

The Tube

un surprenant amplificateur à tubes



Gerd Reime (Allemagne)

Cet amplificateur original se distingue par de très bonnes performances et une esthétique hors du commun. Construction artisanale, circuits d'audiophile et tubes à vide conjuguent aspects nostalgiques et apparence moderne.

J'ai construit mon premier amplificateur à tubes en 1971, je n'avais alors que 15 ans. Il était animé par deux EL84 fonctionnant en push-pull et utilisait un schéma trouvé dans Elektor. Le reste des composants provenait de vieilles radios. Peu de temps après, j'ai commencé un apprentissage de technicien radio et télévision chez Grundig. Plus tard, j'ai travaillé en R&D. Ayant pris ma retraite, j'avais à cœur de travailler sur un projet original. Je pensais à un modeste amplificateur de puissance de 10 à 15 W utilisant deux EL84, comme autrefois, mais amélioré.

Au départ, je voulais que l'esthétique du boîtier sorte des sentiers battus, mais pris de passion pour la technique des lampes, je tentai de mettre au point le meilleur circuit possible à l'aide de nombreux essais et mesures. Ce qui n'était qu'un projet amusant devint très sérieux. Ceux qui souhaitent s'inspirer de mes idées trouveront l'essentiel dans la description qui suit. Les instructions complètes sont plutôt élaborées et trop vastes pour un article d'Elektor. Pour le détail, vous pouvez consulter le fichier PDF disponible en téléchargement [1].

Considérations préliminaires

De nombreux audiophiles ne jurent que par les amplificateurs à tubes. Pourquoi ? La chaleur du son et la douceur de la réponse à la saturation sont souvent cités. Presque tous les circuits que je connais fonctionnent avec une rétroaction négative (ou contre-réaction), mais quels sont ses effets ?

Comme le suggère son nom, la tâche d'un amplificateur audio est d'amplifier le faible signal d'une source audio afin qu'un haut-parleur puisse le reproduire. Pour cela, la tension et le courant du signal audio doivent être amplifiés afin que la bobine et le cône du haut-parleur *dynamique* (le plus utilisé) puissent être entraînés avec une amplitude suffisante pour que l'oreille les entende convenablement. C'est facile avec les amplificateurs à semi-conducteurs, mais les amplificateurs à tubes fonctionnent avec des tensions plutôt élevées et donc des courants plutôt faibles, qui ne peuvent pas attaquer directement un haut-parleur. Un transformateur de sortie est généralement nécessaire pour adapter l'impédance. Depuis toujours les amateurs passionnés de hi-fi tentent de répondre à la question de savoir quel est le meilleur transformateur.

En outre, la caractéristique de fonctionnement des tubes n'est pas linéaire sur une plage aussi étendue qu'on le souhaiterait. La contre-réaction parvient à réduire la distorsion du signal audio qui en résulte. Une partie du signal de

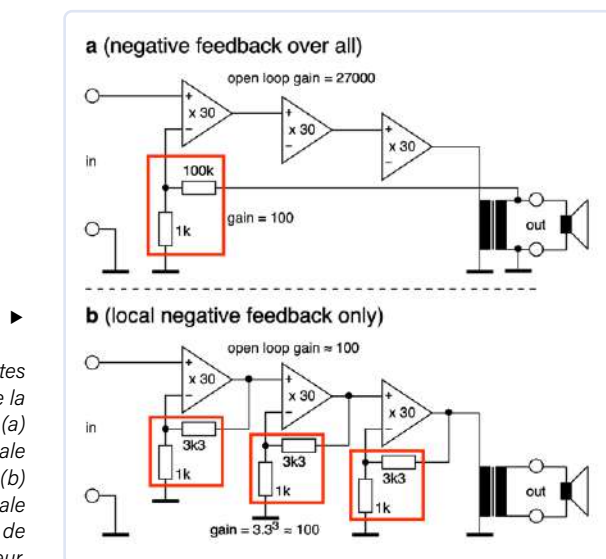
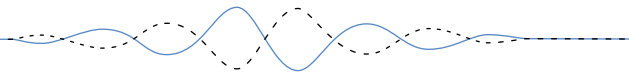


Figure 1. Différentes approches de la contre-réaction : (a) contre-réaction globale classique et (b) contre-réaction locale à chaque étage de l'amplificateur.



sortie est renvoyée en opposition de phase vers l'entrée, et le gain élevé en boucle ouverte (très « excédentaire » par rapport au gain final de l'amplificateur) réduit les non-linéarités qui se produiraient autrement. Sur la **figure 1a**, la contre réaction est fournie par le diviseur de tension entouré en rouge. Toutes les non-linéarités et tous les signaux de distorsion générés dans l'amplificateur sont réduits d'un facteur égal au rapport *gain en boucle ouverte* / *gain défini par la contre réaction*. Dans l'exemple de la figure 1a, ce facteur vaut $27\,000/100 = 270$. Comme la contre réaction est censée réduire toute la distorsion de ce facteur, les défauts de conception ont moins d'effet.

Une alternative à une forte contre réaction globale (de la sortie du haut-parleur à l'entrée du 1^{er} étage de l'amplificateur) consiste à limiter le gain de chaque étage d'amplification par une contre réaction locale. Sur la **figure 1b**, c'est le rôle des trois diviseurs de tension entourés en rouge et correspondant fonctionnellement aux résistances d'anode et de cathode des tubes). Cela linéarise chacun des étages d'amplification, et donc l'ampli tout entier qui ne produit qu'une faible distorsion et n'a pas besoin de contre réaction globale. La question est de savoir si cela fait une différence et si c'est perceptible à l'écoute.

La différence la plus frappante avec un amplificateur à semi-conducteurs est la présence d'un transformateur de sortie en amont du haut-parleur. Le transformateur de sortie est soit à l'intérieur de la boucle de rétroaction (**figure 1a**), soit à l'extérieur (**figure 1b**).

On peut s'attendre à ce que le schéma de la **figure 1a** ait une caractéristique tension/fréquence assez droite. Mesures sur ce type d'amplificateur le confirment (**figure 2a**). La courbe en tension est très plate, mais la courbe en courant montre une forte baisse autour d'1 kHz car l'impédance du haut-parleur est maximale à cette fréquence. Par conséquent, une chute de puissance peut également être observée à 1 kHz. Avec le transfo à l'extérieur (**figure 2 b**) l'impédance de charge est plus élevée à 1 kHz : la tension augmente et la chute de courant n'est pas aussi forte. La variation d'impédance du haut-parleur influe donc moins sur la puissance de sortie, ce qui devrait se traduire par un son plus fidèle. Un effet similaire se produit en basse fréquence, à la résonance du woofer autour de 60 Hz (**figure 3**). Là encore, la variation d'impédance du haut-parleur influe moins si le transfo de sortie est hors de la boucle de contre réaction. J'ai répété ces mesures avec divers haut-parleurs, elles donnent en général un résultat analogue.

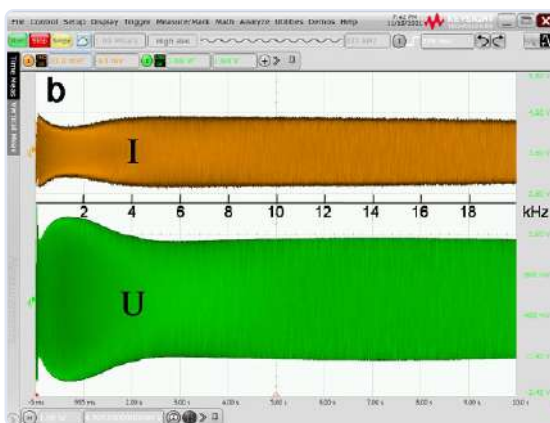
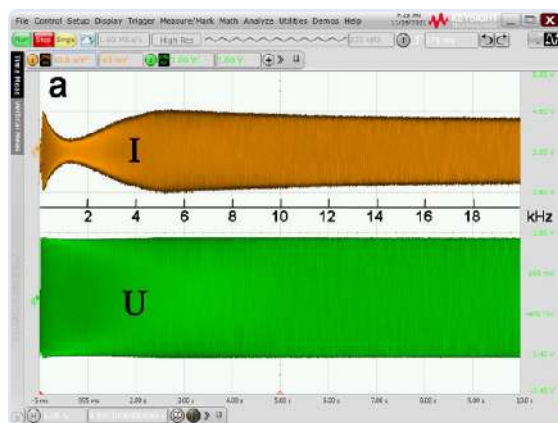


Figure 2. Courant (ocre) et tension (vert) sur la gamme de fréquences (20 Hz à 20 kHz) : (a) contre-réaction globale classique et (b) contre-réaction locale.

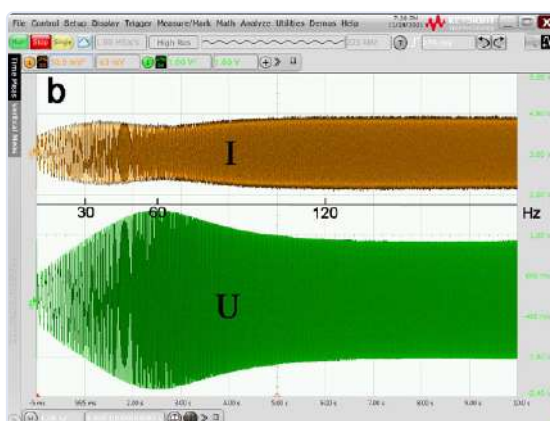
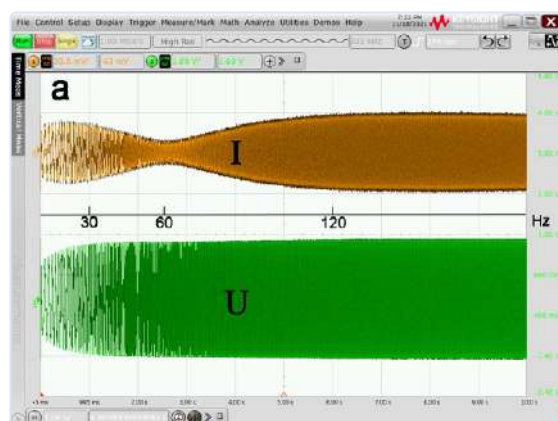
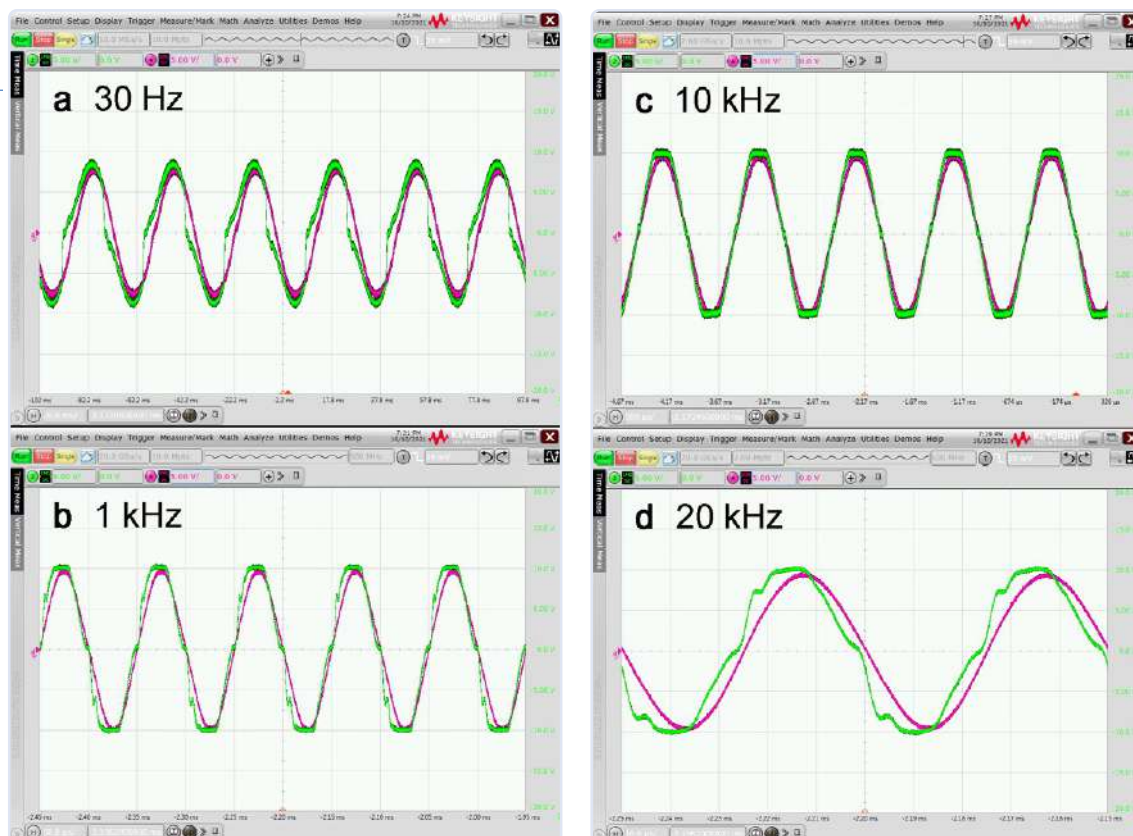


Figure 3. Courant (ocre) et tension (vert) dans la région des basses : (a) contre-réaction globale classique et (b) contre-réaction locale.

Figure 4. Comportement en saturation à différentes fréquences (vert = contre réaction globale classique ; rouge = contre réaction locale).



Pour conclure, un ampli à tubes sans contre réaction du HP vers l'un des premiers étages (version b) a un comportement sensiblement différent d'un ampli classique (version a). Bien sûr, je ne me suis pas limité à ces simples mesures sur les deux versions ; j'ai également demandé à des collègues de participer à des essais d'écoute. Les résultats sont clairs : la version b, sans contre réaction globale, est toujours arrivée en tête dans ces comparaisons. Le son était ressenti comme nettement plus chaud et plus équilibré. Selon le genre musical concerné, la présence était ressentie comme plus intense. Ces deux résultats corroborent sans surprise ceux des mesures.

Autre différence : à faible volume ou puissance, un étage de sortie push-pull de classe A/B fonctionne en classe A et présente donc naturellement moins de distortion. C'est pourquoi à faible volume, avec ou sans contre réaction et un bon transformateur de sortie, la distortion harmonique devrait être similaire. La surprise vint du circuit sans contre réaction globale qui avait un contenu harmonique nettement inférieur, en particulier en classe A. Par ailleurs, les meilleurs transfos de sortie sont à mon avis ceux de Menno Van der Veen [2].

Écrêtage et saturation

C'est notoire, si on pousse le volume, un ampli à tubes écrête le signal en douceur, lorsque les tensions de pointe du signal approchent les tensions d'alimentation. Ce sont en général, les tubes de sortie et le transfo de sortie (qui entre en saturation dans ces moments-là) qui limitent l'amplitude. C'est aussi là que la contre réaction globale devient problématique car lorsque l'écrêtage se produit, la rétroaction force les étages amont non limités en gain

à piloter l'étage de sortie encore plus fort, ce qui entraîne directement une forte augmentation de la distortion harmonique. Sans cette forme de contre réaction, l'augmentation de la distortion harmonique est nettement plus douce en cas de saturation des étages de sortie.

Les transformateurs de sortie sont souvent incapables de transférer de fortes puissances, en particulier à basse fréquence de l'ordre de 20 à 30 Hz. C'est pourquoi les effets négatifs de la contre réaction deviennent audibles dans la partie TBF du spectre, même à faible puissance. À cela s'ajoutent les effets de la courbe de phase du transfo qui produisent aussi des effets sonores indésirables dus à la contre réaction.

Mes mesures à différentes fréquences avec 10 % de saturation confirment ces considérations. Les signaux de l'ampli avec contre réaction locale (en rouge) sont systématiquement meilleurs que ceux (en vert) plus ou moins déformés de l'ampli avec contre réaction globale (figure 4). Avec la contre réaction globale, à 20 kHz les différences sont spectaculaires et à 30 Hz des dégradations notables sont visibles. Il est intéressant de noter qu'à cette fréquence de 30 Hz, 10 % de saturation représentent 85 % du signal nominal. En résumé, on peut affirmer à juste titre qu'un écrêtage vraiment doux et sans effet perturbateur notable n'est possible qu'avec une contre réaction locale.

Contrôle du volume à correction physiologique

On lit souvent que seule une réponse linéaire est correcte. En corollaire, tout bon amplificateur doit avoir une

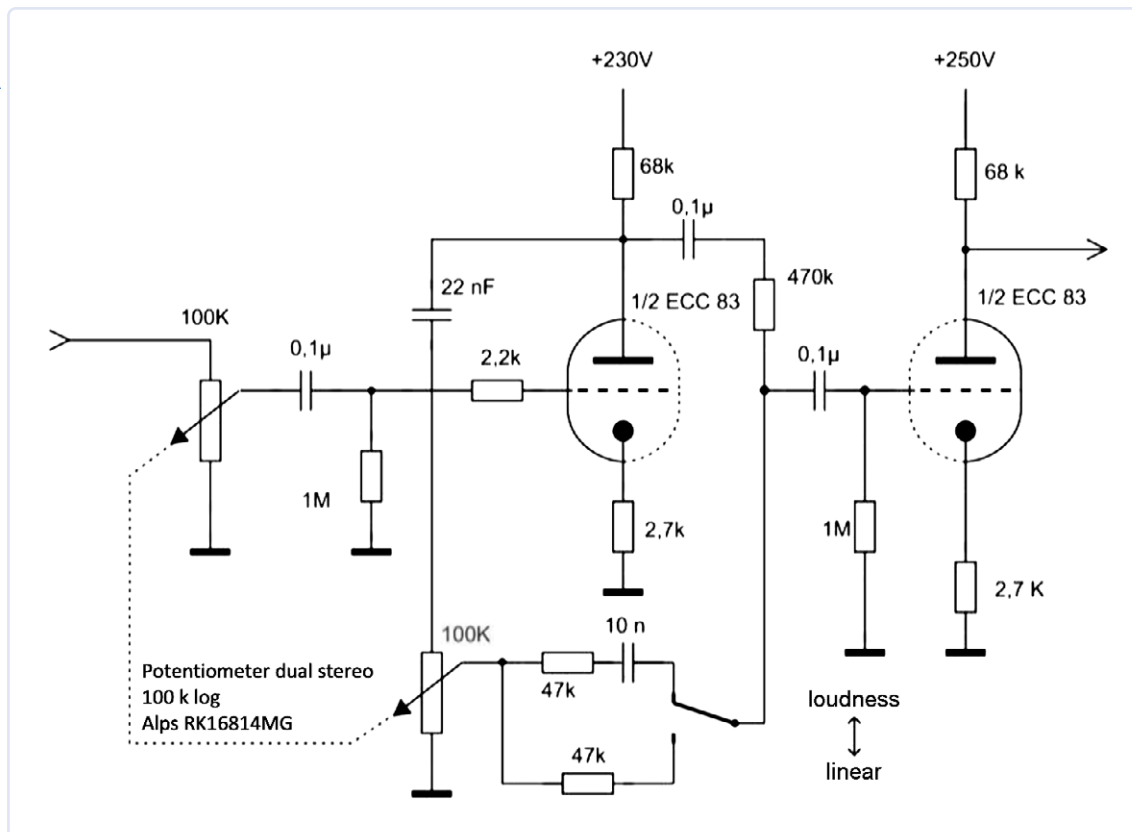


Figure 5. Commande de volume à correction physiologique avec potentiomètre Alps quad.

réponse en fréquence plate. Je soupçonne en revanche que l'exigence d'une réponse en fréquence plate soit en fait basée sur le fait que les potentiomètres avec prises ne sont plus disponibles aujourd'hui. Les circuits équivalents (que l'on trouve uniquement en ligne) restent très moyens. La raison à tout cela, c'est qu'à faible volume, l'ouïe humaine est moins sensible aux hautes et basses fréquences, ou (question de point de vue) elle privilégie les fréquences moyennes.

Autrefois, la compensation de cette non-linéarité auditive, la correction physiologique, était standard. Le principe est d'accentuer les hautes et basses fréquences à faible volume, et de diminuer progressivement cet effet quand le volume augmente. Mais combien d'amplificateurs modernes offrent cette fonction ? Pratiquement aucun.

À côté des potentiomètres vintage à deux ou trois prises, de toute façon non idéals en raison des pas, il y a d'autres solutions plus élégantes. Prenez un potentiomètre stéréo double (en fait un potentiomètre quadruple) comme on en trouve encore chez Alps et ailleurs. Avec cela et un circuit simple, on peut réaliser une excellente commande de volume à correction physiologique. En outre, un simple commutateur permet de passer de la correction à la linéarité, sans modifier l'ampli.

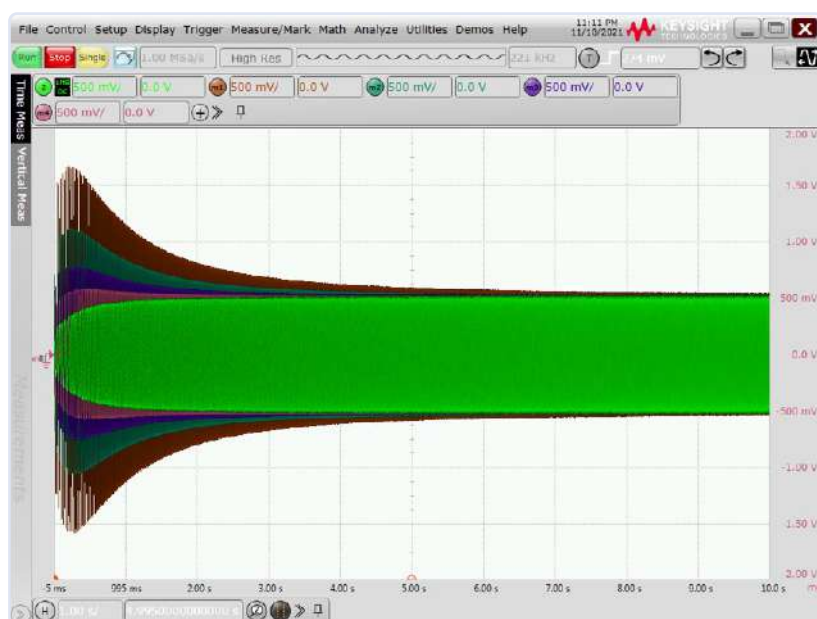
J'ai conçu un circuit avec le potentiomètre Alps *RK16814MG* (figure 5). Ce potentiomètre est motorisé, mais au besoin, le moteur peut être retiré pour actionner le potentiomètre manuellement. Pour quantifier l'effet du contrôle de compensation auditive, j'ai mesuré et normalisé au même niveau de signal à 1 kHz

la réponse en fréquence pour différents réglages, et j'ai superposé les courbes. L'effet sur les basses est visible sur la figure 6. On voit clairement que la correction de la réponse diminue progressivement quand l'intensité sonore augmente.

Pilotage des tubes de sortie

Les étages push-pull ont bien sûr besoin de signaux déphasés de 180°. Par rapport à un circuit simple à un seul tube, le schéma d'une voie de *The Tube* ajoute un brin de complexité et améliore la qualité audio (figure 7).

Figure 6. Effet de la commande physiologique : **marron** = faible niveau sonore ; **vert foncé** = calme (musique de fond) ; **bleu** = niveau sonore moyen ; **rouge** = assez fort (réponse en fréquence linéaire) ; **vert** = intensité sonore maximale juste avant saturation.



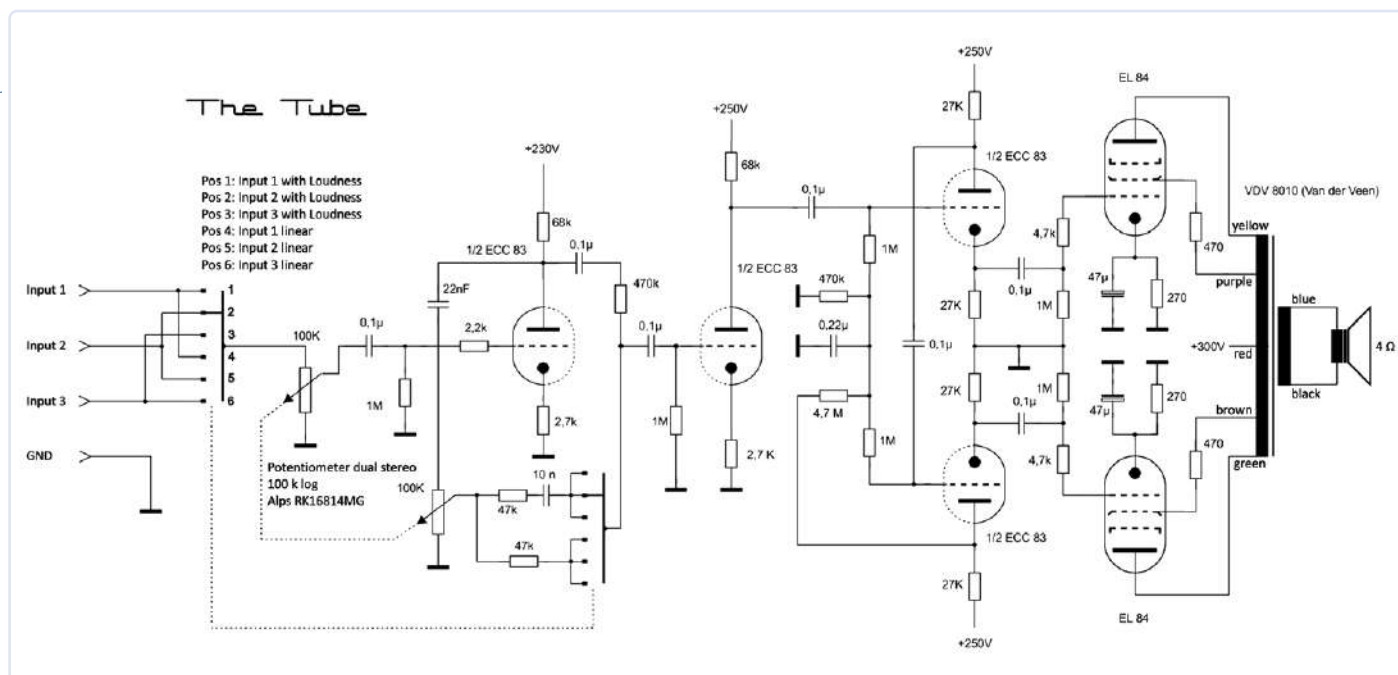


Figure 7. Schéma électronique d'une voie de *The Tube*.
Caractéristiques originales : commande de volume à correcteur physiologique et commande symétrique des tubes de sortie push-pull.

Chaque tube de sortie EL84 est piloté par son propre cathode follower (1/2 ECC83). Grâce à des résistances d'anode et de cathode identiques, la triode du haut pilote avec précision la grille de celle du bas pour produire un déphasage symétrique presque parfait. Ce schéma réduit la distorsion et les erreurs de phase. Ainsi, on obtient un amplificateur correct avec un son « tube » typique, mais sans distorsion harmonique, malgré l'absence de contre réaction globale. Divers essais d'écoute comparatifs confirment que ce schéma est (subjectivement) meilleur qu'un amplificateur à tubes haut de gamme très coûteux et gourmand en énergie (classe A oblige) et qu'il

fait même mordre la poussière à de bons amplificateurs à semi-conducteurs.

La schéma de base de l'alimentation est relativement simple (figure 8). Pour les détails, voir le lien [1].

Construction

L'idée a germé quand mes fils ont trouvé quelque part un lot de gros tubes métalliques. J'ai été convaincu sur le champ que des « tubes » seraient idéals pour abriter un amplificateur à... tubes.

Le recto de la plaque supérieure en aluminium massif accueille les jolis supports des tubes. Comme on peut le voir (figure 9), les tubes de l'étage intermédiaire sont voisins des tubes de sortie. En raison du dégagement de chaleur attendu, il n'est pas question d'utiliser du plastique ici.

Le verso de la plaque d'aluminium (figure 10) est équipé d'entretoises sur lesquelles la « carte à circuit imprimé » est vissée. Les guillemets sont de rigueur pour deux

Figure 8. Le schéma de l'alimentation électrique est assez simple.

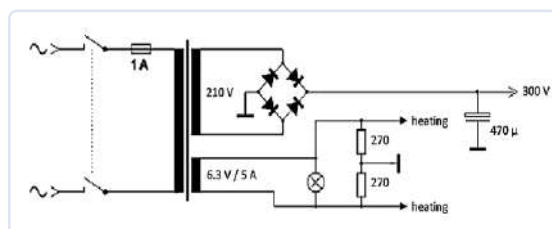


Figure 9. Construction mécanique attrayante pour les composants électroniques : les douilles de tous les tubes de l'amplificateur stéréo.



Figure 10. Les entretoises s'accordent très bien à la plaque d'aluminium massif.



Figure 11. Conçu spécifiquement pour les tubes : un « circuit imprimé » en laiton massif.

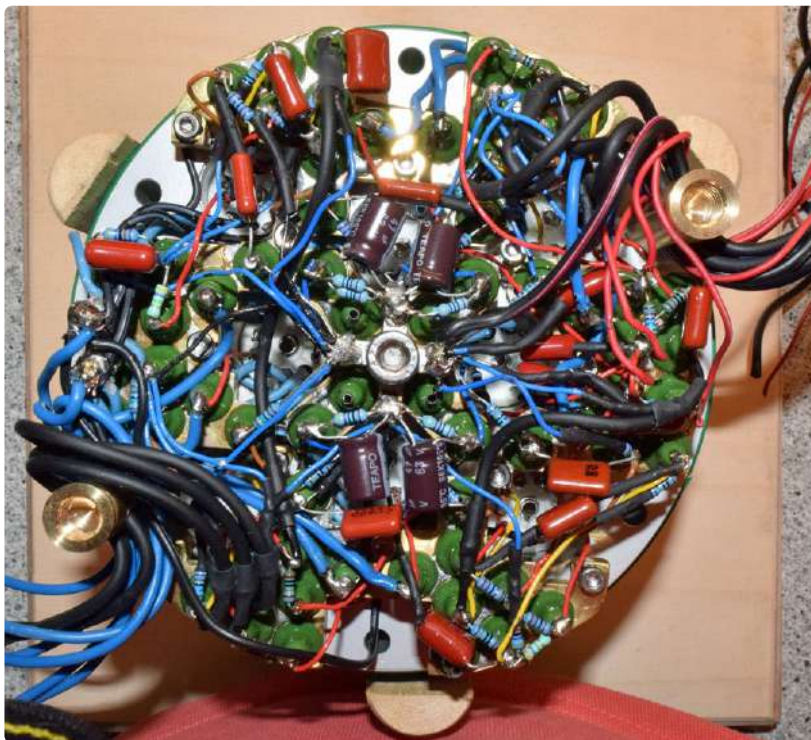


Figure 12. Plots de soudure avec isolateurs en verre vert presque vintage.

raisons : d'une part un circuit imprimé ce n'est pas courant dans un amplificateur à tubes et d'autre part, il est composé de supports de composants (figure 11) fraisés dans des plaques de laiton massif et il n'y a pas d'époxy. Après tout, il n'y a aucune raison de négliger l'esthétique des composants internes d'un tel amplificateur à tubes. Le verso de la plaque d'aluminium avec les parties en laiton usiné et les jolis plots de soudure à isolateurs en verre vert le prouve (figure 12).



Figure 14. Les gros condensateurs électrolytiques ont leur propre plaque de laiton.



La plaque entièrement assemblée est très propre (figure 13). Une autre « carte » accueille des composants plutôt grands, tels que des condensateurs électrolytiques (figure 14). D'autres plaques-support en laiton ont dû être usinées pour le transformateur d'alimentation, circulaire puisque toroïdal, admirez ! (figure 15). Bien sûr, cela ne clôt pas le chapitre mécanique. Assez logiquement, le panneau avant est un anneau en aluminium sur lequel sont montés le sélecteur d'entrée, l'interrupteur

Figure 13. Vue de dessous (côté soudure) de la « carte » entièrement assemblée. Un peu de fouillis, mais c'est parfaitement robuste.



Figure 15. Tout sera rond, même le transfo, ou cela ne sera pas. Ici aussi, des pièces mécaniques de fixation sont nécessaires.

Figure 16. Les commandes (commutateur d'entrée, interrupteur d'alimentation et potentiomètre de volume) sont montées sur un anneau d'aluminium usiné distinct.



Figure 17. Assemblage provisoire de l'amplificateur complet, sans le boîtier tubulaire de protection.

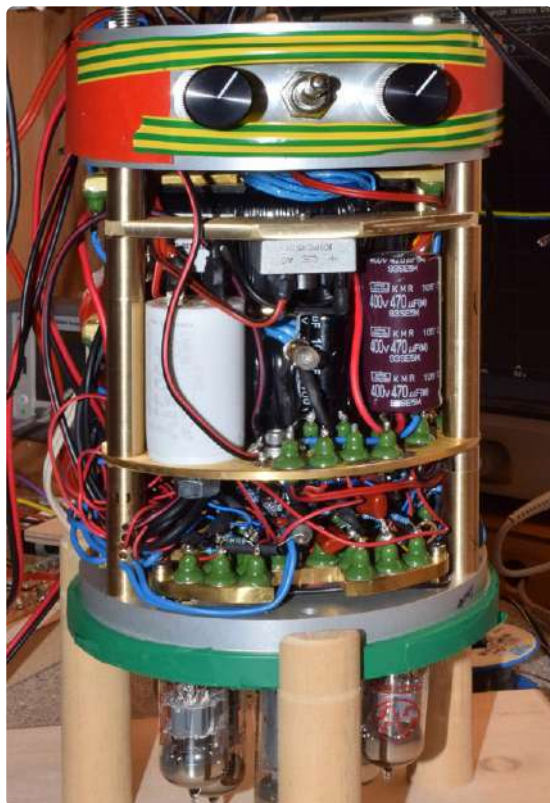


Figure 18. L'amplificateur terminé dans toute sa gloire. Un vrai bijou — plus que compatible avec un salon.

d'alimentation et le potentiomètre de réglage du volume (figure 16). L'assemblage provisoire présenté (figure 17) donne une bonne impression de cette disposition. Et maintenant - roulement de tambour ! - l'amplificateur terminé dans son boîtier (figure 18).

Si on soigne bien les détails, un tel amplificateur à tubes affirme toujours une forte esthétique qui souligne sa technologie. Mais ne manque-t-il pas quelque chose d'important ? Comme tout amplificateur, *The Tube* nécessite des connecteurs d'entrée des signaux audio faibles et de sortie des signaux puissants vers les haut-parleurs.

Figure 19. Une cavité à l'arrière abrite tous les connecteurs : entrées, sorties et alimentation secteur.



Par ailleurs, le secteur doit atteindre le transformateur d'alimentation. Une cavité dans le boîtier tubulaire a résolu la question (figure 19). Elle abrite les fiches Cinch plaquées or pour les entrées, les prises XLR des haut-parleurs et un connecteur d'alimentation pour le câble secteur.

Vous vous sentez inspiré ?

Comme le montre ce projet, pour un amplificateur à tubes, concevoir un bon circuit n'est que la moitié de l'histoire. Pour paraphraser Thomas A. Edison, à un pincée d'inspiration (électronique) il faut ajouter pas mal de transpiration (mécanique). Si vous voulez vous inspirer de mon projet, sachez qu'il faudra mettre beaucoup d'efforts dans la réalisation afin d'obtenir un amplificateur à tubes qui non seulement sonne bien, mais aussi attire les regards. Le vieil adage « *no pain, no gain* » prend tout son sens avec la technologie des tubes. ◀

220089-04 — VF : Yves Georges

À propos de l'auteur

Après un apprentissage de technicien en radio et télévision, Gerd Reime a travaillé successivement dans les services de développement de Grundig et Nokia. Il est titulaire de plusieurs brevets.

Des questions, des commentaires ?

Si vous avez des questions techniques ou des commentaires sur l'article, envoyez un courriel à l'équipe de rédaction d'Elektor (redaction@elektor.fr).



Produits

➤ **Elektor Audio Collection (clé USB)**
(SKU 19892)
<https://www.elektor.fr/19892>

➤ **Livre en anglais « The State of Hollow State Audio », R. A. Honeycutt (Elektor 2020)**
www.elektor.fr/19170

LIENS

- [1] Description complète du projet (PDF) : <https://www.elektormagazine.fr/220089-04>
- [2] Transformateurs Van der Veen : <https://www.mennovanderveen.nl>