l'oscilloscope, une

atténuation sur les fréquences élevées qui n'est sensible qu'à un niveau proche de l'écrêtage, encore faut-il tenir compte de la capacité du cordon de mesure. Cette atténuation est insignifiante avec 0,2 dB à 15 kHz pour 100 V entre les sorties. Il n'y a aucune influence sur les fréquences inférieures à 5 kHz.

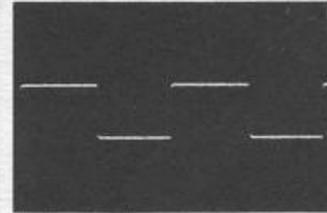
Le niveau acoustique maximum sur le casque décrit dans le n°3 atteint 105 dB ce qui est acceptable, toutefois une saturation de l'extrême grave peut apparaître à partir de 95 dB sur certains CD, c'est le cas pour « Le Sacre du Printemps » de Telarc, direction Lorin Maazel.

Ecoute

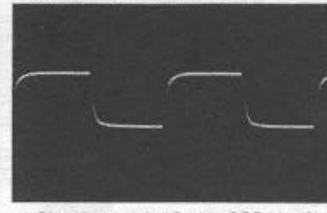
Comme sur tout amplificateur à tubes, les meilleurs résultats sont obtenus après quelques minutes de « chauffe ». Première impression, le timbre des instruments comme les cuivres ou les cordes ou la frappe du marteau du piano sont reproduits avec une vérité remarquable. Le grave et l'extrême grave sont présents sans distorsion, l'aigu est très fin, très défini,



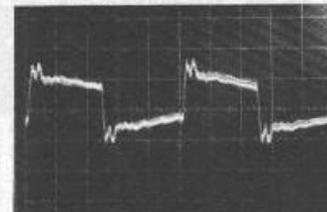
a) Signal carré à 40 Hz 200 V crête-à-crête entre les deux sorties.



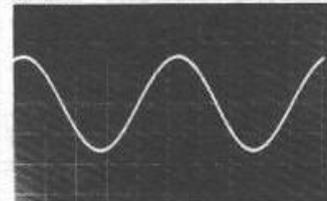
b) Signal carré à 1 kHz 200 V crête-à-crête entre les deux sorties.



c) Signal carré à 10 kHz 200 V crête-à-crête entre les deux sorties.



d) Signal carré à 200 Hz relevé sur le casque oreille artificielle, microphone Sennheiser KE 4, pression acoustique 90 dB.



e) Signal sinusoïdal à 1 kHz 600 V crête-à-crête entre les deux sorties (à 40 et 10 kHz, le signal a même allure).

Fig. 14 : Performances mesurées de l'amplificateur.

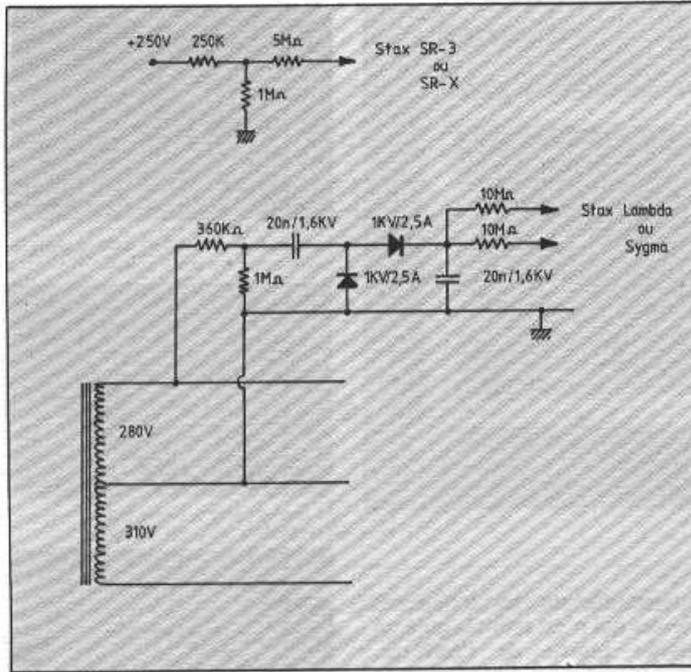


Fig. 15 : Adaptation de notre réalisation aux casques. Stax : Sigma ou Lambda (580 volts), SR-3 ou SRX (200 volts).

cisé sans aucune agressivité. L'image stéréophonique est meilleure qu'avec l'adaptateur à transformateurs bien que la séparation des canaux paraisse toujours excessive, défaut inhérent au casque, les instruments sont mieux situés dans l'espace aussi bien en largeur qu'en profondeur, quand au bruit de fond, il est totalement inaudible. Toutes ces qualités ne feront que se confirmer avec le temps. On supporte plusieurs heures d'écoute sans fatigue auditive à condition que le niveau soit raisonnable, j'estime personnellement que ce sont les mauvais casques qui sont dangereux pour l'audition, malheureusement ces casques sont majoritaires sur le marché.

Améliorations et modifications possibles

Concernant ce circuit, il est possible d'imaginer une alimen-

tation stabilisée réglable permettant un ajustage de la tension de plaque des 6CG7. D'autre part, il serait souhaitable d'obtenir une tension de sortie plus élevée, de l'ordre de 500 V efficaces, dans le but de reculer de quelques précieux dB le seuil de saturation dans le grave. Ce qui implique d'augmenter les tensions d'alimentation avec les problèmes que cela posera aux tubes de sortie.

Il est envisageable aussi d'ajouter un circuit de temporisation de l'alimentation à la mise en marche, la haute tension n'étant connectée qu'après plusieurs secondes de chauffage dans le but d'éviter de trouver la tension anodique sur les électrodes de la cellule et d'éliminer le risque d'un dépassement de la tension nominale sur les condensateurs de l'alimentation au moment de l'allumage. A l'occasion d'un accident ayant affecté

la distribution d'électricité dans l'ouest, j'ai pu mesurer une élévation de la tension secteur à 260 V pendant plusieurs minutes ! Les condensateurs de filtrage sont capables de supporter une tension supérieure à leur tension nominale pendant quelques secondes, en serait-il de même si l'allumage s'effectuait avec un secteur à 260 V ?

La connexion au casque Stax est possible en modifiant la tension de polarisation du diaphragme. Elle doit être de 200 V pour les SR-3 et SRX, de 580 V pour les Sigma et Lambda. Le 200 V pourra être obtenu à l'aide d'un pont diviseur à partir du 250 V continu de l'alimentation. Pour le 580 V, on peut conserver le doubleur de la figure 8 mais il sera précédé d'un pont diviseur, la valeur de ses résistances déterminera la tension de polarisation. Cette tension sera vérifiée avant les résistances de 10 M Ω à l'aide d'une sonde THT à très haute impédance d'entrée, 1000 M Ω par exemple. Une tension de polarisation trop élevée, sans conséquences néfastes heureusement, aura pour effet de déstabiliser le diaphragme qui peut venir se coller à l'une des deux électrodes. Ces deux schémas d'adaptation sont représentés en figure 15. Un problème de connecteur se posera du fait de l'incompatibilité entre ceux utilisés par Stax, fabriqués au Japon par Sato-Parts et en principe non disponibles en France, et les XLR Neutrik ou Switchcraft utilisés dans l'amplificateur. L'adaptation aux casques électrostatiques Koss est délicate car ces casques ayant les électrodes côté oreille reliées à la masse, il est nécessaire de modifier la cellule elle-même.

Evolutions de l'amplificateur

Les possibilités d'évolution sont nombreuses avec notamment la transistorisation des cir-

cuits d'entrée dans le but d'obtenir une meilleure symétrie du signal au niveau des drivers et la liaison en continu vers un étage de sortie à tubes conservant son principe actuel. On peut imaginer également un étage de sortie cascode ou SRPP, à faible impédance de sortie, dans une configuration proche des solutions adoptées par Beveridge ou Acoustat pour leurs haut-parleurs électrostatiques.

Reste la solution tout transistors conservant la liaison directe vers les électrodes. L'absence de transistors PNP haute tension n'arrange pas les choses, si ces transistors existaient rien n'empêcherait la réalisation d'un circuit employant les schémas habituels, par exemple la partie amplificatrice de tension des amplificateurs Kanéda.

Dans tous les cas, que l'on adopte une solution à tubes, à transistors ou hybride, il paraît indispensable de conserver le principe actuel de la liaison directe vers les électrodes. On est en droit de s'étonner de constater que la quasi totalité des amplificateurs pour transducteurs électrostatiques conservent ce condensateur de liaison alors que les amplificateurs pour haut-parleurs électrodynamiques l'ont éliminé il y a plus de vingt ans en adoptant une alimentation symétrique.

Liste des composants

Tubes

2 × 6CG7/6FQ7
4 × ECC81/12TA7
6 × Supports de tubes pour CI

Diodes

4 × Diodes BY 255 ; 1N 4007 ou équivalent
1 × Diode LED 5 mm avec support

Condensateurs

4 × 100 μ F/450 volts CEF à fixation par écrou

4 × 100 μ F/16 volts sorties radiales
4 × 47nF/630 volts minimum
2 × 20nF/1,6 kvolts

Résistances (1/2 watt sauf indication contraire)

1 × 100 Ω 1/4 watt
4 × 470 Ω
2 × 1,5 k Ω
4 × 2 k Ω
4 × 250 k Ω
4 × 300 k Ω
4 × 470 k Ω
2 × 10 M Ω
1 × 1,5 k Ω 5 W bobinée (voir texte)
1 × 3,3 k Ω 5 W bobinée (voir texte)
4 × 51 k Ω 7 W (voir texte)
2 × 4,7 k Ω Ajustable

Divers

Transformateur d'alimentation (voir texte)
Châssis
Circuit imprimé d'amplificateur
Circuit imprimé d'alimentation
Connecteur XLR femelle 6 broches châssis
Passe fil pour châssis
Fusible 5 × 20 1 A
Porte-fusible 5 × 20 mm
2 prises Cinch femelles châssis
1 interrupteur secteur bipolaire
Cordon secteur
Fils de câblage ; visserie

Références

Electrostatic headphone design. Instructions for making a simple and inexpensive high-quality unit. Philip D. Harvey. Wireless World Novembre 1971.

Electrostatic headphones. Letters to the editor. J. Halliday. Wireless World Janvier 1972.

Electrostatic headphones. Constructional design with improved acoustic output. Neil Pollock. Wireless World Novembre 1979.

Notices techniques
Audax et Stax.