

Audiophile n°37, hiver 1986

Un amplificateur à tubes stable et performant

François Blesbois

Nombreux sont les lecteurs désireux d'entreprendre la réalisation d'un amplificateur à tubes. Toutefois la difficulté d'approvisionnement en composants, leur coût bien souvent élevé, ont freiné nombre d'amateurs. En outre, de plus en plus rares sont ceux qui ont l'expérience du tube et beaucoup craignent de se lancer dans une aventure onéreuse sans toutefois être certains de parvenir à leur fin.

Pour satisfaire cette demande importante, émanant surtout de notre tranche de lectorat la plus jeune, nous vous proposons la description très détaillée d'un amplificateur à tubes simple, de puissance modérée, utilisant des composants faciles à se procurer et de coût sans concurrence. De plus, cet amplificateur peut constituer un tremplin idéal à des réalisations plus imposantes. Le schéma, synthèse d'idées maîtresses en matière d'amplificateurs de qualité, reste dans la grande tradition des meilleurs amplificateurs des années 60. Les performances subjectives d'un tel circuit ont de quoi faire de nombreux envieux parmi les concepteurs d'amplificateurs de technologie moderne...

Préambule

L'idée de base de cette description n'était pas de présenter une étude théorique sur le fonctionnement des amplis à tubes : d'autres l'ont fait avant nous. Nous n'avions pas non plus la prétention de faire du neuf avec

de l'ancien car dans ce domaine tout a été tenté, ou presque, depuis bien longtemps.

Notre démarche est plus empirique et basée sur une quinzaine d'années d'observations et d'interrogations. Alors que le transistor commençait à « démoder » son homologue à haute

tension, nous étions perplexe car les résultats obtenus avec des circuits de type LIN qui étaient bien plus ultra du moment étaient loin d'égaliser les classiques ultra-linéaires de l'époque. Sans trop savoir pourquoi, nous avons donc remis l'état solide en attendant des jour

meilleurs...

Les choses ont évolué, le comportement d'un amplificateur en audio-fréquences et sur charge complexe est maintenant mieux connu et l'on peut expliquer de manière rationnelle les erreurs du passé.

Fort de cette expérience, on peut désormais concevoir des montages transistorisés objectivement et subjectivement performants. Il reste que ce résultat n'est possible qu'un demi siècle après l'apparition de la 2A3 et près de 30 ans après celle du transistor, ce qui montre que dans ce domaine l'évolution est loin de l'exponentielle...

Nous restons convaincus que la conception et la réalisation d'un système à tube se justifie pleinement. Avec un minimum de soin et de rigueur, le bilan sera largement positif et la qualité du produit le placera au-dessus des « modes et des tendances ».

Pour ceux qui souhaiteraient « tâter » du tube, trois solutions sont possibles :

- soit acheter un produit commercial fini et garanti, mais il faut savoir que, dans la grande majorité des cas, on aura affaire à des « copies d'ancien » vendues au prix d'un original sans en avoir forcément la classe :

- soit reconditionner ou améliorer un ancêtre, ce qui est une bonne solution, sous réserve que tous les composants soient encore disponibles :

- soit enfin sortir des sentiers battus et réaliser un montage original à partir d'éléments modernes et fiables.

Cette dernière solution est évolutive et permet d'accéder à un produit correspondant bien aux ambitions de son concepteur.

Dans ce qui va suivre, nous décrivons un amplificateur simple et de puissance modérée, une dizaine de watts, mais qui est la synthèse de quelques idées maîtresses en matière d'amplifica-

tion de qualité. Il peut être une fin en soi mais également un tremplin pour des réalisations plus imposantes, sinon meilleures.

Le schéma retenu

L'amplification à tube utilise deux configurations de base :

Le tube unique

Triode ou multigrille monté en classe A, ce montage peut être la meilleure et la pire des choses. La meilleure quand il met à profit des tubes triodes comme les 2A3 et W300B bien servis par un transformateur de sortie irréprochable. La pire quand il est adopté dans un but d'économie ; petite tétrode à grande pente, transfo lilliputien et contre-réaction généreuse pour masquer les défauts. C'est le type même de l'application « grand public ». Dans tous les cas, le montage à tube unique est peu puissant (rarement plus de 5 W), son taux de distorsion global est élevé, même si cette distorsion est « harmonieuse ». Son emploi le réserve donc à des systèmes à très haut rendement ou à la multiplification.

En outre, les triodes de puissance, qui sont les seuls tubes valables dans ce cas, deviennent extrêmement rares, donc chères, et sont bien souvent dégradées par un stockage prolongé. Un test systématique au lampemètre nous semble nécessaire pour des fabrications antérieures à 15 ans.

Le montage symétrique push-pull

Il est, lui aussi, bien connu. Rappelons brièvement ses caractéristiques essentielles :

Il s'oppose par définition à la génération d'harmoniques paires, d'où une DHT plus faible que le tube unique.

Grâce à la symétrie des enroulements, la composante continue des courants plaques ne crée aucun champ dans le noyau, ce qui permet de réaliser des tranfos

sans entrefers, plus légers et d'un meilleur rendement. Il en va de même pour tout signal en « mode commun », comme les résiduelles de filtrage, qui sont atténuées par déphasage d'où un meilleur rapport S/B.

Il permet, surtout en classe AB, d'utiliser des tubes à grand gain, comme les tétrodes ou pentodes, ceux-ci n'effectuent que la moitié du travail dans la partie la plus linéaire de la courbe. Ceci permet de réduire le nombre d'étages amplificateurs de tension, ce qui compense l'avantage qu'il y aurait à employer des triodes distordantes. Certains montages permettent d'ailleurs de hisser les tétrodes au niveau des triodes mais nous y reviendrons plus loin.

Le rendement, toujours en classe AB, est le triple d'un montage à tube unique. A puissance de sortie égale, la dissipation est beaucoup plus faible, ce qui est un gage de longévité pour les tubes (un point qu'il vaut mieux ne plus négliger). Dans un montage push-pull à tube, comme dans un transistor à effet de champ à puissance, la classe A n'apporte pas d'avantages décisifs. Une augmentation du courant de repos au-delà du point de fonctionnement AB n'apporte pratiquement plus que des calories donc de l'usure.

Une symétrie parfaite de l'étage de sortie n'a d'intérêt que si les tensions d'attaque sont elles aussi parfaitement bien déphasées et symétriques. Or un déphaseur à tube est plus délicat à mettre en œuvre que son homologue à transistor, ceci provenant en grande partie de la grande résistance interne des tubes et de leurs capacités inter-électrodes relativement importantes. De plus, le vieillissement et le régime thermique des tubes sont des facteurs de dérives difficiles à maîtriser.

De ce qui précède, on comprendra que le push-pull AB

permet dans tous les cas de « limiter la casse » (ce qui n'est pas un compliment) et c'est certainement ce qui lui a valu sa bonne réputation et son succès commercial. Ce n'est pas pour autant un montage galvaudé et si l'on s'en donne les moyens, ce montage est excellent et peut prétendre au plus haut niveau de qualité.

avons conçu est une synthèse de nos convictions en matière d'amplification à tube. Pour être tout à fait honnête, un montage célèbre nous a — dans la forme au moins — montré la voie ; il s'agissait du célèbre Quad II de P.J. Walker. Comme lui, notre amplificateur ne comporte que deux étages, un déphaseur à grand gain voisin du « para-phase » et un étage de puissance en

configuration « semi-triodes » mais la ressemblance s'arrête là. Dans le Quad II, le déphaseur d'entrée utilise deux pentodes à grand gain EF 86 fournissant les 30 V nécessaires à l'attaque des tetrodes KT 66 chargées par un transformateur possédant un enroulement séparé pour une contre-réaction cathodique . Voyons maintenant notre schéma (Fig. 1) en détail.

L'amplificateur que nous

ABI utilisant des tetrodes en

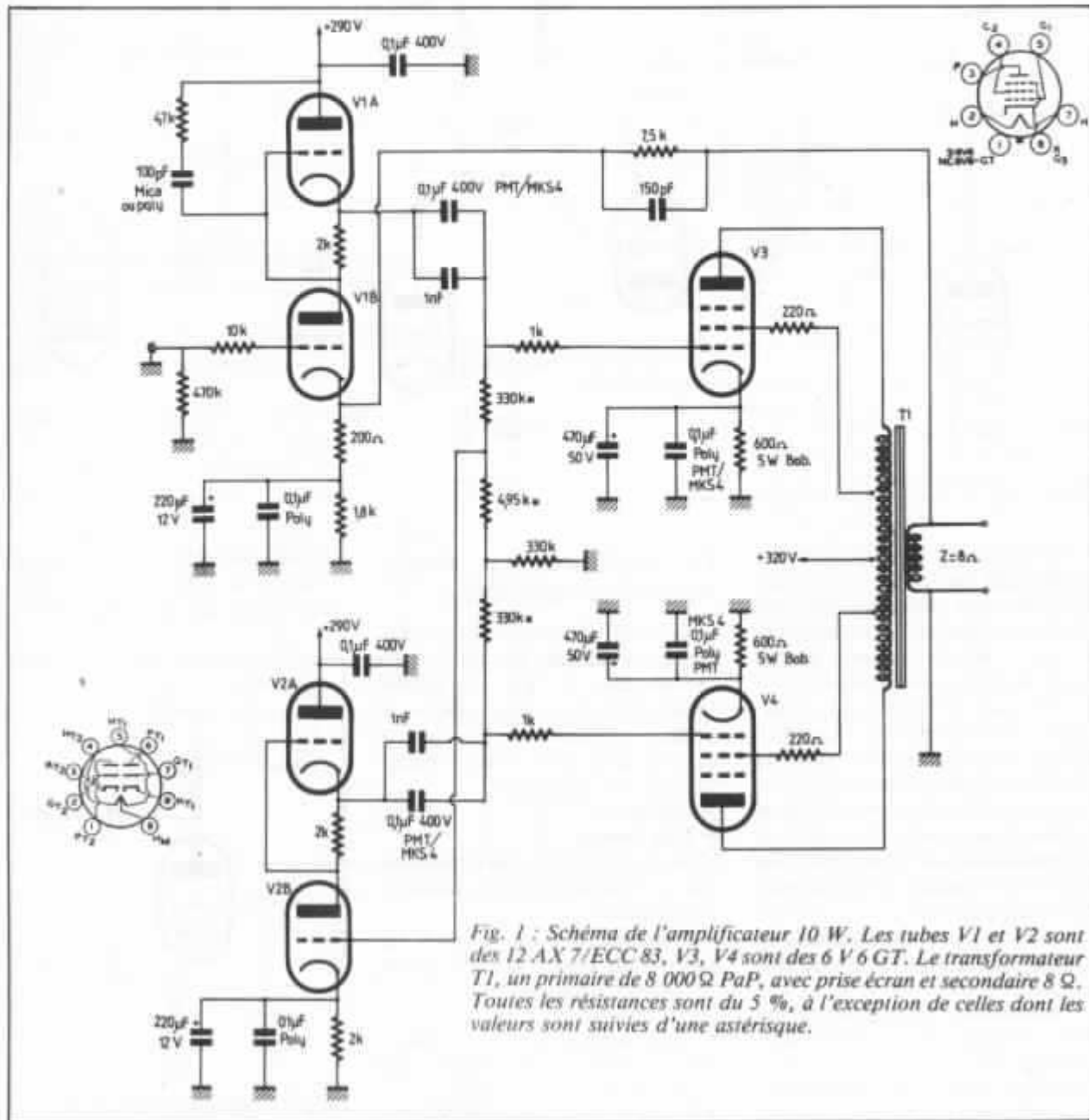


Fig. 1 : Schéma de l'amplificateur 10 W. Les tubes V1 et V2 sont des 12 AX 7/ECC 83, V3, V4 sont des 6 V 6 GT. Le transformateur T1, un primaire de 8 000 Ω PaP, avec prise écran et secondaire 8 Ω. Toutes les résistances sont du 5 %, à l'exception de celles dont les valeurs sont suivies d'une astérisque.

L'étage déphaseur d'entrée

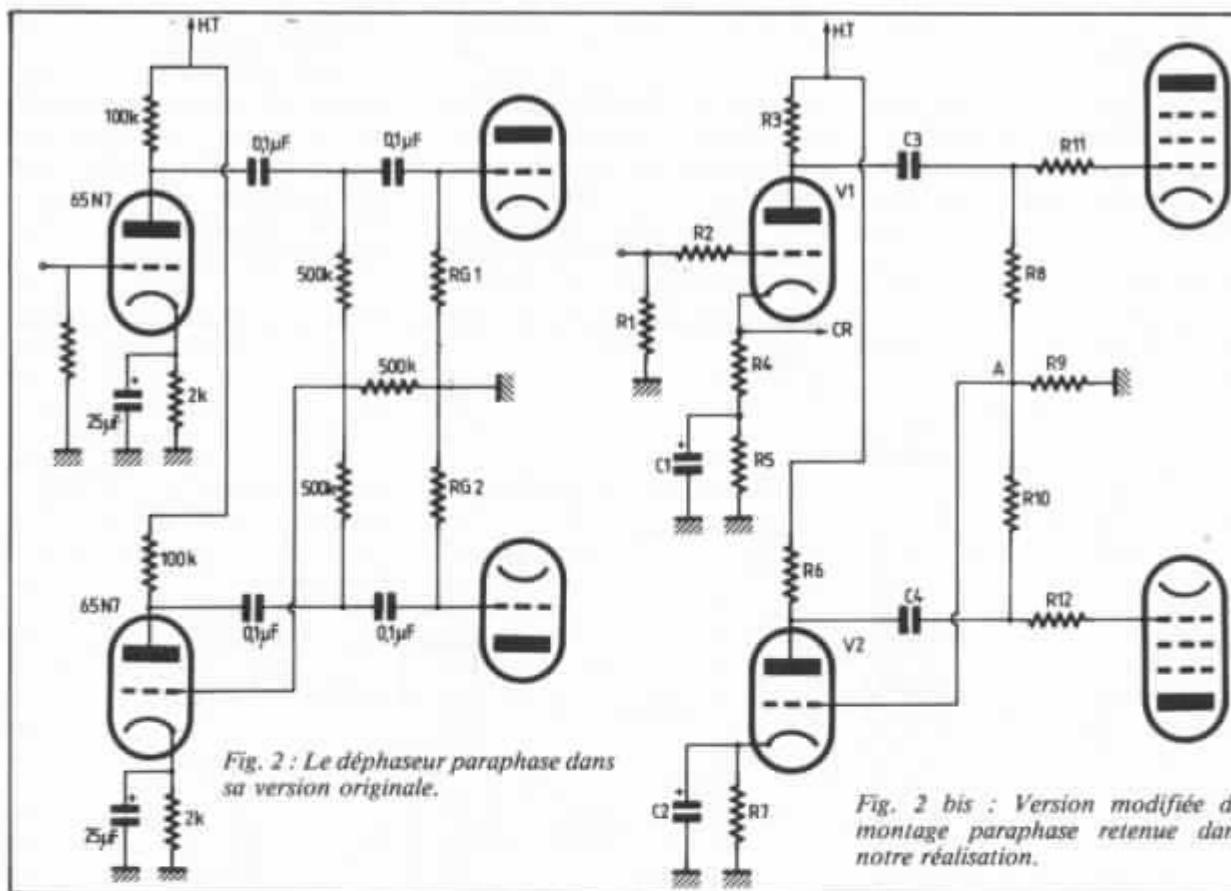


Fig. 2 : Le déphaseur paraphase dans sa version originale.

Fig. 2 bis : Version modifiée du montage paraphase retenue dans notre réalisation.

Ce circuit est la seule véritable originalité de notre amplificateur. Il s'agit d'une variante du montage paraphase ou « balancoire ».

- Nous l'avons retenu pour les raisons suivantes :
- Son gain est important, puisque c'est celui du tube monté en ampli de tension, soit près de 40 dB dans notre cas.
- Sa symétrie est excellente et indépendante de la fréquence et du vieillissement des tubes. De plus elle s'ajuste et se corrige automatiquement.
- Il n'est pas trop sensible à la charge qu'on lui présente et distord très peu.
- Il permet l'application d'une CR sur son tube d'entrée sans nuire à son équilibre.

Citons pour mémoire les systèmes déphaseurs les plus connus :

Le déphaseur à charge répartie ou cathodique

Le tube est chargé sur sa plaque et sa cathode par deux résistances RA et RK de même valeur. Un signal appliqué sur la grille se retrouve en phase sur la cathode et à 180°, avec le même niveau, sur la plaque.

Avantages :

- Très simple
- Peut se coupler sans condensateur à l'étage précédent (schéma Williamson)
- Assez performant quand il est suivi d'un étage tampon avant les tubes de puissance

Inconvénients :

- Gain faible (entre 3 et 6 dB)
- Non linéaire en raison des capacités internes du tube
- Equilibrage précaire et instable

- Très sensible à la char (valeurs de RA et RK critique devant RG des tubes suivants)

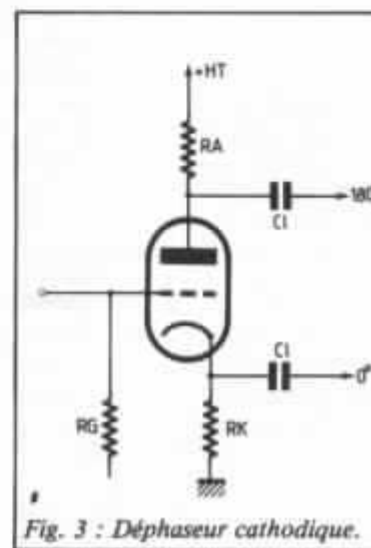


Fig. 3 : Déphaseur cathodique.

Le déphaseur de Schmidt

Deux triodes sont montées en différentiel, la grille du deuxième tube V2 est découplée à la masse par un condensateur CG2. Le signal appliqué sur la grille de V1 est déphasé de 180° sur sa plaque et appliqué à l'étage suivant via C11. V2 fonctionne en grille commune et est couplé à la cathode de V1. Le signal se retrouve en phase avec l'entrée sur la plaque de V2, soit à 180° de V1 et avec le même niveau.

Avantages :

- Très linéaire
- Equilibrage facile et assez stable
- Distord très peu
- Peut se coupler directement à l'étage précédent

Inconvénients :

- Qualité de CG2 critique
- Gain moyen (car RK1-RK2 ne sont pas découplées) de l'ordre de 15 dB
- Appairage de V1 et V2 nécessaire. Tube double conseillé

Déphaseur à transformateur

Le schéma parle de lui-même. Malheureusement ce déphaseur très simple est pratiquement irréalisable de nos jours. Sa qualité est liée uniquement à celle de son transformateur devenu complètement introuvable (sauf peut-être au Japon) et de toute façon elle égalera difficilement celle d'un « Schmidt » ou d'un « Paraphase » bien réalisé.

Revenons à notre « balançoire » et voyons ce qui s'y passe. Le tube V1 est utilisé comme un quelconque ampli de tension entre l'arrivée du signal appliqué sur sa grille via R2 qui stabilise le tube et la grille de tube de puissance V3 à travers C3. Sa cathode est chargée par une résistance composite R4 R5 partiellement découplée par C4 afin de permettre l'application d'une contre-réaction modérée

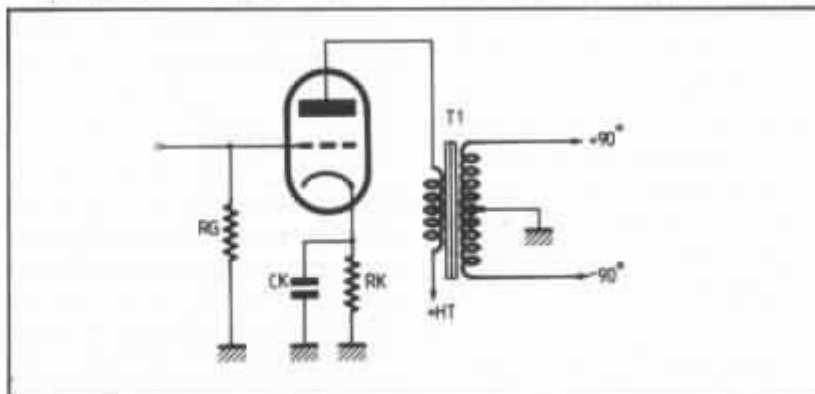


Fig. 5 : Déphaseur à transformateur.

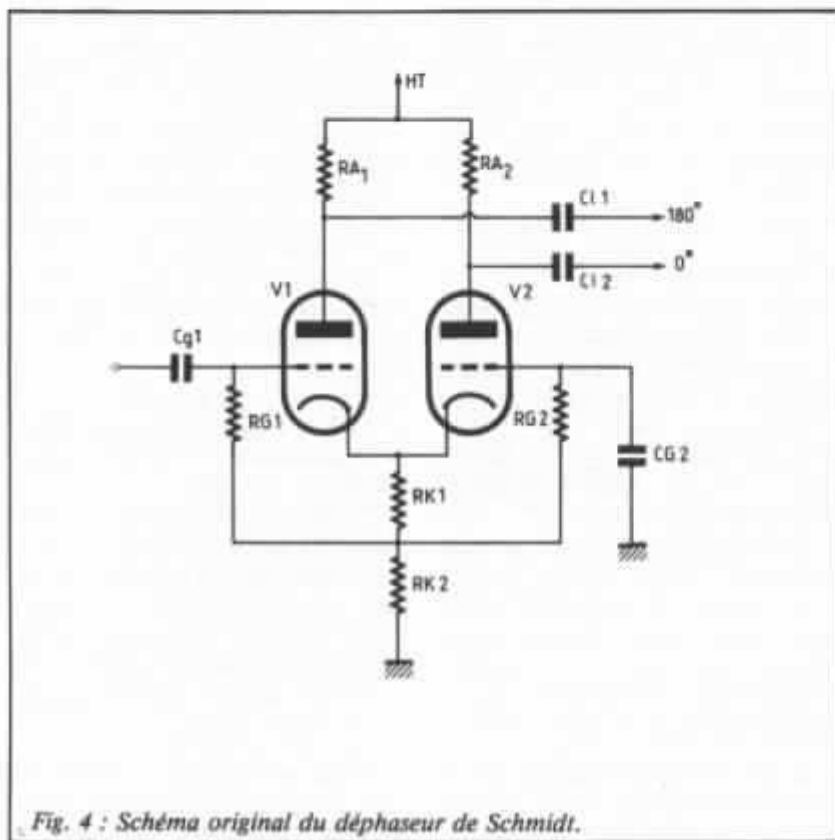


Fig. 4 : Schéma original du déphaseur de Schmidt.

Sa plaque est classiquement chargée par R3 de valeur assez faible (120 k) pour minimiser les effets de la charge. Le gain à vide est d'environ 35 dB.

La deuxième triode V2, identique à V1 et polarisée de manière identique, prélève son signal de grille sur un diviseur résistif R8 R9, R10, qui est également la charge de grille des tubes de puissance. Le courant de grille de ces tubes est tellement faible que la tension continue au point A est négligeable et sans effet sur V2 Cette disposition est une simplification du montage d'origine (Fig. 1) mais les performances sont meilleures car on élimine deux condensateurs de liaison et deux résistances de charge inutiles. Cela n'aurait pas été possible avec certaines triodes dont la fuite de grille est importante.

En y regardant de plus près nous voyons que V2 est non seulement alimenté par le signal de plaque de V1 divisé par 2 puis

que $R8 = R10$, mais que son gain est fixé par ces mêmes $R8$ et $R10$ par la relation approchée :

$$GV2 = \frac{R8 + R10}{R8}$$

(en négligeant le gain « à vide » du tube très supérieur à $GV2$)

d'où $GV2 = 2$ car $R8 = R10$

Le signal de plaque de $V2$ sera donc strictement égal à celui de $V1$, mais à 180° . L'incidence du vieillissement sur la symétrie est négligeable car :

- Toute variation du gain de $V1$ se retrouvera sur $V2$

- Une variation du gain de $V2$ en une « boucle ouverte » aura un effet négligeable sur le gain en « boucle fermée » qui est de 2.

Exemple : Une perte de 3 dB de $V2$ ramenant son coefficient d'amplification K de 60 à 40 entraînera :

$$\frac{K + G}{K} \text{ soit } \frac{40 + 2}{40} = 1,05$$

soit 5% de dissymétrie ce qui est encore excellent.

Cela montre en outre l'intérêt qu'il y a à utiliser un tube à grand gain dans cette fonction et c'est la raison pour laquelle nous avons retenu pour notre déphaseur la double triode 12AK7/ECC83 dont le K est précisément de 60. Ce tube donnera une dissymétrie initiale de 3% que l'on compensera une fois pour toutes en jouant sur les valeurs de $R8$ et $R10$. Mais *attention* car le réseau $R8 R10$ est à la fois diviseur de tension et boucle de CR d'où un effet cumulatif; le résultat recherché sera obtenu en augmentant de 1,5% la valeur de $R10$, ce qui revient à lui ajouter une résistance de 4,95 k Ω en série dans le schéma définitif. Ce déphaseur a été testé sous cette forme et nous avons pu constater qu'il fonctionnait parfaitement quel que soit l'état des tubes.

Des mesures effectuées à vide, sur charge résistive de 100 k Ω ont donné les résultats suivants :

- *Distorsion harmonique* : 0,13% (- 58 dB) de 10 Hz à 100 kHz avec prépondérance paire (H3 à - 72 dB, H4 à - 68 dB) et cela entre 100 mV et 2 V à l'entrée.

- *Gain* : 33 dB à 1 kHz et pour 100 mV à l'entrée.

- *BP* à 1 dB ; 8 Hz à 160 kHz

- *Dissymétrie de niveau* pour 1 V à l'entrée à 100 Hz : 0,3% ; à 1 kHz : 0,2% ; à 10 kHz : 0,6% ; à 20 kHz : 0,8% ; à 40 kHz : 1,3%.

- *Déphasage relatif en sortie* pour 1 V à l'entrée à 100 Hz : 182° , à 1 kHz : 178° , à 10 kHz : 183° , à 20 kHz : 186° , à 40 kHz : 188° .

Les deux dernières mesures nous ont montré les limites du montage sous sa forme originale. Par curiosité, nous avons ajouté des capacités de 30 pF sur les résistances de charges et nous avons refait nos mesures, car nous voulions simuler la charge réelle des tubes de sortie. Nous avons trouvé des résultats assez différents :

- *Distorsion harmonique* pour 1 V à l'entrée 0,13% jusqu'à 7 kHz ; 0,22% à 15 kHz ; 0,30% à 20 kHz, avec une remontée de H3 à partir de 7 kHz.

- *Gain* : 33 dB à 1 kHz et pour 100 mV à l'entrée.

- *BP* à 1 dB, 8 Hz à 65 kHz.

- *Dissymétrie de niveau* pour 1 V à l'entrée 100 Hz : 0,3% ; 1 kHz : 0,2% ; 10 kHz : 0,6% ; 20 kHz : 0,9% ; 40 kHz : 1,5%.

- *Déphasage relatif* pour 1 V à l'entrée 100 Hz : 182° ; 1 kHz : 178° ; 10 kHz : 185° ; 20 kHz : 189° ; 40 kHz : 191° .

Au vu de ces mesures, et bien qu'aucun autre schéma essayé n'ait donné de meilleurs résultats, nous avons cherché longtemps un système capable d'améliorer « l'inertie » de ce déphaseur vis-à-vis de sa charge.

C'est alors que nous avons pensé au montage SRPP que les lecteurs de l'Audiophile connais-

sent bien. Dans ce circuit l'amplificateur de tension voit sa charge anodique remplacée par un autre tube monté en cathode follower. Le tube composé ainsi créé s'apparente au montage push-pull et possède des caractéristiques intéressantes :

- L'impédance de sortie est plus faible ce qui le rend moins sensible à la charge

- On bénéficie d'une autorégulation du point de fonctionnement en fonction de la tension d'entrée. Les écarts dynamiques sont mieux respectés et la distorsion à haut niveau est plus faible. On remarquera cependant que la cathode du deuxième tube se trouve à un potentiel élevé ; si le filament devra donc être porté à un niveau voisin ou supérieur à l'on veut éviter qu'il devienne émissif à son tour ce qui lui sera préjudiciable et dégradera le rapport S/B. Cette précaution sera prise au niveau de l'alimentation générale de l'amplificateur

Nous avons donc appliqué le SRPP à notre déphaseur en ajoutant une demi 12 AX 7 dans chaque branche et en considérant chaque doublet comme un tube unique. Le résultat se passe de commentaires. Sur une charge de 10 k Ω seulement et shunté par 47 pF, nous avons trouvé :

- *Distorsion harmonique totale* 0,1% (60 dB) de 5 Hz à 100 kHz mais entre 50 mV et 3 V à l'entrée.

- *Gain* : 32 dB à 1 kHz

- *BP* : à 1 dB, 8 Hz à 150 kHz

- *Dyssidémie* : < 0,5% entre 10 Hz et 100 kHz

- *Erreur de phase relative* : < 1% entre 20 Hz et 100 kHz.

La plupart de ces mesures ont pu être effectuées grâce à un analyseur vectoriel de précision Rohde et Schwarz associé à un banc de mesure audiofréquence de la même marque.

Nous avons testé ce déphaseur sur plusieurs prototypes après plus de 1000 heures de fonction-

nement et de nombreuses écoutes comparatives, sans trouver la moindre dérive des caractéristiques.

Dans le montage définitif, nous avons particulièrement soigné les découplages en employant systématiquement des condensateurs hybrides chimiques/polyester ou polyester/ mica pour les deux condensateurs de liaison. Un réseau RC 4,7 K/100 pF disposé sur le tube d'entrée limite sa bande passante à 80 kHz. La boucle de contre-réaction est appliquée sur la cathode partiellement découplée de ce même tube sans que la symétrie en soit affectée.

L'étage de puissance.

Nous avons vu au début de l'article, les raisons qui nous ont poussé à choisir des tetrodes pour l'étage de puissance. Mais avant d'aller plus loin rappelons quelques bases de l'amplification de puissance à tube.

A l'inverse d'un montage à transistor dont la configuration est proche de l'amplificateur opérationnel, l'amplificateur à tube peut s'assimiler à un générateur de courant et son impédance de sortie n'est pas nulle. Cette différence provient essentiellement de la résistance interne élevée des tubes à vide. De ce fait on tirera les remarques suivantes :

- Un ampli à tube doit être adapté à sa charge ; on déterminera sur la courbe caractéristique du tube une droite, appelée droite de charge. En fonction de la classe d'amplification choisie, des courants et tensions admissibles, on trouvera sur cette droite un point correspondant à l'impédance optimale de la charge de plaque (comprise entre 1000 et 10 000 Ω)
- Le transformateur est encore le moyen le plus rationnel et le plus satisfaisant pour coupler un tube à un transducteur à basse impé-

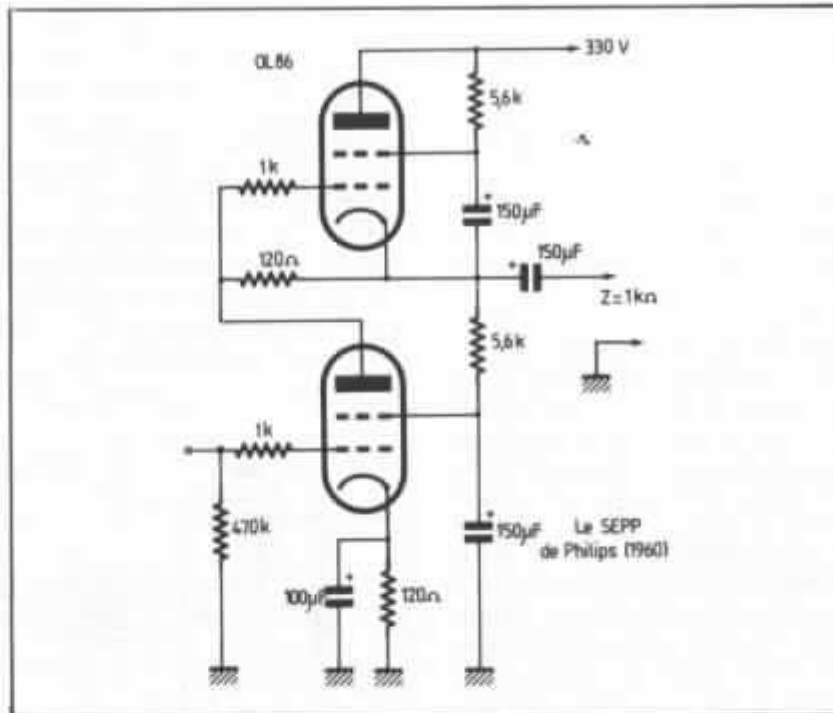


Fig. 6 : Le montage SEPP de Philips (1960).

dance. Des systèmes comme le SEPP de Philips (la version puissante du SRPP) nécessitaient des tubes spéciaux, des HP de 1000 Ω d'impédance avec une bobine mobile énorme et fragile. De plus les liaisons s'effectuaient à l'aide de condensateurs chimiques à haute tension. Et tout cela pour 5 W d'un son peu convaincant (souvenir de l'auteur).

D'autres systèmes OTL abaissent l'impédance de sortie par mise en parallèle d'un grand nombre de tubes, souvent spéciaux, et sont de véritables monstres. Pour supprimer les condensateurs de liaisons, le haut-parleur est souvent porté à un potentiel élevé, ce qui n'est pas sans risque. Nous n'avons jamais écouté de tels systèmes mais une telle complexité nous laisse sceptique...

- Le facteur d'amortissement (Z/R_i) est le point faible des amplificateurs à tube. L'intérêt de ce paramètre est de mieux « tenir » les haut-parleurs sur des phénomènes transitoires et

d'éviter trainage et suroscillation.

Il existe trois façons de l'améliorer :

- choisir des tubes et des configurations à faibles résistances internes
- utiliser de très bons transformateurs de sortie avec des résistances d'enroulements et de inductances de fuite aussi faible que possible.

Utiliser un réseau de contre réaction. A dose modérée, elle réduit considérablement la résistance interne de l'amplificateur même si ses effets bénéfiques sur la distorsion et la bande passante ne sont pas recherchés à priori. Dans un ampli à tube, il suffit de 15 à 20 dB pour arriver à nos fins, ce qui est plus faible que dans beaucoup de montage transistorisés réputés « sans contre-réaction ».

Le résultat final sera en moyenne 10 fois moins bon que pour le transistor (un facteur de 30 est un maximum pour le tube mais ne perdons pas de vue qu'une fraction d'ohm perdue dans les câbles, les filtres ou le

bobines mobiles remettra nos concurrents à égalité...

• A l'inverse du transistor, le tube craint moins le court-circuit que le circuit ouvert. A vide la tension crête est doublée et peut provoquer des claquages, alors qu'en court-circuit les tubes sont auto-protégés par leur résistance interne (ne pas en abuser tout de même !).

Notre amplificateur ne comportant que deux étages, le seul type capable de délivrer 10 W ou plus à partir des 15 V du déphaseur est la tétrode, ce qui n'est pas un grand inconvénient dans un push-pull AB. Rappelons que la classe AB se subdivise en deux « sous-classes » AB1 et AB2, selon que I_G est stable ou varie avec I_p . En AB1, on peut utiliser la d.d.p. aux bornes de R_K pour polariser la grille, réunie à la masse par R_G . En AB2, il est préférable de relier la cathode à la masse, d'où un meilleur rendement, et d'abaisser la grille par une tension négative externe. Ce montage permet d'accroître la puissance de sortie mais il a trois inconvénients majeurs :

- il nécessite une alimentation négative stable mais réglable
- le réglage est assez pointu et instable ; il doit être repris périodiquement à mesure que le tube vieillit.
- en cas d'avarie de l'alimentation de grille, la destruction des tubes est quasi immédiate car le courant n'est limité par aucune résistance (une astuce consiste à mettre un fusible en série dans la cathode).

Comme la classe AB2 n'apporte qualitativement aucun avantage par rapport à l'AB1 si ce n'est peut-être l'absence de résistance de cathode et de condensateur de découplage, nous ne courrons aucun risque et nous la réserverons à des montages plus puissants, là où le rendement thermique n'est plus négligeable...

Bien que la triode ne semblât pas s'imposer, nous ne souhai-

tions pas nous priver totalement de ses avantages (moindre distorsion et résistance de plaque réduite). C'est pourquoi nous avons retenu un montage hybride appelé « ultra-linéaire » mis au point par un certain D. Hafler dans les années 50.

Dans le fonctionnement en tétrode ou en pentode classique, l'écran du tube est à un potentiel voisin de la plaque mais il est découplé de celle-ci (fig. 7).

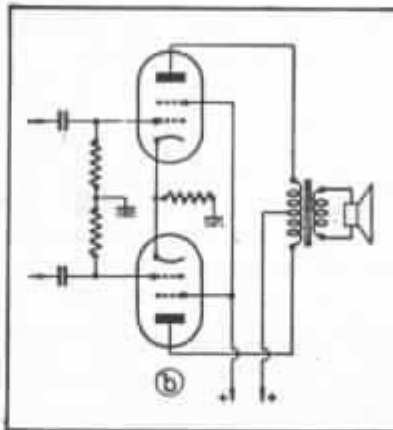


Fig. 7 : Fonctionnement classique.

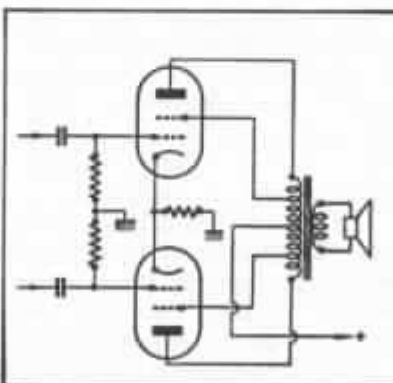


Fig. 8 : Montage en ultra-linéaire. On notera qu'une fraction de la tension alternative est appliquée sur l'écran.

En « ultra-linéaire » (fig. 8), l'écran est toujours au potentiel de plaque mais une fraction de la tension alternative lui est injectée par une prise sur le primaire du transfo de sortie, créant un effet de contre-réaction locale améliorant la linéarité du tube, réduisant la R_i et la distorsion mais aussi, bien sûr, le gain. Ce mon-

tage cumule donc les avantages des modes triode et pentode, qui lui a valu un énorme succès. Il suffit d'examiner une des premières versions commerciales (fig. 9) datant de 1956 et de le comparer avec les schémas Marantz, Dynaco, Leak ou Rford de l'époque, ou même l'Ampliton ou Y. Cochet pour trouver que des ressemblances. En vérité ce montage est pratiquement le même qui peut se faire de mieux avec des pentodes et les constructeurs auraient eu tort de se gêner s'ils leur restaient d'autres arguments sérieux pour convaincre tel que la qualité de leur transformateur de sortie.

Une fois encore Quad Accidental se démarquait du lot en proposant la même année un système de contre-réaction locale par couplage de cathode ayant un effet proche du montage ultra-linéaire (fig. 10). Un autre constructeur américain lançait même moment un ampli réverbératoire mettant en œuvre un étage de sortie à contre-réaction d'écran et de cathode. Le transformateur ne comportait moins de quatre enroulements distincts et demandait des semaines de travail à un ouvrier (très) qualifié. Muselées de sorte les pentodes 1614 n'avaient guère plus de gain que des 2A3 : la stabilité du montage était critique. Le « Mac-Intosh » est devenu légendaire car c'était un amplificateur très puissant merveilleusement réalisé. Ces performances auditives nous connaissons de meilleurs...

Mais revenons à notre montage ultra-linéaire pour préciser que sa qualité est directement liée à celle du transformateur utilisé et de sa bonne adaptation aux tubes. Voyons maintenant comment ce tube 6 V 6 a été retenu. Dans cette gamme de puissance toutes les pentodes et tétrodes ont des performances très voisines :

— Pente de l'ordre de 10 mA

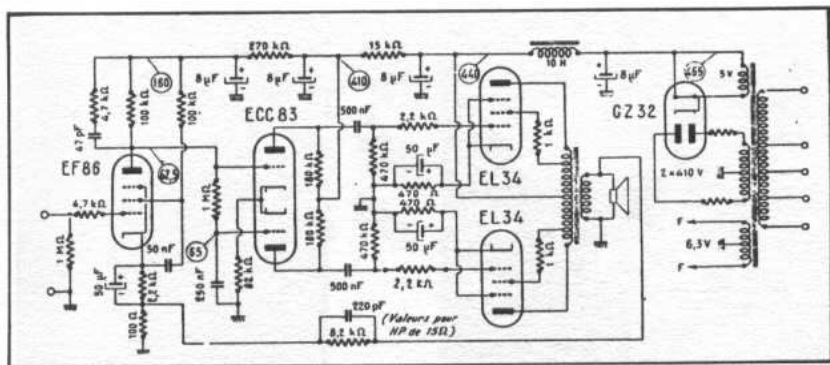


Fig. 9 : L'amplificateur « Mullard » (1956). Montage en ultra-linéaire, puissance 20 W.

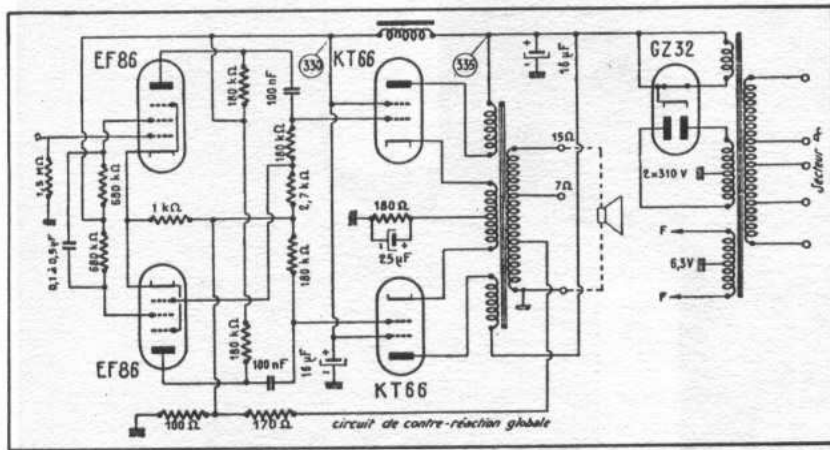


Fig. 10 : L'amplificateur « Quad II ». L'enroulement de cathode a dix fois moins de spires que l'enroulement de plaque. Les écrans étant découplés à la masse et les cathodes étant à un potentiel variable par rapport à la masse, la tension écran-cathode varie comme dans le circuit ultra-linéaire.

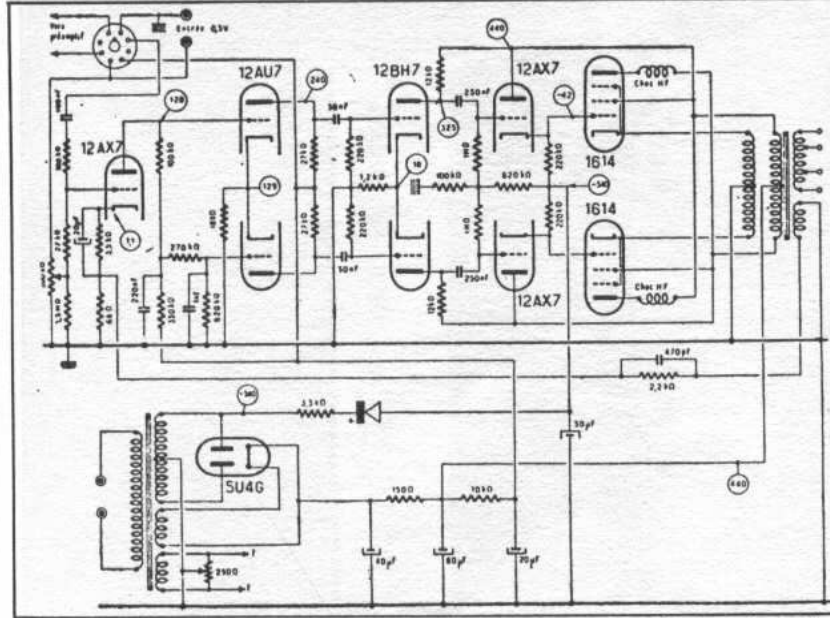


Fig. 11 : L'amplificateur « Mac Intosh ». On notera que l'étage de sortie comporte un transformateur à enroulement bifilaire pour éviter les fuites entre les deux moitiés de l'enroulement primaire.

- Résistance de plaque d'environ 40 kΩ
- Impédance de charge voisine de 8000Ω P à P en push-pull AB1.

Nos critères de choix se sont donc portés sur d'autres paramètres qui sont :

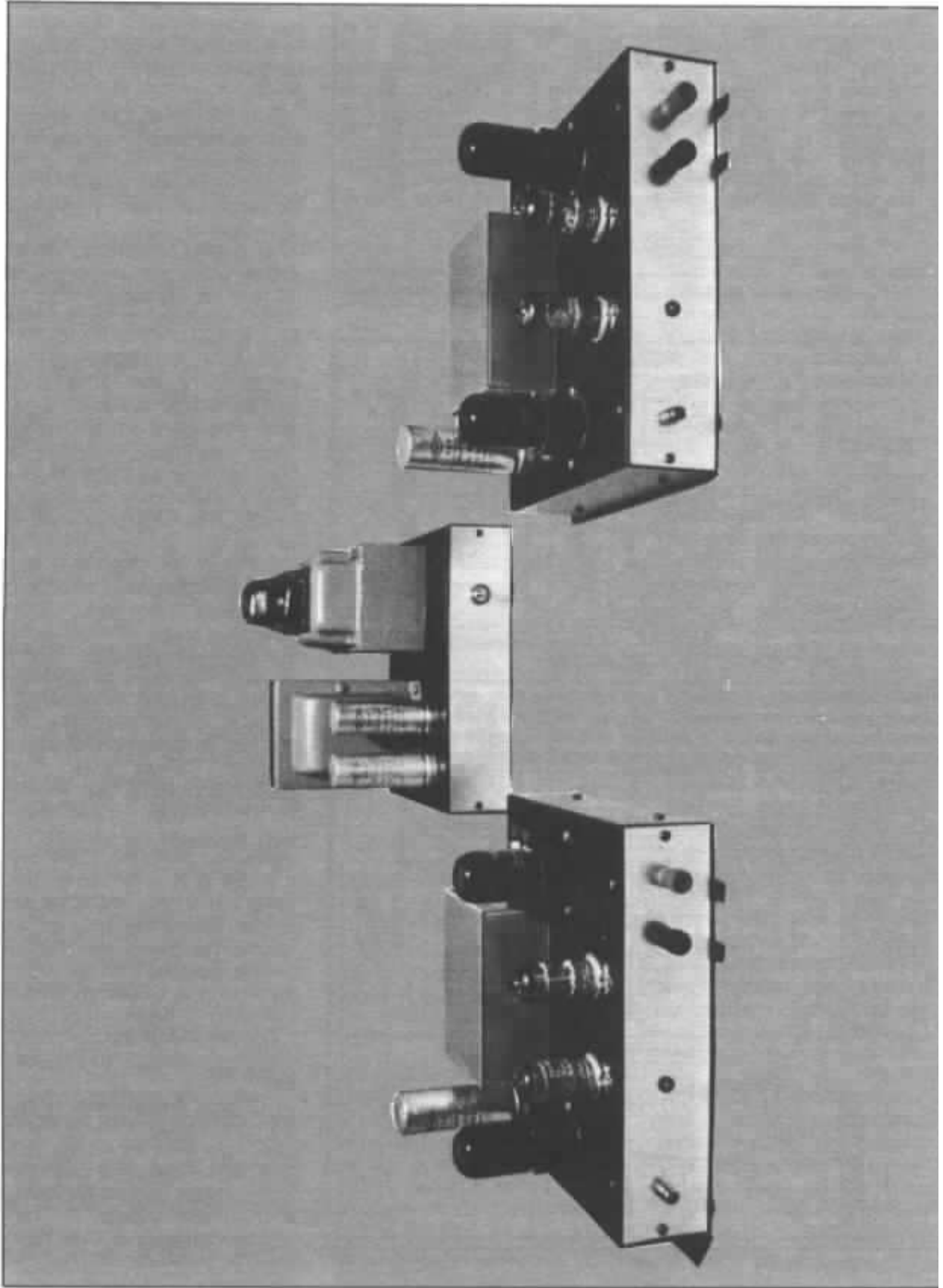
- la distorsion propre du tube en particulier dans le montage ultra-linéaire
- la qualité subjective, liée en grande partie au comportement du tube sur des signaux forts
- la robustesse et la stabilité dans le temps.

Nous avons ainsi testé le 6AQ5, la EL84, la 7189, l'ECL82 moins puissante et le 6V6. C'est cette dernière qui est sortie victorieuse car c'est la seule à être descendue en-dessous de 2% de distorsion harmonique en AB1 ultra linéaire pour 10 W en sortie. Sa réputation de robustesse s'est confirmée tout au long de nos essais et nous le conseillons donc sans réserve. Son culot octal, ses électrodes et son ampoule imposante, surtout en version ancienne (6V6G) sont autant de facteurs rassurants.

Un autre tube, pourtant moins puissant et moins auréolé nous a surpris. Il s'agit de la petite triode pentode ECL82. Monté en triode (écran réuni à la plaque) et chargé par un transformateur de 5000Ω P à P elle nous a donné 6 W avec 2% de DH. Nous avons donc réalisé un prototype équipé de deux de ces tubes, en utilisant la partie triode pour le déphaseur. Le résultat est surprenant de qualité malgré une puissance ne dépassant pas 5 W.

On notera deux particularités importantes dans le montage de 6V6 :

- Chaque tube possède sa propre résistance de cathode découplée. Ceci évite les dérives statiques et les risques d'oscillation par couplage cathodique (cas de la résistance unique).
- Une résistance de 220Ω maintient le potentiel de VG2 au-dessous de VP. Cette précaution



est indispensable dans un montage ultra-linéaire où l'écran est alimenté par une prise intermédiaire, donc à une tension légèrement supérieure à celle de la plaque, ce qui, même pour un tube prévu pour $V_{G2} = V_P$, est dangereux.

Un dernier mot concernant la contre-réaction. Elle n'est que de 11 dB mais suffit à ramener le facteur d'amortissement de 70 à 30 environ avec un transformateur ordinaire. La distorsion est aussi réduite dans un rapport de 3 au moins. La marge de stabilité reste supérieure à 25 dB ce qui est correct. Le condensateur de 150 pF compense la rotation de phase et améliore la réponse sur signaux à flancs raides.

L'alimentation

L'alimentation de cet amplificateur a été construite sur un châssis séparé ; ceci n'est pas indispensable mais évite d'éventuels problèmes d'induction entre transformateurs, soit par rayonnement, soit par conduction au travers des tôles du châssis.

Rappelons qu'un tube nécessite deux tensions de fonctionne-

ment : la tension de plaque ou « Haute tension », continue et filtrée et la tension de filament ou « chauffage », généralement inférieure à 10 V, alternative ou continue.

Génération de la haute tension

Le secondaire du transformateur possède un enroulement 500 V à point milieu capable de délivrer en permanence 150 à 200 mA (chaque 6V6 consomme environ 30 mA au repos).

Le redressement bi-alternance met en œuvre une valve bipolaire à chauffage direct 5U4, utilisée ici avec une grande marge de sécurité. Le chauffage de ce tube est confié à un enroulement séparé et bien isolé de 5 V/3 A.

L'intérêt du tube comme redresseur est double :

— Il fournit une tension exempte de pics de commutations difficiles à éliminer totalement et dont le spectre monte allègrement à plus de 1MHz avec des diodes silicium ordinaires.

— La montée en tension est progressive, évitant de soumettre les tubes froids et les condensateurs de filtrage à des tensions à vide excessives, voire dangereuses.

Le filtrage utilise un classique circuit LC en Pi. Le lissage obtenu est nettement supérieur à ce qu'aurait donné un circuit RC, et cela avec une perte d'insertion et un échauffement pratiquement nul. Ouvrons une parenthèse à propos des valeurs de capacités utilisées ; 50 μF peut sembler ridicule comparé à ce qui se pratique actuellement. Mais n'oublions pas que les impédances mises en jeu dans un système à tubes sont en moyenne 1000 fois plus grandes que pour les transistors. Or, ce qui compte, c'est bien le rapport $\frac{Z_{\text{source}}}{Z_{\text{charge}}}$ et il est ici parfaitement respecté.

De plus, le calcul montre qu'avec les valeurs choisies l'atténuation théorique du 50 Hz est supérieure à 80 dB et celle de 100 Hz de plus de 100 dB. D'une façon plus imagée, nous dirions que 50 μF est à une 6V6 ce que 50 000 μF est à un 2N3055.

Remarquons qu'une fois encore, chaque condensateur chimique est « hybridé » avec un modèle polyester PMT présentant une impédance bien plus faible aux fréquences élevées. L'uti-

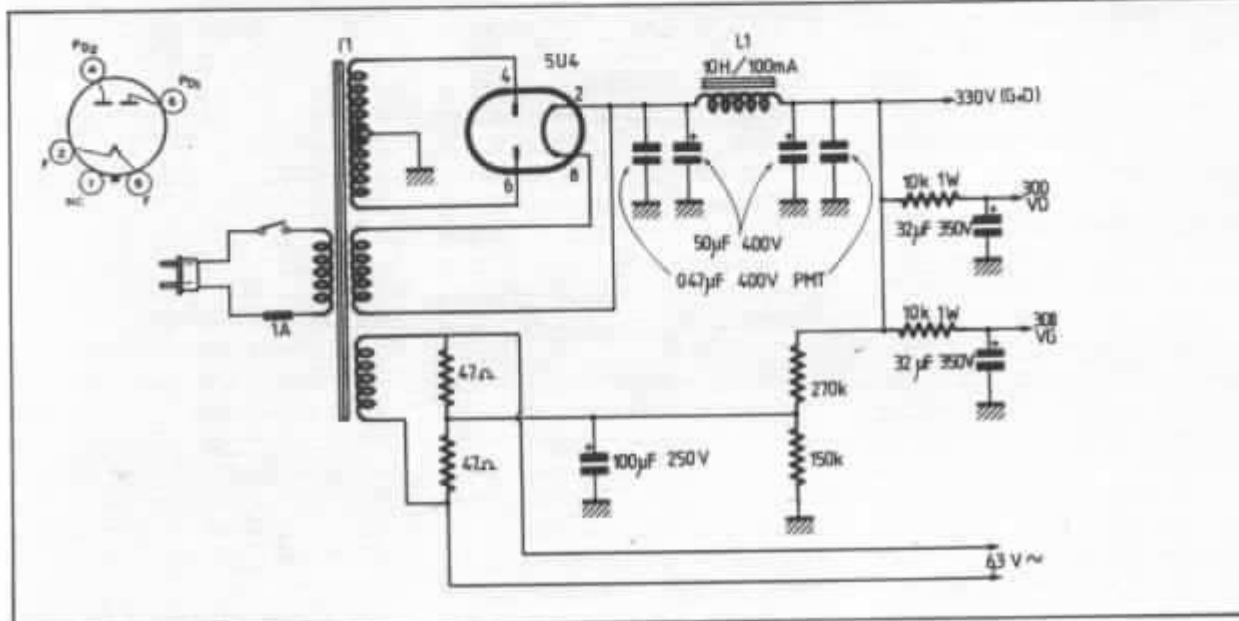


Fig. 12 : Schéma de l'alimentation. Pour les spécifications du transformateur, se référer au texte.

lisation de condensateurs au mica argenté serait peut-être intéressante mais nous ne l'avons pas essayé. On pourrait également remplacer ces chimiques par des condensateurs à huile à haute tension mais ces composants sont extrêmement onéreux et encombrants.

La tension de plaque des quatre 6V6 est donc prélevée en sortie de self. Deux circuits RC indépendants abaissent la haute tension d'une trentaine de volts et découplent efficacement les étages déphaseurs des voies droites et gauches.

Le circuit de chauffage des filaments

Compte tenu des niveaux mis en jeu, un chauffage par courant continu n'aurait rien apporté à notre montage (il n'en irait pas de même pour un préamplificateur) et moyennant quelques précautions classiques (filaments isolés de la masse et « centrés » par un point milieu fictif) le rapport S/B optimum est atteint sans problème. Par contre, un diviseur résistif placé dans le circuit haute tension permet d'élever le potentiel global à environ 100 V afin d'éviter qu'au niveau du déphaseur les filaments ne se transforment en cathodes (voir § Etage déphaseur d'entrée, montage SRPP). Un enroulement secondaire 6,3 V 5 A séparé des deux autres sera nécessaire pour cette fonction.

Les composants passifs

Les résistances seront des modèles à couche carbone/métal ou tantale à 5% de tolérance, ceux qui disposent d'un ohmètre numérique auront intérêt à soigner les symétries surtout dans le déphaseur. Pour les charges de cathode de 6V6 on préférera les résistances bobinées vitrifiées. Les condensateurs polyester seront de préférence des PMT 2R ITT ou Wima MKS4.

La liaison entre alimentation et blocs amplificateurs sera réali-

sée à l'aide de câbles multiconducteurs souples terminés par des connecteurs bouchon Octal.

Ne pas utiliser dans ce montage de fils souples de forte section, mais du fil rigide en cuivre pur recuit et étamé sous gaine PVC ou Teflon, et de 0,6 à 1 mm de diamètre.

Les composants utilisés

On pense, et souvent à tort, que les réalisations à tubes sont affaire de récupération de composants. Si cette démarche peut être valable dans certains cas (châssis, transformateurs de sortie et d'alimentation, pièces mécaniques) il vaut mieux s'abstenir si l'on n'a pas de moyens de contrôle sérieux à sa disposition (ponts RLC, diélectrimètres, etc) d'autant qu'en cherchant un peu, tout est encore disponible chez les revendeurs ou presque. Voici quelques conseils à l'usage des débutants pour acquérir les composants de ce montage et de bien d'autres.

Tubes

N'acheter que des marques connues portant clairement le type et le nom du fabricant sur l'ampoule et l'emballage. Se méfier des cartons blancs anonymes car il peut s'agir, soit de rebuts des marchés d'Etat, soit de surplus militaires, soit, et ce n'est pas mieux, de fabrications d'Europe de l'Est. En ces temps de disette, ces filons juteux refont surface. Dans tous les cas réagir en professionnel et refuser un tube de plus de vingt ans dont le vide est forcément dégradé, à moins qu'il ne soit un objet d'ornement...

Nos essais et nos écoutes nous font préférer le 6V6 de RCA Radiotron (inventeur de ce tube) mais le General Electric est aussi très réputé. Pour les 12AX7/ECC83, les Philips et Telefunken sont excellentes. Ne s'agissant pas d'un montage à bas niveau, il n'y a aucun intérêt à utiliser la série « sécurité »

E83CC, peut-être plus fiable moins bruyante mais beaucoup plus onéreuse. La durée de vie d'une 6V6 en classe AB est d'environ 5000 heures et celle d'une 12AX7 dépasse souvent 20 000 heures, c'est dire la robustesse de ces lampes.

Les condensateurs chimiques

Ils doivent être de fabrication récente (sur les produits sérieux la date de production figure en clair sur le boîtier) car ils se dégradent dans le temps, surtout au stockage. Cette précaution est indispensable pour des modèles haute tension. Trois ans d'âge est un maximum prudent. Les modèles choisis dans notre montage sont des cartouches à fixation vissante contenant deux éléments séparés ($2 \times 50 \mu\text{F}$).

Les supports de tubes

Ils seront des modèles châssis en stéatite (matière blanche analogue à la porcelaine) plus chers mais bien supérieurs aux modèles en bakélite, surtout s'ils doivent chauffer. Le type utilisé est un noval pour les 12AX7 et un octal pour les 6V6 et 5U4.

Le transformateur d'alimentation

Il peut être récupéré ou acheté neuf. Rappelons ses caractéristiques :

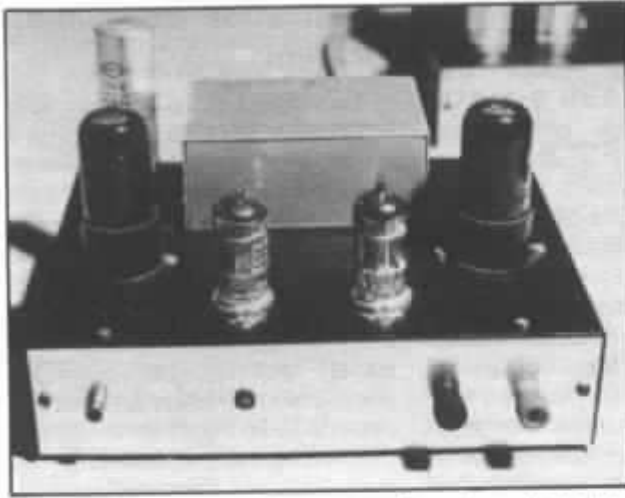
- Primaire - 110 à 240 V (courant 220/240 V)
- Secondaire - 450 à 550 V P.N. 150 à 200 mA, 6,3 V 5 A, 5 V 3 A

La self de filtrage

Elle peut aussi être récupérée ou achetée. Son inductance sera de 5 à 10 Henry, sa résistance ohmique de 200 Ω max et son courant admissible de 200 mA. A défaut, le primaire 240 V d'un transformateur d'alimentation de 25 VA peut convenir.

Les transformateurs de sortie

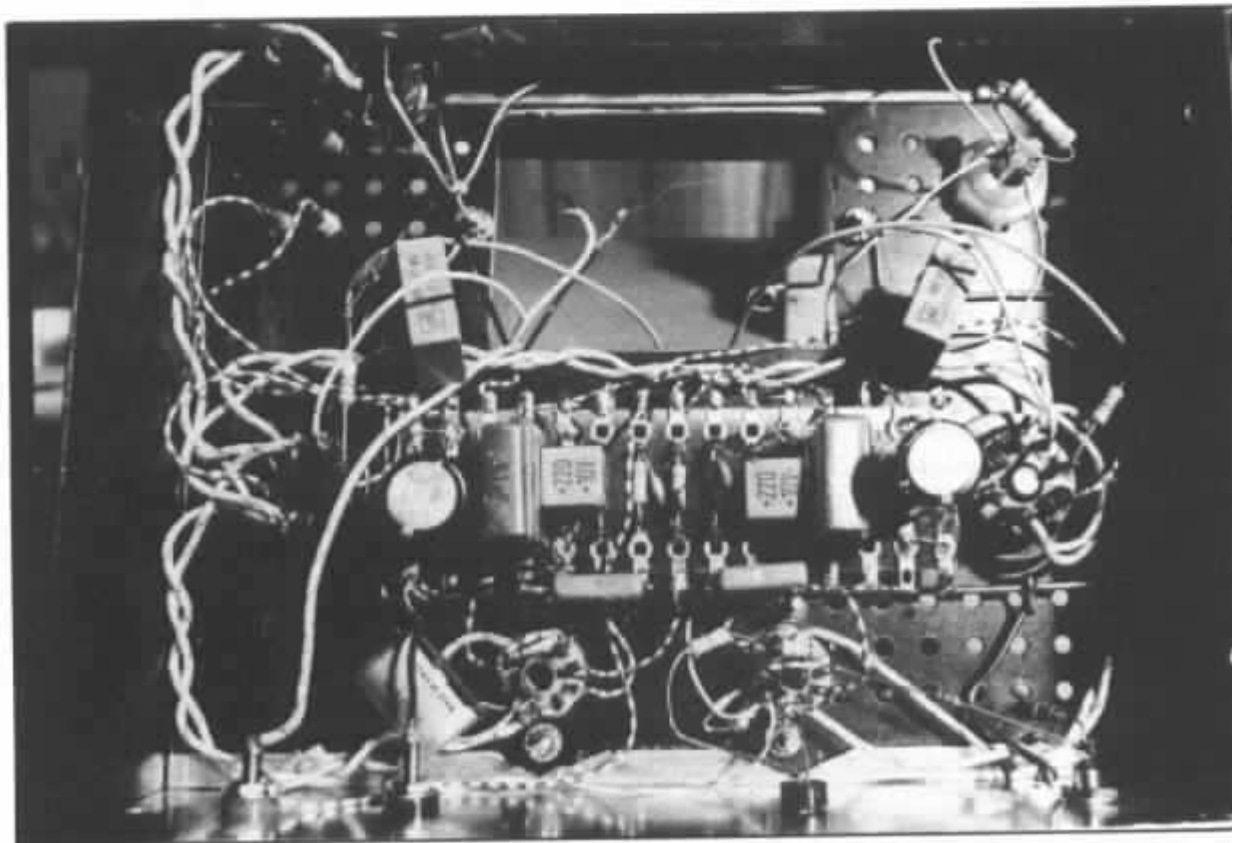
Ce sont les éléments les plus



L'amplificateur terminé avec transformateur de sortie TU 101. Il s'agit là d'un bloc mono. Sur la face avant, à gauche l'entrée, à droite la sortie haut-parleur.



Le bloc alimentation. Il est commun aux deux blocs mono amplificateur.



Détail du câblage d'un bloc amplificateur.

importants de cet amplificateur. Il s'agit d'un modèle très classique en son temps mais qui n'existe plus que sur le catalogue de deux fabricants français : Millerioux et Audax. Voici ses caractéristiques essentielles :

- Primaire - 8000Ω plaque à plaque avec prise d'écran à 30% environ, courant admissible 150 à 250 mA.

- Secondaire - 4, 8, 16 Ω commutable ou 8 Ω.

- Circuit magnétique en tôles croisées (sans entrefer) et à grains orientés ; puissance admissible 30 W à 50 W.

En récupération ou à l'étranger, on peut encore trouver des marques prestigieuses comme Acrosound, Partridge, Savage, Subouncer, Leak, Thordarson, Solar, etc ou des françaises comme Millerioux, L.I.E., Supersonic et Cabasse.

Nous avons essayé sur notre ampli un FHB Millerioux de 1957 et un TU101 Audax de 1984, quatre fois plus petit, et le résultat est intéressant. Comme prévu le Millerioux l'emporte par son aptitude à retranscrire les écarts de niveau et les fréquences extrêmes, la scène sonore est ample et stable quel que soit le niveau d'écoute. Avec le TU101 le son est très propre et défini mais on a l'impression que la bande passante rétrécit à mesure que le niveau monte et que l'image sonore se tasse un peu ; ce sont là des impressions subjectives.

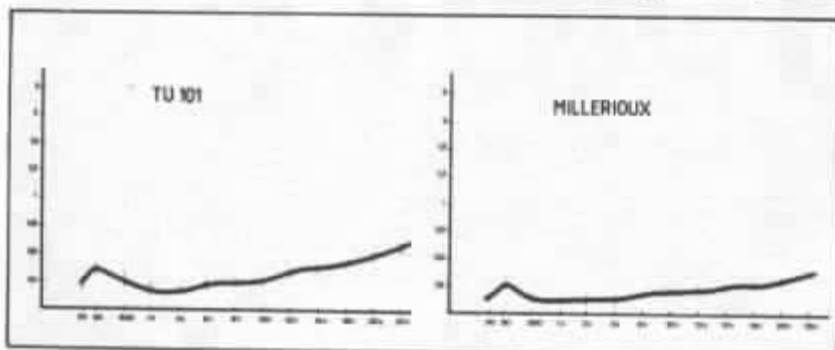


Fig. 13 : Distorsion en fonction de la fréquence pour une puissance de 3 W sur 8 Ω pour chacun des transformateurs Audax TU 101 et Millerioux FHB.

- Puissance max (écrêtage 1 kHz)

Millerioux 14 W, Audax 12 W.

- Bande passante à 5 W dans 1 dB :

avec Millerioux 6 Hz à 32 kHz

Audax 8 Hz à 26 kHz

à noter dans le Audax, une remontée de + 3 dB à 39 kHz (résonance ?)

- Bande passante à 10 W dans 1 dB

Millerioux 6 Hz à 31 kHz

Audax 10 Hz à 21 kHz

Ces chiffres ne disent pas tout mais mettent en évidence l'intérêt qu'il y a à bien choisir le transformateur de sortie ; la qualité de restitution est très dépendante de cet élément et il ne sert à rien de paufiner les autres composants si le niveau de celui-ci est insuffisant. Le Audax TU101 n'est pas la panacée mais

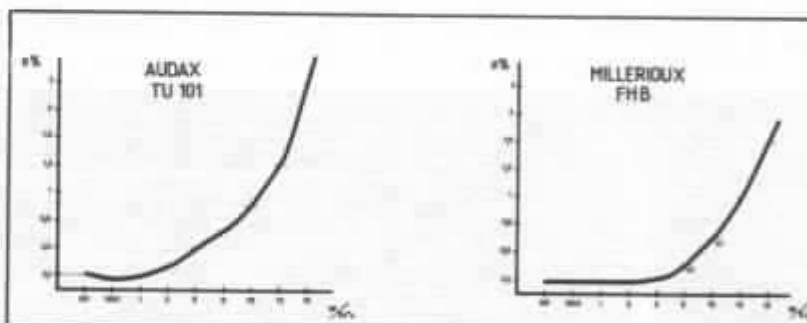


Fig. 14 : Distorsion en fonction de la puissance de sortie pour chacun des transformateurs Audax TU 101 et Millerioux FHB.

pour des écoutes à niveau modéré sur des systèmes bien amortis, ne favorisant pas trop les extrêmes, il peut surprendre

agréablement. Son rapport qualité/prix est de toute façon imbattable et sa disponibilité est encore assurée.

Réalisation de l'amplificateur

Le schéma est si simple que sa réalisation peut être entreprise coup sûr même par un débutant. Bien que cela soit possible nous n'avons pas utilisé de circuit imprimé car nous pensons qu'il est préférable de réaliser dans le cas du tube, rien ne vaut un câblage fil à fil. Dans les circuits à haute impédance et haute tension, les couplages parasites sont toujours à craindre ; il peut s'agir de couplages diélectriques, électriques ou magnétiques. Or malheureusement le circuit imprimé réunit tous ces critères de couplage et fait de :

- La constante diélectrique du support
- Son caractère hydrophil (verre - époxy)
- La largeur et la faible section des liaisons
- Leur situation coplanaire.

Le câblage « vrai » élimine partiellement ces défauts et en cas de difficulté, il est toujours possible de rectifier le tir, ce qui n'est pas évident avec un circuit imprimé. Enfin, dernier point, les circuits imprimés s'accommodent mal du régime thermique des tubes surtout dans les étages de puissance. Cela peut aller du changement de couleur jusqu'à la brûlure complète du support et de

pistes, entraînant parfois la chute des composants au fond du boîtier...

Notre propos n'étant pas, pour l'instant du moins, de faire un guide de montage, nous nous contenterons d'énoncer ici quelques principes de base pour un câblage correct.

Le châssis doit être choisi suffisamment vaste et rigide pour supporter sans tassement tous les éléments du montage ; préférer un châssis en tôle d'acier traitée de 8 à 12/10 plus difficile à travailler que l'aluminium mais plus stable et soudable à l'étain. Prévoir un capot inférieur démontable et percé de quelques ouïes d'aération. Un capot supérieur en grille ou en tôle extrudée peut être utile mais pas indispensable.

L'implantation doit être logique et se rapprocher du schéma ; placer les éléments par affinités mutuelles. N'installez pas les tubes d'entrée près du transfo de sortie ou les chimiques contre les tubes, laissez un espace suffisant autour des tubes de puissance pour qu'ils puissent évacuer leurs calories. Une bonne solution consiste à percer quelques trous radiaux autour des supports pour faciliter la convection naturelle au travers du châssis. Eloigner le plus possible les prises d'entrée et de sortie. Le bon sens en somme.

Les retours de masse ne s'effectueront jamais « au petit bonheur » en un point quelconque du châssis mais sur une **ligne de masse isolée** de ce dernier sauf en un **point soudé** de préférence à proximité de l'entrée BF. On

utilisera à cette fin un fil de cuivre rigide et nu de 2 à 3 mm de \varnothing qui cheminera au fond du châssis, près des supports de tubes, et maintenu isolé de celui-ci par des petits blocs de plexiglass ou de bakélite collés ou vissés.

Le câblage s'effectuera toujours dans le même ordre en employant des fils isolés et rigides de couleurs différentes suivant les fonctions (par ex. : jaune pour les filaments, vert pour la BF, noir pour la masse, orange pour le 300 V, rouge pour le 330 V). La plupart des liaisons s'effectueront avec les composants eux-mêmes mais on peut être amené à employer des barrettes relais (en fibre de verre ou en stéatite. On placera d'abord la ligne de masse, puis le câblage des filaments effectué à partir de l'embase d'alimentation vers les tubes de puissance puis les tubes d'entrée, au moyen de deux fils rigides torsadés serrés, de 1,5 à 2,5 mm² car le courant est important.

On amènera ensuite la haute tension près des tubes sur des colonnettes à plusieurs cosses à l'aide de fils de couleur vive (!), la tension la plus élevée allant directement au transfo de sortie. Nous préférons un montage court et direct, plutôt que truffé de renvois et de rallonges, même si l'esthétique y perd un peu.

Une sage précaution consiste à étudier sur papier le câblage et l'implantation avant d'allumer le fer à souder. Il est aussi très commode de repérer l'attribution des cosses de supports (au marker sur le châssis). Les liaisons BF seront mises en place en dernier.

La vérification sera faite de préférence par un « candide » et répétée deux fois au moins avant de passer aux essais.

Les essais sont simples. On placera tous les tubes sauf la valve pour s'assurer qu'ils « éclairent » normalement. Puis on mettra la valve en place. Au bout de quelques secondes, il se peut que le transfo de sortie siffle ou « grogne », dans ce cas inverse le câblage du secondaire car l'ampli oscille par réaction positive. On contrôlera ensuite les tensions du montage, en particulier la haute tension, la tension de plaque des 6V6 (280 à 300 V), la tension de cathode (environ 18 V pour le courant de repos de 30 mA) qui doit être égale à 2^e près sur les 6V6 d'un même ampli, et enfin la tension de cathode des déphaseurs qui est d'environ 2 V par rapport à la masse pour la triode inférieure.

Si tout est normal, l'amplificateur doit fonctionner correctement, c'est-à-dire qu'il ne doit faire aucun bruit (ou extrêmement faible) sans signal à l'entrée mais doit être capable de fournir environ 10 W sur 8 Ω avant écrêtage. Les plus outillés pourront effectuer un test complet des performances.

En ce qui concerne l'alimentation le principe est le même, et plus simple. La seule précaution est de ne pas placer le transformateur et la self avec leurs circuits magnétiques parallèles (ce qui causerait de la mutuelle induction, donc du ronflement).

L'exemplaire photographié dans cet article a été réalisé, sans assistance extérieure, par un novice de moins de vingt ans et a fonctionné du premier coup.