

Ampli de puissance à tubes

Droit au but

Bob Stuurman

Cet amplificateur à tubes baptisé « Straight » par son auteur se caractérise par un concept à 2 EL34 montés en push-pull. L'approche adoptée en facilite la reproductibilité. La puissance dépasse largement les 35 watts, le niveau de distorsion est faible et le domaine de fréquences balayé est suffisamment étendu. On peut s'attendre, pour peu que l'on y connecte une paire de bonnes enceintes au rendement correct, à une qualité de reproduction excellente. C'est ainsi que nous sommes aperçus que certains morceaux de musique peuvent, même avec un concept simple mais bien pensé et aux spécifications relativement conventionnelles, encore nous donner des frissons dans le dos.



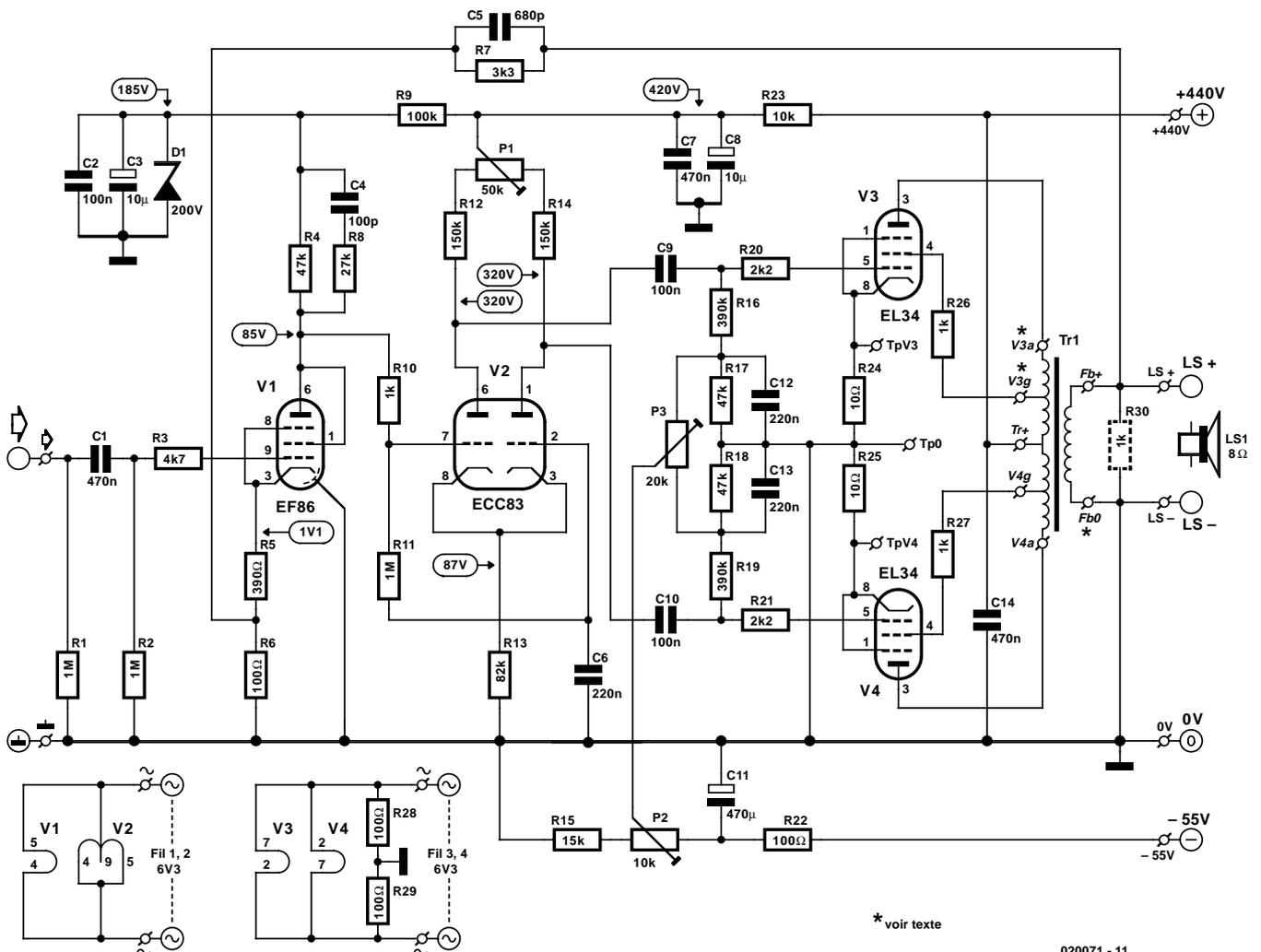
Cet amplificateur repose sur un concept de Philips de la fin des années 50, concept ayant cependant subi quelques modifications telles que proposées par Claus Byrith. Les voici ces modifications : disponibilité d'une tension de grille négative pour les EL34, possibilité de réglage de la balance en alternatif de l'étage de sortie, paramétrage du préamplificateur à pentode EF86 pour un fonctionnement en triode et abaissement de la contre-réaction totale à 20 dB seulement. On trouve, sur Internet, 2 documents à ce sujet et qui entre dans le détail de ce concept et dont nous ne pouvons que recommander la lecture à ceux d'entre vous que le sujet intéresse [1]. La documentation (en anglais) consacrée au sujet existant, nous n'allons pas ici entrer dans tous les détails. Nous nous intéresserons cependant à des aspects moins

connus vu qu'ils constituent une clef intéressante pour la compréhension des problèmes rencontrés et des solutions adoptées dans le cas des amplificateurs push-pull à tubes. Le second article abordera la réalisation de l'amplificateur. S'agissant d'un projet à réaliser soi-même et non pas d'un kit disponible, nous accorderons plus d'attention à certains aspects spécifiques.

Le schéma

Nous trouvons en **figure 1** l'ensemble du schéma d'un mono-bloc (la moitié) du « Straight ». Nous y découvrons 3 tensions d'alimentation : la haute tension de +440 V, une tension de grille négative de -55 V et une tension de préchauffage de 6,3 V. Cette dernière tension existe en double de manière à permettre une attaque différenciée de l'étage

préamplificateur/déphaseur (Fil1,2) et des tubes de puissance (Fil3,4). Les filaments sont reliés symétriquement à la masse par les biais des résistances R28 et R29. Les grilles-écran de ces tubes de puissance sont reliées, par le biais de résistances de 1 kΩ, à des prises intermédiaires des enroulements d'anode du transformateur de sortie, ceci pour permettre un fonctionnement « ultra-linéaire ». De par la contre-réaction interne au travers des grilles-écran, les pentodes se voient prendre des caractéristiques qui les placent à mi-chemin entre les pentodes et les triodes. Ainsi, la résistance interne baisse au point d'approcher celle d'une triode et le taux de distorsion tombe lui aussi au niveau de celui d'une triode. Cela se paie cependant par une chute du rendement qui n'est plus de quelque 65% de celui qu'aurait un étage de puissance à pentode. La tension de grille négative à l'intention des tubes de puissance n'est pas obtenue par chute de tension aux bornes des résistances de cathode, mais par un dispositif d'alimen-



* voir texte

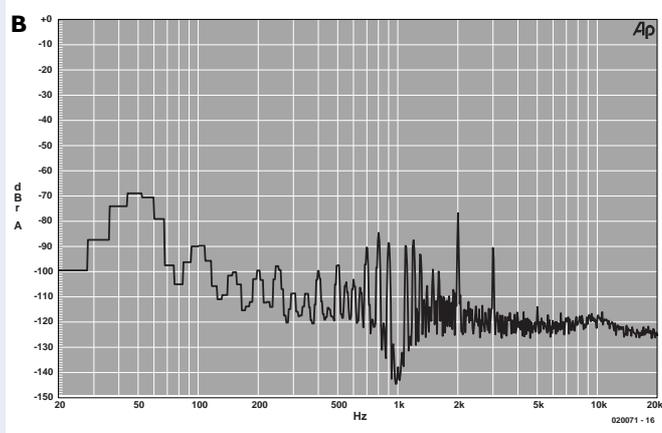
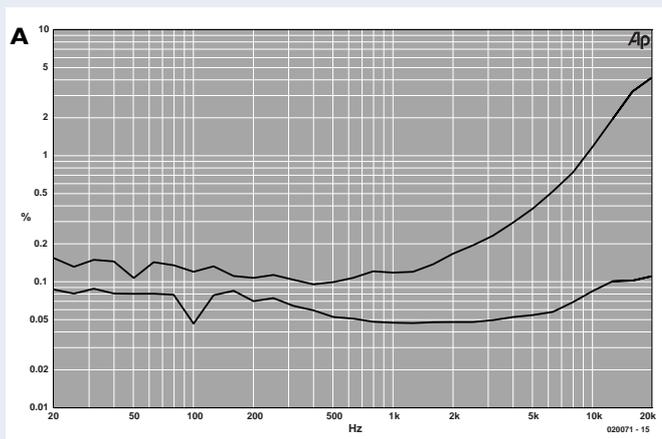
020071 - 11

Figure 1. Schéma de « Straight », un amplificateur à tubes.

Spécifications

Impédance d'entrée :	1 M Ω
Sensibilité d'entrée :	600 mV
Impédance de haut-parleur nominale :	8 Ω (4 Ω possible également)
Puissance de sortie maximale :	39 W sous 8 Ω
Bande passante à 1 W :	5 Hz à > 40 kHz
DHT + bruit (1 W/8 Ω , 1 kHz) :	0,06% (B = 80 kHz)
Rapport S/B :	62 dB (B = 22 kHz) (pondéré en A)

Nous vous proposons ci-contre quelques résultats de mesure. La **courbe A** illustre la distorsion harmonique en fonction de la fréquence. Pour la courbe du bas, la mesure s'est faite à une puissance de 1 W, pour celle du haut à 27 W. La courbe de 1 W est très belle et c'est d'ailleurs le domaine de puissance dans lequel on se trouve lorsque l'on écoute de la musique, normalement. La **courbe B** est un peu plus « sauvage ». Il s'agit d'une analyse FFT d'un signal de 1 kHz à une puissance de sortie de 1 W. L'analyseur élimine la sinusoïde de 1 kHz et les pics restants représentent les résidus de distorsion de l'amplificateur. Il ne faut pas vous effrayer trop à la vue de cette courbe, la taille de la plage de l'analyseur, 150 dB, force quelque peu les choses. L'important de cette courbe sont les crêtes à 2 et 3 kHz situées à -77 et -90 dB respectivement, valeurs très bonnes pour un concept d'amplificateur à tubes et à un transformateur de sortie aussi simple. La bosse à 50 Hz est due au ronflement du sous-ensemble d'alimentation et ne concerne pas le spectre de distorsion.



tation spécifique; on ne risque pas de déplacement du point de fonctionnement des tubes en cours de fonctionnement. L'ajustable P2 permet de jouer sur la valeur de la tension négative de grille des tubes de puissance (= courant CC), l'ajustable P3 servant à régler l'équilibre des courants continus (= balance CC). Aux faibles signaux, l'étage de sortie travaille en classe A, pour passer de plus en plus en classe B au fur et à mesure de l'augmentation du niveau des signaux. Aux signaux de fort niveau le courant consommé augmente lui aussi. Il est possible, dans une certaine mesure, d'ajuster le point de fonctionnement en jouant sur la taille de la tension négative de grille.

De par cette alimentation séparée pour la tension négative de grille, on dispose de la totalité de la haute tension pour les tubes de puissance en sortie.

Les cathodes sont reliées à la masse au travers de résistances de 10 Ω , R24 et R25, la chute de tension aux bornes de ces résistances est proportionnelle au courant circulant par chacun des tubes (10 mV/mA).

Il est prévu 3 points de test pour le réglage du montage. Le point Tp0 est la masse, TpV3 et TpV4 sont, respectivement, les points de

réglage des tubes V3 et V4.

Les EL34 fournissent leur pleine puissance à une tension de grille de commande de l'ordre de 26 V. Le déphaseur est en mesure de fournir sans le moindre problème cette tension de commande. Le déphaseur est du type par couplage des cathodes, le condensateur C6 mettant la grille de la seconde triode V2b à la masse pour toute tension alternative.

Comme le pilotage se fait, au niveau de V2a, par la grille et qu'il se fait, pour V2b, par la cathode, on se trouve confronté à un petit déséquilibre dont la taille est celle des tensions alternatives présentes sur les anodes. L'ajustable P1 (balance CA) permet de les rendre parfaitement identiques. Le gain de ce déphaseur est de quelque 26x, ce qui implique qu'il nous faut, pour amener l'étage de sortie à pleine modulation, une tension de 1 V sur la grille du tube V2a. La valeur élevée de la résistance de cathode R13 se traduit par une distorsion faible et une tension

élevée sur les cathodes, à savoir de l'ordre de 87 V. Il est possible de ce fait de relier la grille de V2a directement à l'anode du tube préamplificateur EF86, et cela sans condensateur de couplage. Il n'est pas nécessaire d'utiliser le gain important mis à disposition par une pentode, ce qui explique que le préamplificateur soit monté en triode par interconnexion de la grille-écran et de l'anode.

Ceci permet de réduire le facteur de bruit au niveau de celui caractérisant une triode tout en conservant la protection interne et l'absence de microphonie (sensibilité de la grille aux signaux à l'image d'un micro) de ce type de tube. Il nous faut, pour assurer une pleine modulation, disposer d'une tension de 60 mV sur la grille de commande du EF86. De par la contre-réaction de 20 dB induite par R7 et R6, la tension d'entrée nécessaire pour cette modulation passe à 0,6 V. La puissance de sortie se monte à 39 W. L'amplificateur arrive en butée lorsque la tension d'entrée atteint 0,7 V. La puissance fournie

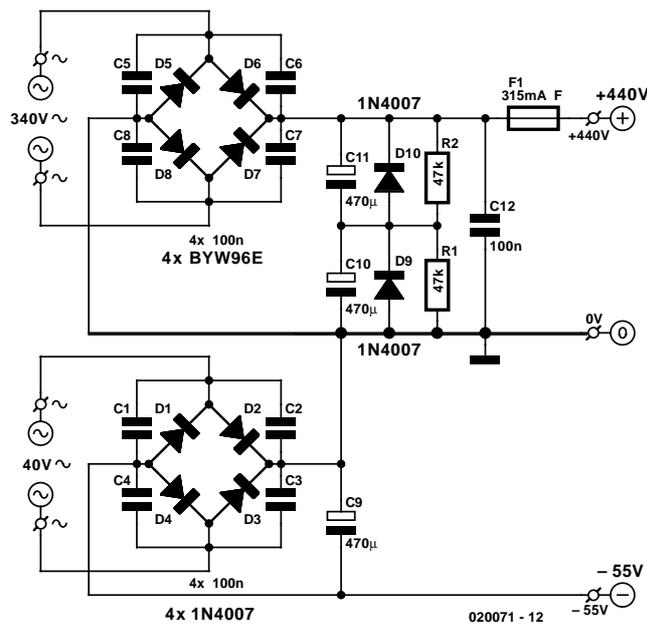
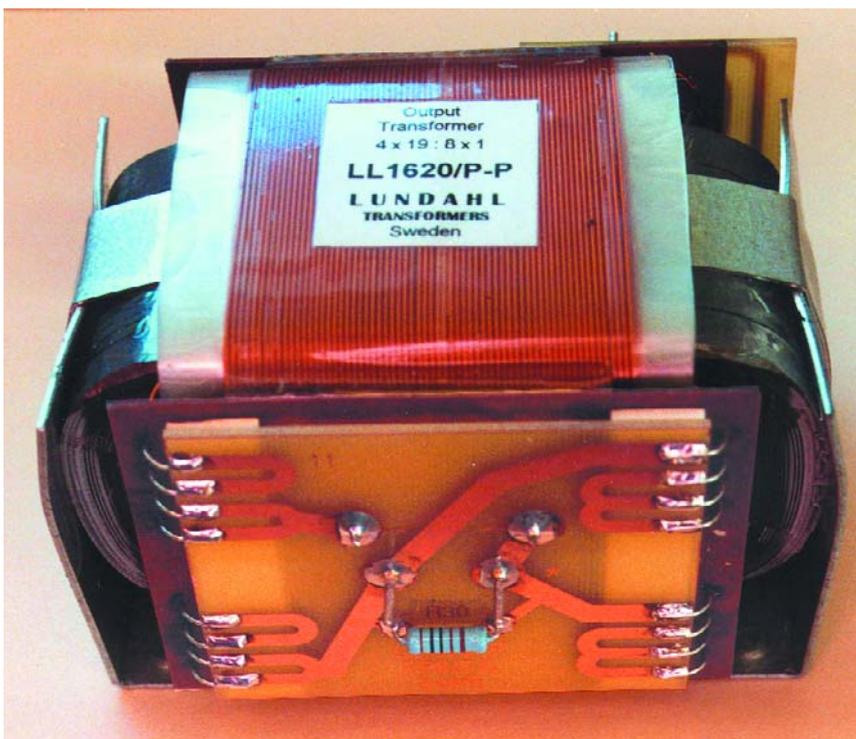


Figure 2. Schéma de l'ensemble d'alimentation.



est alors de quelque 46 W. La fréquence de résonance de fuite du transformateur de sortie se situe aux alentours de 80 kHz. À cette fréquence, le gain en boucle ouverte doit être devenu suffisamment faible pour garantir la stabilité de fonctionnement. C'est là la fonction de C4 et R8, le condensateur C5 jouant lui aussi un certain rôle. Il faudra déterminer expérimentalement la valeur

de ces composants en procédant à des essais avec des signaux rectangulaires. À la mise sous tension de l'amplificateur la haute tension et la tension négative de grille sont présentes pratiquement instantanément. Il faut cependant que les filaments atteignent leur température de service, de sorte qu'il ne circule pas encore de courant par les tubes. Nous avons

ajouté la diode D1 de manière à éviter que l'anode et la grille-écran du EF86 ne se voient confrontées à des niveaux de tension trop élevés. Au bout de quelques dizaines de secondes, l'ensemble a trouvé son état de croisière et la tension aux bornes de D1 passe à de l'ordre de 185 V.

En amont des grilles de commande de tous les tubes nous avons placé des résistances de blocage HF. Comme cela était le cas dans le schéma d'origine nous n'y avons rien changé.

Les condensateurs de couplage des grilles des tubes de sortie C9 et C10 avaient, dans le concept d'origine, une valeur de 470 nF. Il apparut que le courant circulant à travers les tubes de sortie présentait des fluctuations relativement importantes à une fréquence très faible. Cette même fréquence (0,2 à 0,5 Hz) était également présente au niveau de la sortie haut-parleurs. La raison en était sans doute de faibles variations de la tension négative de grille.

De par la faible amplitude de ce signal et la self-induction élevée propre du transformateur de sortie, ce dernier ne constituait pas un obstacle de sorte que ces variations arrivaient, par le biais de la contre-réaction, à l'entrée de l'amplificateur. La réduction de C9 et de C10 à 100 nF a permis de donner à ce phénomène des proportions acceptables. Il n'a pas d'effet audible sur la reproduction des graves.

L'alimentation

Les bonnes caractéristiques du « Straight » sont en partie dues à son alimentation puissante. Le transformateur torique de près de 3,5 kg de Amplimo [2], un 7N607, peut fournir 340 V à un courant de pas moins de 700 mA. Après redressement nous disposons de plus de 400 mA sous 440 V. L'enroulement de la tension négative de grille fournit 40 v/100 mA; après redressement et filtrage cette tension atteint 55 V, valeur suffisante. La consommation de courant de filament de la totalité des tubes est de 7 A. L'enroulement de 6,3 V a une spécification de 6,8 A, mais vu que la charge de la haute tension est relativement faible et que celle de l'enroulement de grille est pratiquement nulle, il n'y a aucune raison de nous inquiéter de ce côté-là.

La figure 2 nous donne le schéma de l'alimentation. Un quarteron de diodes montées en pont (courant de crête = 60 A) redresse la haute tension. On découvre, en parallèle sur chaque diode, un condensateur dit anti-ronflement chargé de minimiser les parasites HF. Il est quasiment impossible de trouver des condensateurs de lissage de forte capacité

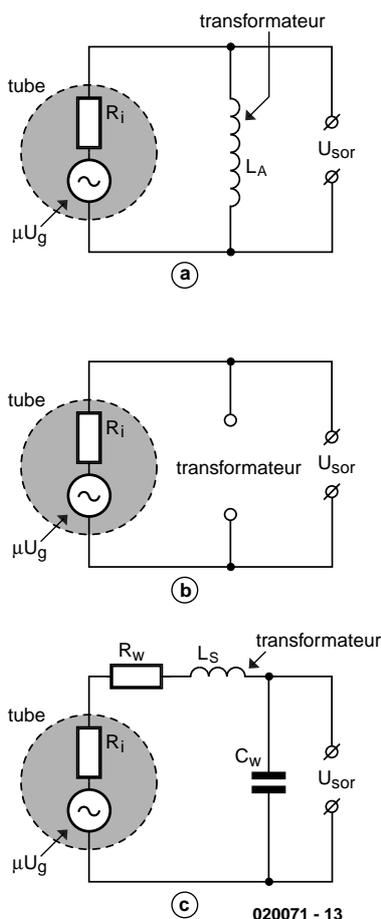


Figure 3. Schéma de substitution d'un transformateur de sortie.

ayant une tension de service de 450 V. Ceci explique que nous monté en série une paire de condensateurs électrochimiques de 47 μF/400 V, de sorte que la capacité de travail atteint 235 μF. Les diodes D9 et D10 servent à éviter l'inversion de polarité de l'un des 2 condensateurs lors de la mise hors-tension. Les résistances R1 et R2 assurent une répartition équitable de la tension et d'autre part déchargent les condensateurs électrochimiques en quelques minutes une fois l'alimentation de l'amplificateur coupée. C12 remplit une fonction de découplage HF. Dernière protection, un fusible rapide (F) de 315 mA, qui pourra être le sauveteur des tubes de puissances lorsque la tension négative de grille devient trop faible (moins négative).

Le transformateur de sortie

Le sous-ensemble le plus important et le plus critique d'un amplificateur push-pull à tubes est indubitablement le transformateur de sortie. Sur le concept Philips d'origine, le transformateur utilisé était constitué de 10 enrou-

lements primaires pris en série, entre lesquels étaient pris 8 enroulements secondaires pris, certains en parallèle d'autres en série, en fonction des impédances d'entrée et de sortie souhaitées.

Il s'agissait indubitablement d'un gros bébé dont le poids devait sans doute, à notre avis, dépasser les 5 kg. Qu'est-ce qui pouvait bien justifier un bobinage aussi complexe ? Plus la fréquence d'un signal sinusoïdal augmente, plus le transformateur de sortie a des problèmes de transfert du signal. Même dans le cas d'un très bon transformateur, l'atténuation introduite atteint déjà de l'ordre de 0,5 dB à 25 kHz.

En **figure 3** nous vous proposons un transformateur piloté par un tube à électrons. En **figure a** nous sommes en présence d'une fréquence très faible. La self-induction primaire du transformateur doit être élevée en vue de limiter le courant et générer un flux magnétique suffisant sans pour autant entrer en saturation.

En **figure b** la fréquence est moyenne et on se trouve en présence d'une impédance élevée.

En **figure c** la fréquence est élevée et le signal de sortie subit une atténuation en raison de l'inductance parasite L_S et de la capacité C_W existant entre les enroulements. L'inductance parasite est due aux « fuites » de flux magnétique, en raison d'un couplage imparfait des enroulements.

Le transfert à effectuer par le biais d'un transformateur prend un certain temps (ce retard est introduit par une fonction de filtre passe-bas

induite par la self-induction de fuite et l'impédance de la charge). Plus la fréquence augmente, plus de déphasage entre les signaux d'entrée et de sortie augmente. Le signal de sortie prend de plus en plus de retard. À 20 kHz, le déphasage peut déjà atteindre 14°. Il va sans dire que cette situation peut avoir des conséquences dramatiques sur la restitution de signaux rectangulaires. Il existe heureusement une technique permettant d'aborder ces problèmes (atténuation du signal aux fréquences élevées et l'augmentation du déphasage résultant), à savoir la contre-réaction.

Revenons à notre transformateur de sortie (**figure 3**). L_S et C_W constituent également une boucle de résonance et lors d'un dépassement de la fréquence de résonance de fuite on constate des sauts de phase important pouvant entraîner une instabilité de l'amplificateur. Dans la dite plage de fréquences il faut, dans le cas d'un amplificateur à contre-réaction, que le gain en boucle ouverte ait diminué suffisamment pour que le produit gain x contre-réaction ($A \times \beta$) soit inférieur à l'unité (1).

Il est partant important, si l'on veut avoir une bande passante importante, que la fréquence de résonance de fuite du transformateur de sortie soit suffisamment élevée. C'est le cas lorsque la self-induction parasite et la capacité des enroulements sont faibles. Cela implique inévitablement un bobinage complexe du transformateur comme cela était le cas du transformateur de sortie de

Tableau I. Caractéristiques principales du LLI620PP

Rapport des spires primaire/secondaire :	4 x 19,2 / 8 x 1
Résistance statique du primaire * :	308 Ω (4 x 77 Ω)
Résistance statique du secondaire : (moyenne des enroulements)	0,4 Ω
Self-induction du primaire :	300 H
Self-induction de fuite du primaire * :	13 mH
Impédance du primaire de ce projet :	6 kΩ
Impédance du secondaire de ce projet :	4 ou 8 Ω
Taille de la fente d'air :	25 μm
Pertes sur le transformateur à 62 W :	0,2 dB
Poids :	2,5 kg
* Tous les enroulements pris en série	



Philips. On comprendra qu'un transformateur de ce type ait son prix. Après quelques recherches nous avons trouvé une société suédoise, Lundahl, qui fabriquait un transformateur de sortie pour tubes parfaitement utilisable avec ce concept d'amplificateur Philips modifié, à savoir son LL1620PP. Ce transformateur possède un noyau en C fait de tôle aux spécificités spéciales ; chaque branche du transformateur comporte 2 enroulements primaires et 4 enroulements secondaires. Les 2 moitiés du noyau sont pressées l'une contre l'autre sur le cadre par un bandeau de tension soudé en place. La version push-pull de ce transformateur (il existe également des versions asymétriques (single ended)) possède un petit interstice d'air de 25 μm ce qui permet d'accepter un petit déséquilibre au niveau du courant continu à travers les enroulements primaires, sans que cela ne se traduise par une diminution importante de la self-induc-

tion. Les 4 enroulements primaires sont connectés symétriquement en série et comportent, à 50% des 2 enroulements des anodes, des prises pour les grilles-écran des pentodes de sortie, ce qui permet un fonctionnement en mode « ultra-linéaire ». La possibilité de choisir entre une connexion en série ou en parallèle des 8 enroulements secondaires permet une adaptation à 4 ou 8 Ω . La self-induction de fuite du LL1620PP peut paraître, avec ses 13 mH, relativement importante, mais il est difficile de faire autrement vu l'énormité de la self-induction au primaire, 300 H ni plus ni moins. Comme le gain en boucle ouverte et la contre-réaction de la version modifiée de l'amplificateur ont été diminués, celui-ci garde une bonne stabilité. Le tableau 1 résume les caractéristiques techniques les plus intéressantes du LL1620PP.

La **figure 4** donne les cotes du LL1620PP. Des plaques de Pertinax sont fixées de part et d'autre des

enroulements; elles supportent les bornes numérotées comme indiqué sur le schéma. La figure 4b illustre la structure des enroulements, chaque enroulement primaire se trouvant pris entre 2 enroulements secondaires. De manière à faciliter la manipulation du transformateur et d'éviter des erreurs de branchement, l'auteur a conçu 3 petites platines (qu'il vous faudra réaliser vous-même). Vous pouvez télécharger ces dessins de pistes depuis notre site Internet (www.elektor.fr). Il n'est cependant pas très sorcier, à condition de faire attention, de procéder à un câblage en l'air, branchements reproduits à côté de chacune des platines.

Sur tous les circuits imprimés le transformateur prend place côté « composants ». Les numéros reproduits sur la sérigraphie de l'implantation des composants de la platine, 1 à 11, réfèrent aux numéros portés sur le transformateur (figure 4a). La figure 4c donne le câblage et la platine correspondant aux connexions du primaire. Il suffit de glisser la platine au-dessus des bornes du primaire et d'y souder ces dernières. La désignation des connexions est la suivante : tension d'alimentation Tr+, anodes A* et A, grilles-écran

G* et G. L'astérisque (*) indique le début. Sur le concept Philips d'origine, les prises intermédiaires des grilles-écran se situaient à 40% du nombre total de spires, calculé depuis la prise centrale. Comme nous le disions plus haut, ce pourcentage est passé à 50%, ce qui a pour effet de faire glisser l'étage de sortie un peu plus vers la triode et de diminuer légè-

rement le rendement. En outre, de manière à resserrer autant que possible le couplage entre l'enroulement d'anode et la grille-écran correspondante, on utilise les enroulements présents sur la même branche. Le transformateur comporte, comme

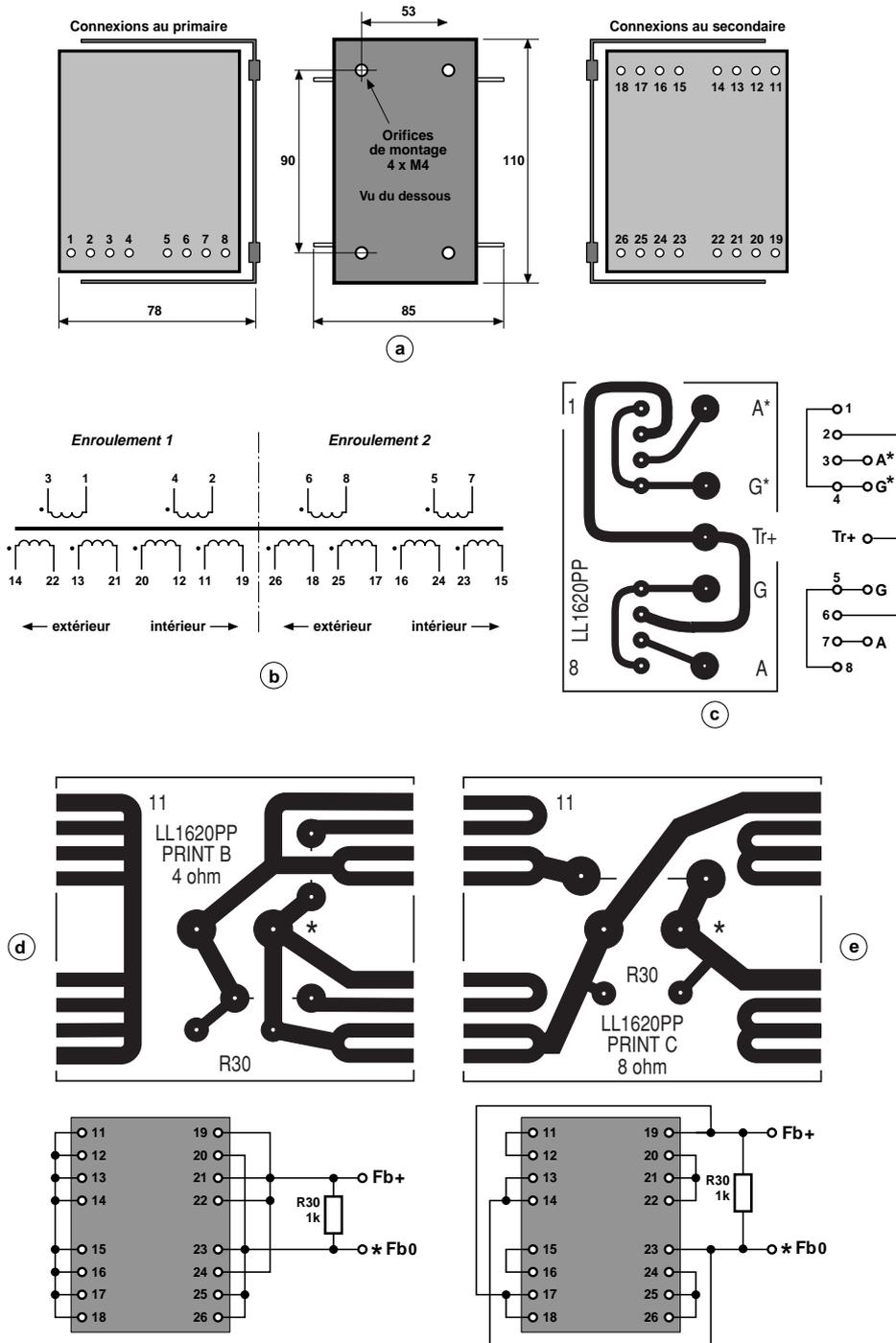
mentionné plus haut, 8 enroulements secondaires montés en partie en série et en partie en parallèle en fonction de l'impédance de haut-parleur (4 ou 8 Ω) et de l'impédance de primaire (6 kΩ) requises. Dans la configuration 4 Ω, 2 sets d'enroulements secondaires sont pris en série, pour la configuration 8 Ω c'en sont 3. La figure 4d donne le plan de câblage et la platine dans le cas de la connexion de haut-parleurs de 4 Ω (attention à ne pas oublier les 2 ponts de câblage représentés sous la forme de 2 petits traits correspondant à leurs extrémités).

La figure 4e représente elle le plan de câblage et le dessin des pistes pour un haut-parleur d'impédance de 8 Ω. Cette platine ne requiert qu'un seul pont de câblage. Les 2 configurations (4 et 8 Ω) comportent une résistance de 1 kΩ prise à la sortie, R30. Elle sert, dans une certaine mesure, à protéger le transformateur de sortie en cas d'absence de haut-parleur à la sortie et améliore la stabilité en cas de charges capacitives telles que de longs câbles de connexion vers les enceintes.

Les bornes des secondaires du transformateur prennent la forme de languettes étamées accessibles de l'extérieur. En cas d'utilisation de l'un de dessins de platine pour 4 ou 8 Ω proposés dans cet article, il suffira d'appuyer ces extrémités sur les larges pistes de la platine et de les y souder.

Dans l'article du mois prochain nous poursuivrons la partie réalisation. Vu le nombre d'illustrations que cette étape implique, nous vous proposons dans ce premier article quelques-unes de courbes de mesure que nous avons relevées (cf. l'encadré).

(020071-1)



020071 - 14

Figure 4. Cotes et brochage du LL1620PP (a), schéma des enroulements (b), connexions et dessin des pistes pour le primaire (c) et connexions et dessins des pistes pour le secondaire en version 4 Ω (d) et 8 Ω (e).

Littérature et adresse Internet

[1] www.lundahl.se/clus b.html
Building instruction – Appendix

[2] www.amplimo.nl