

# Triodes en Faibles Tensions

## Amplificateurs linéaires sous-alimentés

De Merlin Blencowe (traduit de l'anglais par Romain Boissard)

### Introduction

Traditionnellement, le terme « starved amplifier » (amplificateur sous-alimenté) était d'abord synonyme d'une pentode opérant avec une très faible tension de grille, mais toujours avec une alimentation conventionnelle de l'anode à une forte tension. On a trouvé que sous des conditions optimales, de tels circuits pouvaient fournir un gain extrêmement élevé – bien plus qu'avec de fortes tensions – et quelques ingénieurs ont exploité ces propriétés pour des amplificateurs d'instrumentations. Avec tant de gain de base disponible, un gros feedback négatif pouvait être utilisé<sup>1</sup>.

Cependant, mon but n'est pas de discuter des pentodes sous-alimentées ; une grande quantité d'information existe déjà à ce sujet<sup>2,3</sup>. A la place, j'examinerai l'utilisation de triodes ordinaires opérants sous des conditions vraiment sous-alimentées, c'est-à-dire en-dessous de 12 V. J'ai choisi cette valeur car c'est la plus forte tension que la plupart des adaptateurs secteur / alimentations régulées fournissent. Aussi, on reconnaît largement que l'amplification linéaire est pratiquement impossible sous de telles conditions, mais, comme j'espère le démontrer, ce n'est pas forcément vrai.

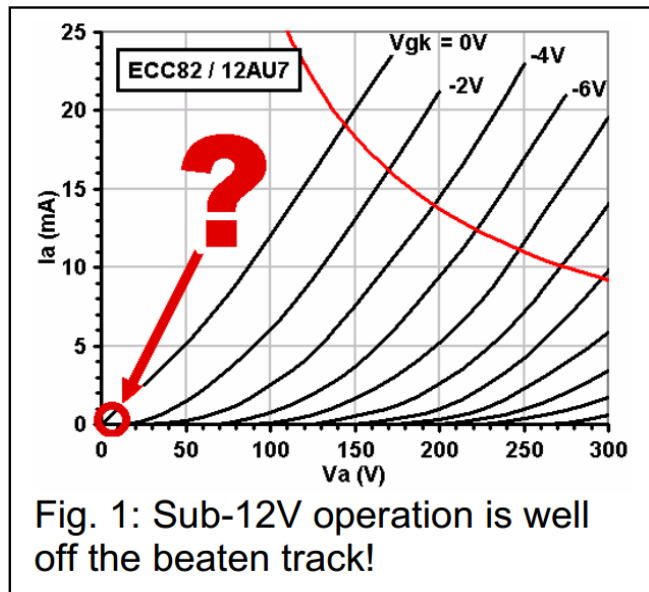
### Caractéristique d'anode

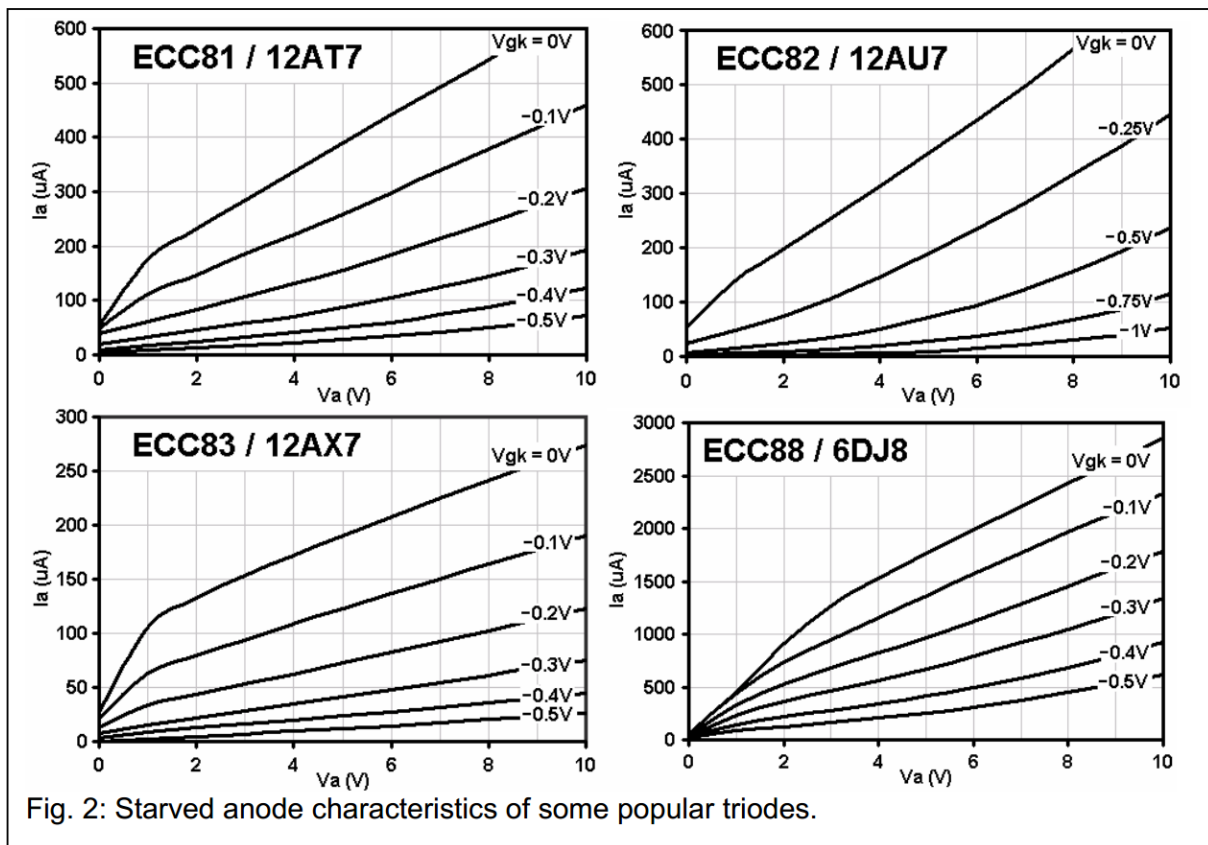
Les documentations techniques ne fournissent pas d'information utile pour une utilisation avec de très faibles tensions et les modèles SPICE sont tout aussi inutiles. En fait, la **figure 1** devrait donner une idée à quel point nous nous aventurons hors des sentiers battus ! C'est pourquoi j'ai décidé de relever les caractéristiques d'anode de quatre types populaires de lampes à des tensions d'anode jusqu'à 10 V (car mon oscilloscope dispose opportunément de dix divisions horizontales). J'ai aussi relevé le courant de grille, dont l'importance deviendra claire le moment venu.

J'ai trouvé que l'appariement des triodes dans le même tube est généralement bon ; presque autant que vous pourriez vous y attendre dans une utilisation ordinaire à fortes tensions, mais la variation entre différents tubes du même type est plus large, particulièrement avec les ECC81 et ECC83 où la résistance d'anode ( $r_a$ ) peut varier jusqu'à 50% autour de sa valeur moyenne. Cependant, cette variation n'est pas si importante qu'on ne puisse s'y adapter avec un circuit de polarisation (bias) variable, comme décrit plus loin.

La **figure 2** montre les caractéristiques d'anode que j'ai obtenues. Elles ont été produites en mesurant dix tubes choisis au hasard pour chaque type (de provenances et fabricants variés), puis en moyennant les résultats. Bien que la forme des courbes soit très différente de celles auxquelles on s'attend à hautes tensions, les « qualités de base » de chaque type restent cohérentes. Par exemple, l'ECC88 laisse apparaître la meilleure linéarité, le plus fort  $g_m$  et la plus faible  $r_a$ . L'ECC83 a un grand  $\mu$  et la plus forte  $r_a$ , alors que l'ECC81 a aussi un fort  $\mu$  mais une plus faible  $r_a$ , similaire à celle de l'ECC82.

Au départ, nous pourrions nous attendre à ce que l'ECC88 soit le meilleur choix pour s'amuser avec les faibles tensions puisqu'elle semble offrir le plus fort gain et la meilleure linéarité. En effet, elle peut très bien fonctionner dans un circuit hybride. Cependant, pour des raisons qui paraîtront évidentes, l'ECC82 est la lampe de choix, je l'ai donc utilisée dans la plupart de mes circuits de test.

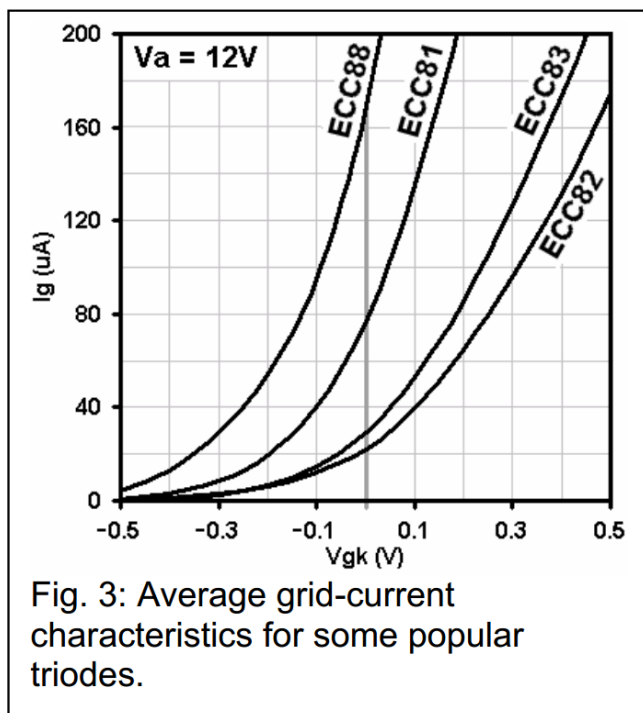




## Courant de grille

La **figure 3** montre le courant moyen pour les mêmes lampes et les résultats ne sont pas surprenants. Le courant de grille augmente généralement avec  $g_m$  car cela demande un faible espacement grille-cathode. L'ECC82 est une exception car elle a une grille enroulée grossièrement (faible  $\mu$ ) qui n'attire donc pas beaucoup d'électrons malgré un faible espacement grille-cathode. Le talon d'Achilles de l'impressionnante ECC88 est qu'elle pompe un courant de grille deux fois plus élevé que l'ECC81 et près de huit fois celui de l'ECC82 ou l'ECC83 ! Le courant de grille est ce qui compte vraiment dans la conception d'amplificateurs sous-alimentés car nous n'avons pas d'autre option que d'opérer avec une très faible polarisation de la grille, dans la région où les courants de grille ne peuvent pas être négligés<sup>4</sup>. Lorsqu'on travaille avec de hautes tensions, nous ne nous inquiétons normalement pas de cela et la résistance d'entrée de la grille est considérée comme infinie, mais ce n'est très clairement pas le cas maintenant que nous sommes coincés dans la région des courants de grille.

L'inverse du gradient (ou l'inverse de la dérivée, ou encore l'inverse de la « pente S », NDT) de la courbe du courant de grille représente la résistance d'entrée de la grille et, avec une polarisation d'environ -0.25 V, cela fait près de 20 k $\Omega$  pour une ECC82 ou ECC83, alors que cela fait près de 7 k $\Omega$  pour une ECC81 et à peine 3.6 k $\Omega$  pour une ECC88 ! Lorsque la tension de grille devient plus positive, la résistance d'entrée chute encore plus.



Pour cette raison, les circuits sous-alimentés auront presque toujours besoin d'être attaqués par une source à faible impédance.

Purement, ces courbes ne s'appliquent que pour une tension d'anode de 12 V. Pour des tensions d'anode plus faibles, le courant de grille augmentera puisque l'anode devient moins performante pour attirer les électrons vers elle, loin de la grille. Heureusement cependant, les variations sont négligeables pour des tensions d'anode entre environ 3 V et 15 V, au moins dans la région qui nous intéresse.

Des quatre types de lampes testées, l'ECC82 était la plus favorable par son plus faible courant de grille, une bonne cohérence entre les différents échantillons testés et c'était aussi la moins chère du lot (en tout cas, là où je vie). Bien qu'elle ait le plus faible  $\mu$  du lot, cela la rend moins délicate à polariser que les autres et, avec de si faibles oscillations en tension disponibles (en sortie, NDT), nous n'avons de toute façon probablement pas besoin d'avoir un gain monstrueux.

Puisque nous devons maintenant combattre les courants de grille, nous devons traiter la lampe plutôt comme un transistor et la polariser en manipulant la tension de grille ; la polarisation de cathode ordinaire n'est plus une option convenable. A la place, les trois méthodes de polarisation les plus pratiques sont :

- Alimenter la grille directement par une source DC de faible impédance (par ex un ampli op).
- Polarisation traditionnelle par courant de grille (relié à la masse, NDT).
- Polarisation par courant de grille en « pull-up » (relié à l'alimentation, NDT).

Ces méthodes sont explorées ci-dessous.

## Circuits hybrides

La **figure 4** montre un exemple de circuit qui utilise un ampli op pour alimenter la grille. Puisque l'ampli op ne peut pas alimenter sa sortie jusqu'à la masse (l'ampli op est alimenté en 12 V non symétrique, la sortie des amplis op est souvent limitée à une portion réduite de la tension disponible sur l'alimentation, dans ce cas, probablement de 1 V à 11 V et la sortie de l'ampli op ne peut donc pas être prévue pour fonctionner à 0 V ou même un peu en-dessous, NDT), une résistance de cathode est ajoutée pour que la tension de travail de la cathode soit d'environ 3 V, et la tension de grille juste en dessous de cela. En faisant varier le potentiomètre, la sortie DC de l'ampli op – et donc la polarisation de la grille – peut être altérée pour convenir à différentes lampes, permettant de trouver vraiment facilement des conditions de travail optimales. Cet ampli op pourrait bien sûr être configuré pour un gain plus qu'unitaire.

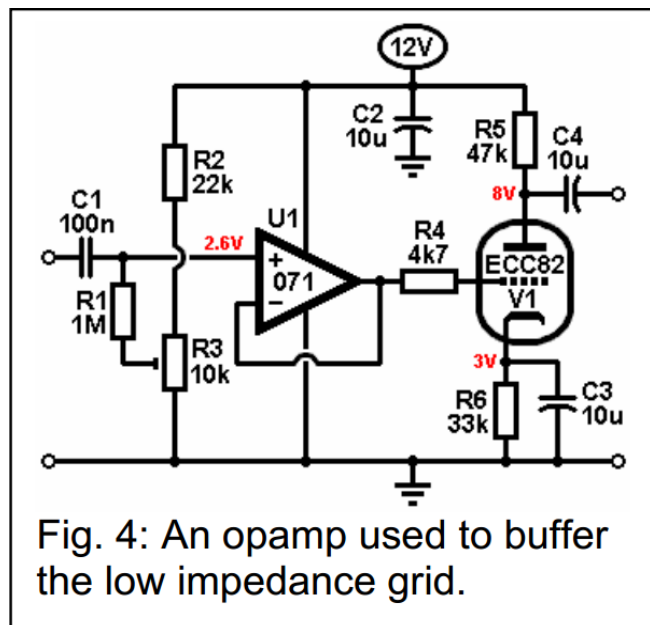


Fig. 4: An opamp used to buffer the low impedance grid.

Le frein de grille R4 peut nécessiter quelques explications car son boulot est très spécifique. Sans cette résistance, la distorsion est ce que vous attendriez d'une triode : principalement des harmoniques du 2<sup>nd</sup> et 4<sup>ème</sup> ordre avec quelques unes du 3<sup>ème</sup> et supérieur. Cependant, en autorisant le courant non-linéaire de la grille à circuler à travers un frein de grille, la tension du signal qui apparait sur la grille sera pré-distordue ou compressé sur les alternances positives. La lampe amplifie alors ce signal et le distord encore mais, cette fois, sur les alternances opposées, si bien que le signal final de sortie se retrouve *moins* distordu qu'avant que la résistance ne soit ajoutée ! Le prix payé pour cela est une réduction du gain puisque le frein de grille forme un diviseur de potentiel avec la résistance d'entrée de la grille.

La valeur du frein de grille qui optimise cette annulation de distorsion doit être trouvée par expérimentation. J'ai trouvé que 4.7 kΩ était assez bon pour l'ECC82 et encore assez proche pour l'ECC81/3. Une valeur trop élevée tend à trop pré-distordre le signal et décale la signature harmonique du circuit d'ordres principalement pairs vers des ordres principalement impairs (Les musiciens devraient vouloir exploiter ce fait !).

Le gain en tension de ce circuit était de 7.5 avec une ECC82 et la sortie maximum avant une distorsion visible sur une onde triangulaire était de 1.5 Vp-p (crête à crête, NDT). A 4 Vp-p, le THD dépasse 3% (Total Harmonic Distortion, NDT).

L'impédance de sortie du circuit précédent était élevée, environ 20 kΩ, mais celui-ci pourrait être « bufferisé » avec un autre ampli op (consiste à diminuer le courant de sortie d'un circuit, NDT). Cela ouvre la possibilité de « bootstrapper » (consiste généralement à ajouter un « feedback » positif qui favorise les conditions de démarrage, NDT) la résistance d'anode, comme montré dans la **figure 5**. La charge de l'anode a été séparée en deux parties et la sortie de l'ampli op est reliée à la jonction à travers une capacité. Cela grossit la valeur effective de R6, la faisant ressembler à plusieurs méga-ohms, et faisant ainsi, le courant à travers la triode devient constant (la droite de charge devient horizontale) et le gain de l'étage devient égal au  $\mu$  de la triode. De plus, puisque le courant d'anode est maintenant constant et que  $\mu$  ne varie que peu, la distorsion générée par la lampe est réduite et nous n'avons plus besoin de frein de grille pour annuler la distorsion (à moins que nous ne voulions délibérément ajouter de la distorsion). En fait, une petite valeur a été retenue pour faire bonne mesure, principalement pour isoler l'ampli op des capacités parasites.

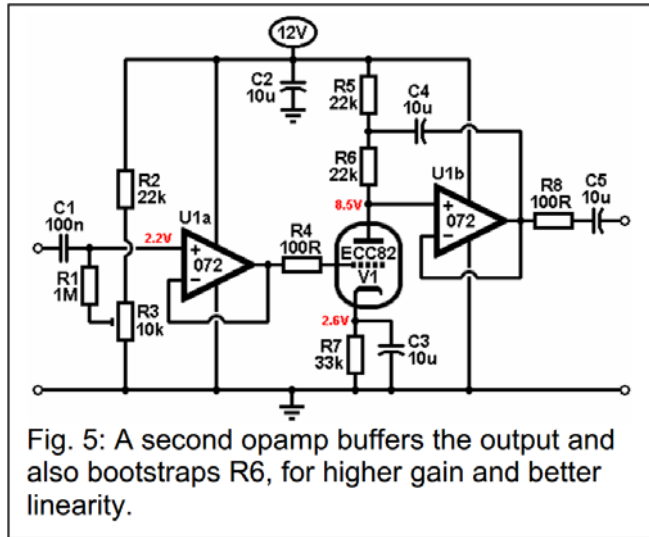


Fig. 5: A second opamp buffers the output and also bootstraps R6, for higher gain and better linearity.

Grâce au « bootstrapping », le gain du circuit a bondit à 15 avec une ECC82, ou 35 avec une ECC81. La distorsion à 4Vp-p en sortie était trop faible pour moi pour la détecter avec les fonctions FFT (Fast Fourier Transform, NDT) de mon oscilloscope ! Grâce au faible gain inhérent à la conception avec des triodes sous-alimentées et la liberté d'utiliser de larges capacités de couplage, la bande passante à -1dB de tous les circuits que j'ai essayé était plus grande que 10 Hz – 100 kHz.

Cependant, certains lecteurs remarqueront rapidement que, dans le domaine de l'amplification linéaire, utiliser des amplis op pour accompagner des lampes n'a pas tellement de sens ; après tout, nous pourrions tout simplement construire un circuit basé uniquement sur des amplis op et ne pas s'embêter avec des lampes qui n'apportent que distorsion, bruit et autres limitations.

D'un autre point de vue, si nous *voulons* réellement une distorsion à base de lampe pour, par exemple, un effet musical, cette approche est alors très sensée. Les amplis op peuvent faciliter une forte impédance de sortie, faible impédance d'entrée (sortie et entrée relatives à la lampe, NDT), gain additionnel pour obtenir l'overdrive de la lampe, des interrupteurs électroniques sans clicks (soit les grésillements dues aux mauvais contacts dans les interrupteurs mécaniques, soit le bruit caractéristique des interrupteurs à relais couramment utilisés avec des lampes, NDT) et un hôte pour d'autres commodités. La seule chose qu'ils *ne* fournissent *pas* est une distorsion gracieuse, contrairement aux lampes, ce qui rend le mariage judicieux ! Cela devrait particulièrement intéresser quiconque joue de la guitare électrique ...

## Circuits composés uniquement de lampes

Si nous voulons en fait concevoir un simple étage *composé uniquement de lampes* pour la hifi (j'utilise le terme a minima), nous devons alors nous tourner vers la polarisation par courant de grille. La polarisation par courant de grille traditionnelle consiste simplement à connecter une résistance de fuite directement entre la grille et la cathode, et le courant de grille qui circule alors en boucle développe une tension négative sur la grille, comme illustré en **figure 6** (si vous vous demandez ce qui alimente ce circuit, c'est la charge de l'espace elle-même) - (il s'agit d'une blague de l'auteur, que vous n'alliez pas imaginer n'importe quoi, NDT).

Cependant, certaines personnes font l'erreur d'essayer d'utiliser des valeurs courantes pour la résistance de fuite comme 1 MΩ, mais cette valeur est bien trop élevée pour un fonctionnement sous-alimenté ; cela polarisera la triode à sa limite de fonctionnement ( $V_g$  très négatif, NDT) ! De manière adéquate, si nous visons une polarisation de 0.2 V avec l'ECC82, alors nous déduisons de la **figure 3** que le courant de grille est estimé à environ 9  $\mu$ A. La loi d'Ohm nous donne la résistance nécessaire :  $R_g = 0.2 / 9 \times 10^{-6} = 22 \text{ k}\Omega$ .

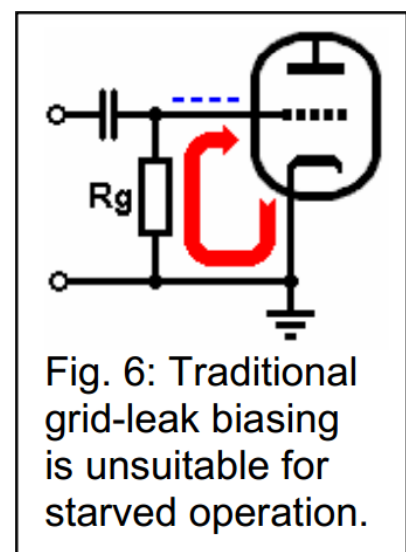


Fig. 6: Traditional grid-leak biasing is unsuitable for starved operation.

Même la résistance de fuite correcte a une grosse insuffisance. La résistance d'entrée de la lampe était déjà plutôt faible, mais avec une autre résistance en parallèle, elle devient encore d'autant plus faible ! Puisqu'il n'y a apparemment aucun avantage à utiliser cette méthode de polarisation dans des conditions de sous-alimentations, elle peut être rejetée.

Une approche plus utile est la polarisation par courant de grille en « pull-up ». Cela n'implique rien de plus que de connecter la résistance de fuite à l'alimentation plutôt qu'à la cathode. Par exemple, si la tension d'alimentation est de 12 V et que nous voulons à nouveau une tension de grille de -0.2 V, alors la chute de tension autour de la résistance de pull-up doit être de 12.2 V. On a déjà montré que le courant de grille était de 9  $\mu$ A donc la résistance de pull-up doit être :  $R_g = 12.2 / 9 \times 10^{-6} = 1.4 \text{ M}\Omega$ . Cela est assez grand pour n'avoir presque aucun effet sur l'impédance d'entrée du circuit.

Cela peut avoir l'air étrange – obtenir une tension de grille négative d'une résistance connectée à l'alimentation positive – mais c'est simplement ainsi que les choses fonctionnent dans le monde des circuits sous-alimentés. De plus, cette méthode vous autorise à jouer avec des polarisations de grille nulles voire positives (dans un circuit avec de si faibles tensions, aucun mal ne sera fait à la triode avec cette méthode). D'ailleurs, cette méthode de polarisation est mentionnée dans un brevet pour une pédale de distorsion pour guitare électrique, bien que les concepteurs ne comprenaient apparemment pas pourquoi cela fonctionnait<sup>5</sup> !

La **figure 7** montre un circuit basique utilisant cette polarisation en pull-up. La polarisation optimale pour les meilleures performances a été trouvée par expérimentation. La méthode précédente d'annulation de distorsion peut être utilisée ici, mais le gain sera sacrifié (avec un circuit hybride, un manque de gain n'est généralement pas un problème puisqu'il peut être fait via les amplis op). Un compromis avec une valeur de 1 k $\Omega$  a été utilisé dans mon circuit de test, donnant une impédance d'entrée mesurée d'environ 11 k $\Omega$ . C1 doit être de type non-polarisé (NP) car la tension de grille est généralement négative mais sera positive avant que la cathode ne chauffe.

L'impédance de sortie de l'anode est plutôt élevée, bien sûr, mais elle pourrait être bufferisée avec un transistor à fort gain. La **figure 8** montre une version qui alimentera une charge de 10 k $\Omega$  sans trop de soucis.

Cependant, nous nous retrouvons de nouveau avec un circuit hybride, alors remplaçons le transistor par un montage à anode commune (cathode follower) et produisons le circuit de la **figure 9**. C'est le plus simple étage sous-alimenté et uniquement composé de lampes que je puisse envisager, tout en obtenant des performances tolérables. La résistance de pull-up est remplacée par un potentiomètre qui permet à n'importe quelle ECC81/2/3 d'être utilisée. Le potentiomètre devrait être ajusté jusqu'à ce que la tension mesurée sur l'anode soit entre 5 V et 6V, ou vous pouvez utiliser vos oreilles pour trouver la meilleure position. En utilisant une ECC82, j'ai mesuré un gain de 8.5 et la sortie maximale avant distorsion visible était de 2 Vp-p. A 4 Vp-p, le THD était toujours inférieur à 2%, principalement des harmoniques du second ordre. C'est en fait meilleur que le circuit hybride de la **figure 4**, ce qui laisse supposer que le montage anode commune pourrait lui-même contribuer à annuler la distorsion ...

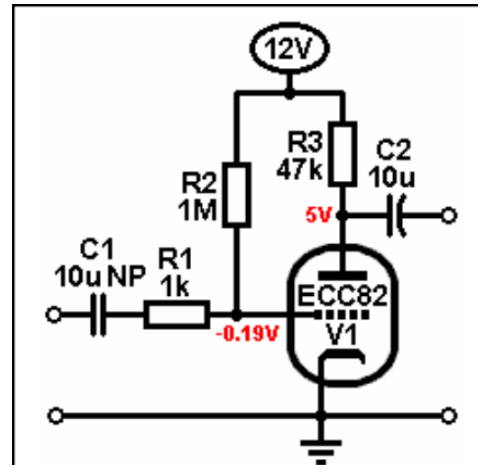


Fig. 7: Pull-up grid-leak biasing maximises input impedance and allows a greater range of grid bias than traditional grid-leak biasing.

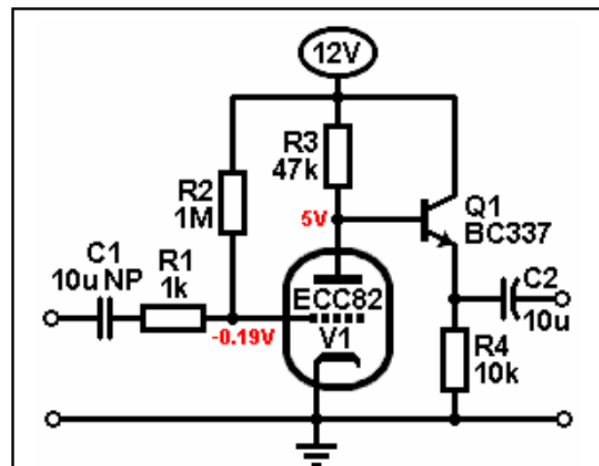


Fig. 8: Output buffered by a high-gain transistor.

La plus lourde charge que le circuit peut raisonnablement alimenter (après le potentiomètre de volume) est d'environ 100 k $\Omega$ . Essayer d'obtenir plus de tension en réduisant R5 résultera en un plus fort courant de grille dans V1b, ce qui détériore les performances de V1a. Vous pourriez être tenté de déplacer le contrôle du volume vers l'entrée, mais la distorsion en souffrirait à cause de la faible impédance non-linéaire; ce circuit a vraiment besoin d'être attaqué par une source à faible impédance.

L'alimentation *doit* être régulée en tension si l'on veut s'attendre à de faibles interférences / bruit, donc si vous utilisez un adaptateur secteur / alimentation ordinaire, soyez sûr qu'il mentionne « régulé(e) » ! (Mais évitez les variétés à découpage car elles peuvent rester assez bruyantes.) Le courant d'anode est inférieur à 1 mA mais les filaments auront besoin de 150 mA, ou 300 mA si vous faites une version stéréo bien sûr. Heureusement, il est facile d'acheter une alimentation régulée fournissant 300 mA ou 500 mA.

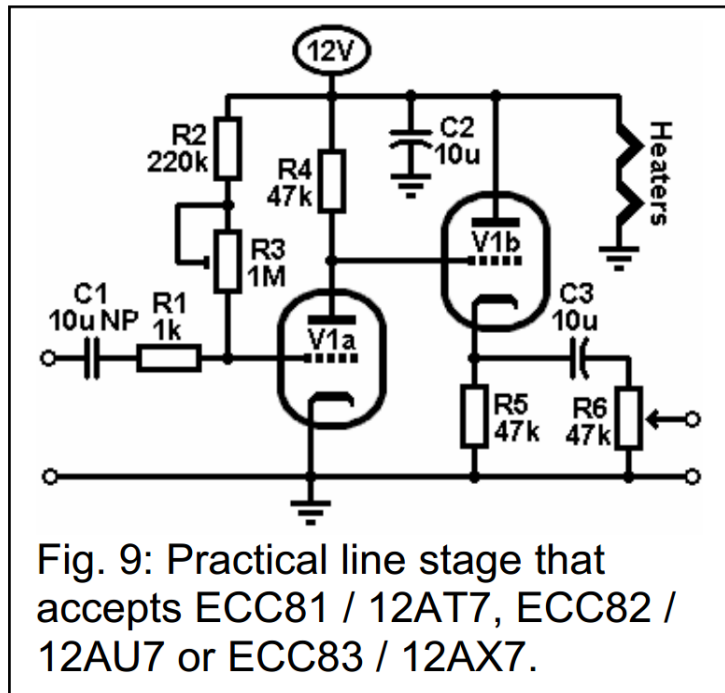


Fig. 9: Practical line stage that accepts ECC81 / 12AT7, ECC82 / 12AU7 or ECC83 / 12AX7.

## Conclusions

J'espère que cet article vous aura un peu éclairé sur les particularités des circuits sous-alimentés. L'amplification linéaire est-elle possible à faibles tensions ? La réponse est certainement oui, et des circuits concrets *sont* entièrement faisables (et fun !), mais nous devons savoir accepter les limitations inévitables de faible impédance d'entrée, gain limité et faible marge de manœuvre, ou sinon, nous devons regarder du côté des circuits hybrides pour résoudre ces problèmes. Les idées présentées dans cet article peuvent servir comme une plateforme fiable pour pousser l'expérience plus loin et j'espère que vous concocterez des circuits sous-alimentés avec beaucoup d'imagination !

Je dois beaucoup à Stephen Keller pour son aide pour obtenir les sources de référence.

<sup>1</sup> Volkens, W. K. (1951). Direct-Coupled Amplifier Starvation Circuits. *Electronics*. (March), pp126-9.

<sup>2</sup> Callahan, R. G. (1964). Simple High Gain DC Amplifier. *Review of Scientific Instruments*, **35** (6), pp759-60.

<sup>3</sup> Kaufer, G. E. (1995). How to Design Starved Amplifiers. *Tele-Tech and Electronic Industries*. (January), pp68-70+104+106-11.

<sup>4</sup> Bisso, R. J. (1957). Tube Design Considerations for Low-Voltage Operation in Hybrid Circuitry. *The Sylvania Technologist*. **10** (2), (April), pp38-41.

<sup>5</sup> Butler, B. (1991). *Tube Overdrive Pedal Operable Using Low Voltage DC Battery Eliminator*. US Patent 5022305.