

au choix : de 300 W dans 8 Ω à 2 000 W dans 4 Ω

Titan 2000

amplificateur lourd pour Hi-Fi et sonorisation

Il nous arrive, de temps à autre, de nous voir reprocher de faire, chez Elektor, de beaux amplificateurs, mais à la puissance (relativement) modeste. Nous n'allons pas nous mettre à argumenter à ce sujet. Pour mettre un point final à ces commentaires, nous vous proposons cette fois un amplificateur dont la puissance n'appelle plus la moindre critique et pouvant se targuer du qualificatif de Hi-Fi sans avoir à rougir. Un formidable amplificateur à divers points de vue !



Caractéristiques techniques :

<i>Puissance sinus d'un mono-bloc :</i>	300 W/8 Ω , 500 W/4 Ω , 800 W/2 Ω environ
<i>Puissance musique en montage en pont :</i>	2 000 W/4 Ω
<i>Distorsion harmonique :</i>	< 0,005%
<i>Taux de montée (slew-rate) :</i>	85 V/ μ s
<i>Bande passante en boucle ouverte :</i>	55 kHz
<i>Bande passante de puissance :</i>	1,5 Hz à 220 kHz

La puissance des amplificateurs est un sujet de discussion inépuisable. Pour une utilisation « domestique », dans un salon, une puissance de 2 x 50 watts (en continu) est plus que suffisante. Nous en avons déjà souvent témoigné et n'avons aucune raison de changer notre point de vue. En principe, 50 watts doivent être en mesure de « réveiller » n'importe

ceux d'entre nos lecteurs habitués à remplir acoustiquement ces salles plus grandes qui nous suggèrent, le plus souvent, de réaliser un amplificateur de puissance plus conséquente. Comme cela faisait déjà un certain temps que nous ne vous avons pas proposé, dans Elektor, la réalisation d'un vrai « loubard », nous avons fini par accéder à ce désir. Lors de la défi-

POWER TO THE PEOPLE

Nous avons choisi, de manière à répondre du mieux possible aux requêtes les plus diverses, de concevoir un amplificateur dont la puissance serait, pour ainsi dire, « programmable ». À la charge standard de 8 W, un Titan en version monobloc fournit une puissance de quelque 300 W. Cette

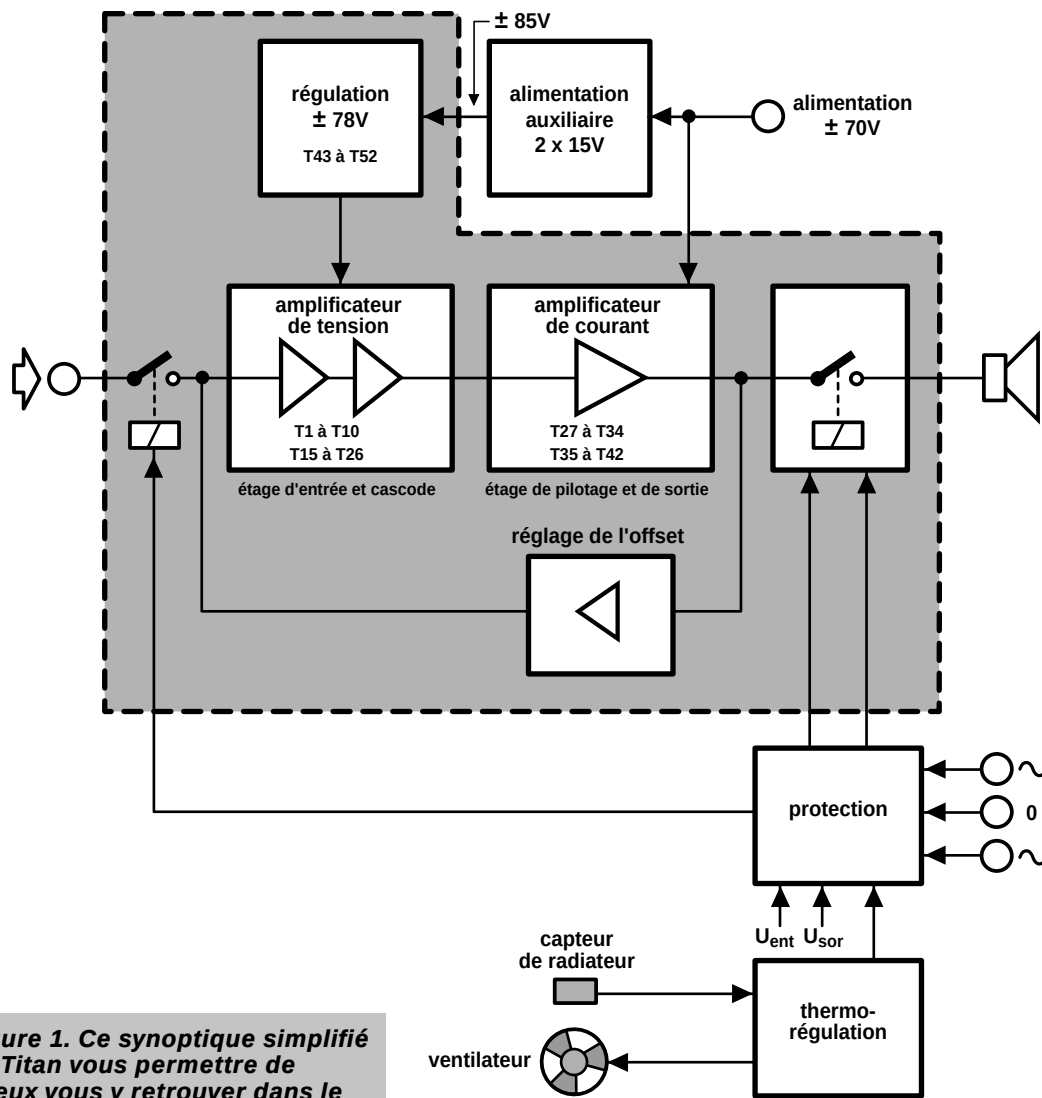


Figure 1. Ce synoptique simplifié de Titan vous permet de mieux vous y retrouver dans le schéma de principe complet. L'alimentation auxiliaire, la protection et la thermo-régulation prennent la forme de sous-ensembles distincts ayant droit à leur propre circuit imprimé.

990001 - 12

quelle enceinte, de sorte que l'on dispose encore d'une marge largement suffisante pour les crêtes les plus fortes.

Mais le salon n'est pas le seul endroit où l'on « écoute » de la musique. Vous avez sans doute entendu parler de lieux tels que discothèques, théâtres et autres salles immenses, endroits qui nécessitent tous des amplificateurs de puissance plus importante. Il est impossible de faire autrement. Ce sont sans doute

évidemment de savoir quelle était la puissance que devait fournir ce nouvel amplificateur. Il est bon de se réaliser, avant de répondre à cette question, que, par exemple, le passage d'une puissance de 50 watts à une puissance de 100 watts ne change pas grand chose vu qu'elle correspond à un gain à peine audible de 3 dB. Cette constatation fut le coup de pouce qui nous fit opter pour un gain en puissance « notable ».

la valeur devrait être OK pour la plupart des applications. On a, en comparaison avec l'amplificateur de 50 W évoqué plus haut, un gain de la puissance acoustique de 7,5 dB, ce qui est considérable. On pourra, si l'on a besoin d'une puissance plus importante nominale, opter pour une impédance de charge de 4 W, impédance à laquelle le Titan fournit plus de 500 W, ce qui correspond à un gain de 10 dB très exactement par rapport à nos 50 W de référence.

Nous n'avons pas encore, avec cela, atteint les limites de puissance de l'amplificateur. Si l'on passe, par mise en

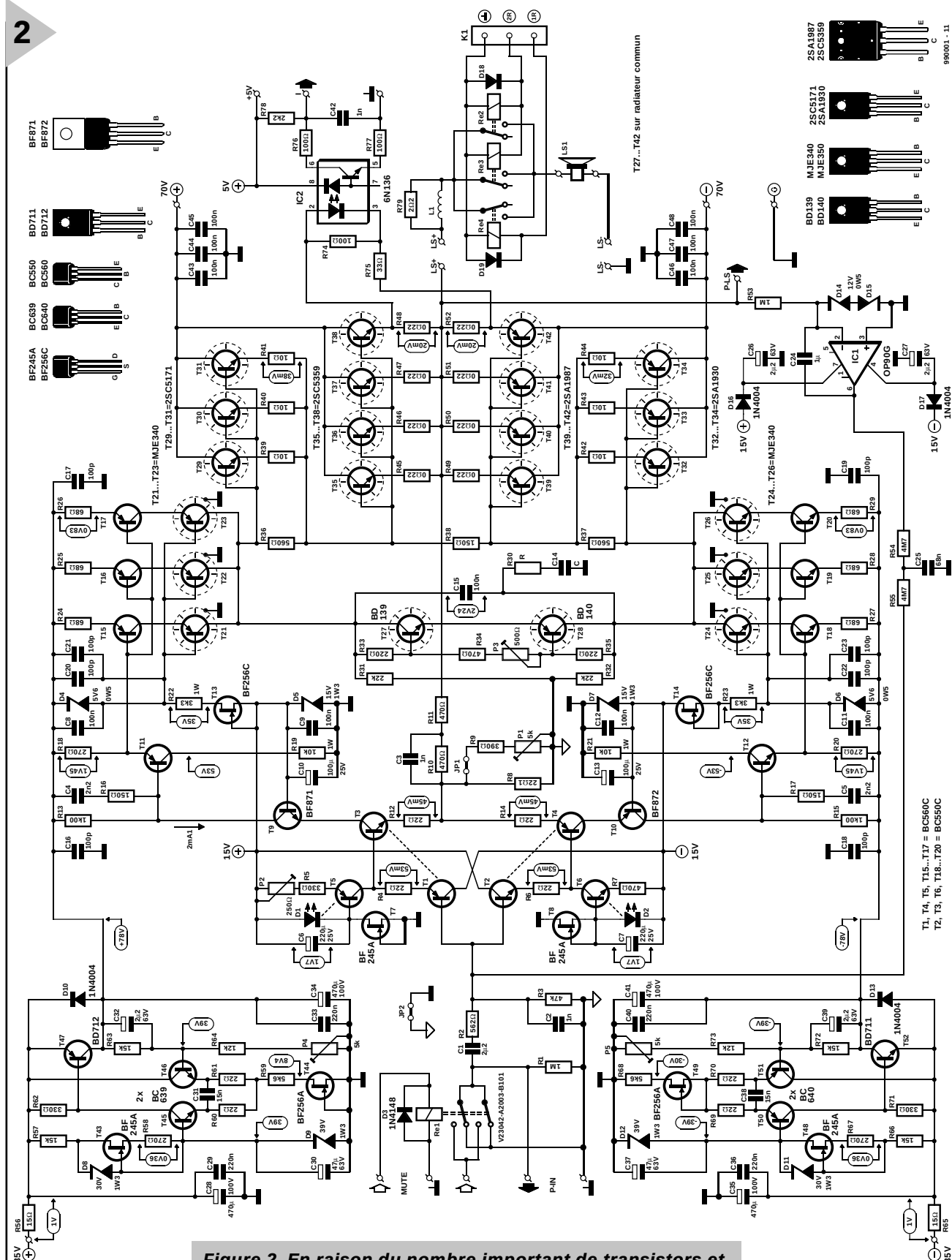


Figure 2. En raison du nombre important de transistors et vu la réalisation discrète des régulateurs de tension, le schéma complet peut paraître quelque peu confus. Nous avons cependant repris le concept simple de l'amplificateur 50 W compact.

parallèle des enceintes, à une impédance de charge de 2 W, il est possible, à pleine modulation, d'atteindre une puissance de 800 W (1 000 W de puissance musique). On pourra, pour finir, pour les applica-

tions exigeant réellement une puissance hors-normes, prendre 2 monoblocs en pont, la puissance disponible étant alors d'un respectable 2 000 W

musique dans 4 W.
On constate ainsi que Titan n'a pas la moindre
produire une masse impres-
de watts. Le considérer
e simple « centrale hydro-
ne serait cependant pas lui

rendre justice. Notre amplificateur a été formé à bonne école. La spécificité de Titan par rapport à de nombreux autres producteurs de watts est qu'il conserve la finesse de caractère d'un amplificateur Hi-Fi pure sang. Comme nous l'apprend le tableau de caractéristiques techniques, le taux de distortion est étonnamment faible, le taux de montée et la bande passante ne méritent que des éloges eux aussi. Cette combinaison de puissance pour le moins royale et ses qualités Hi-Fi font du Titan un amplificateur très singulier utilisable à bien des fins.

DE COMPACT À MOINS COMPACT

Nous avons choisi, comme base de conception de ce nouvel amplificateur, l'« ampli 50 W compact » décrit en mai 97, un amplificateur de salon type disposant d'une puissance de sortie de 50 W dans 8 W (et de l'ordre de 85 W dans le cas 4 W). La particularité de ce concept parfaitement symétrique est le choix d'une contre-réaction en courant (*current feedback*) plutôt que d'une contre-réaction en tension, approche plus courante. Ce choix s'est traduit par l'obtention d'un amplificateur extrêmement rapide disposant d'une bande passante en boucle ouverte (*open loop bandwidth*) très importante. Au niveau des mesures et à l'écoute, cet amplificateur ne méritait que des éloges, ce qui explique que nous l'ayons choisi comme base de travail pour, par les modifications nécessaires, en augmenter très sensiblement la puissance.

Bien que le concept de l'ampli 50 W compact n'ait changé que fort peu, les modifications nécessaires s'avèrent, elles, considérables et cela bien que les modifications se soient limitées à 2 points : l'augmentation de la plage de modulation d'une part et du courant de sortie de l'autre. Ceci est malheureusement plus vite dit que fait.

Il nous a fallu commencer, pour la puissance que nous envisagions, par multiplier par deux au moins la tension d'alimentation. Cette mesure implique de se mettre à la recherche (et de trouver) des transistors capables de supporter des tensions sensiblement supérieures aux tensions courantes. La valeur plus élevée de la tension d'alimentation a pour corollaire, en divers endroits de l'amplificateur, une chute de tension plus importante qui peut se

traduire par des problèmes de dissipation. Ceci aussi implique la prise de mesures spécifiques.

Nous en arrivons au courant de sortie plus important. Cela impliquait, dans notre cas, un redimensionnement complet de l'amplificateur de courant de l'ampli de puissance ampli 50 W compact. Nous y avons utilisé des fameux IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) parfaitement acclimatés aujourd'hui. De très bons semi-conducteurs, sans le moindre doute, mais, en raison des tolérances importantes de leur tension grille-émetteur, à peine utilisables en montage parallèle –mais vu la puissance de sortie envisagée, il était difficilement imaginable de faire un étage de sortie qui ne soit pas constitué de plusieurs paires prises symétriquement. Nous nous sommes, partant, résolus à leur substituer des transistors bipolaires, approche présentant un certain nombre de chausse-trappes. De par leur entrée à FETMOS, les IGBT ont l'avantage d'être relativement faciles à piloter. Le passage aux transistors de sortie bipolaires nous a obligé de changer notre arme d'épaule et de passer d'une commande en tension à une commande en courant, ce qui impliquait un renforcement conséquent de l'étage de commande et de l'étage en cascode situé en amont; à ce niveau aussi nous allions inévitablement devoir opter pour un montage en parallèle de plusieurs transistors.

L'un des avantages de cet amplificateur de courant nouveau modèle était que les nouveaux transistors de puissance utilisés étaient sensiblement meilleur marché que les IGBT, caractéristique à laquelle il est difficile de ne pas être sensible lorsque l'on sait que chaque monobloc en comporte 8 exemplaires (!).

Un autre aspect incontournable de la « réactualisation » de l'ampli 50 W compact fut celui de sa « sécurisation ». En raison des tensions élevées et des courants une erreur insignifiante peut, dans le cas d'un amplificateur de forte puissance, devenir catastrophique et avoir des conséquences (financières) graves. Le moins que l'on puisse faire fut donc de prévoir une bonne protection en CC (Courant Continu) et une protection contre les court-circuits. Pour plus de sécurité nous avons ajouté à ce dispositif de base une protection contre les surcharges et contre les températures trop élevées, cette dernière fonction étant couplée à une régulation de

ventilateur proportionnelle.

Après avoir passé, brièvement, en revue les péripéties de développement les plus marquantes il est temps maintenant de nous intéresser au montage dans sa totalité.

LE CONCEPT

De par les aspects techniques de développement évoqués plus haut, le passage d'une puissance moyenne à une puissance importante s'est traduit par un projet complètement rénové, une réalisation dont la taille n'a plus rien de la compacité qui faisait la caractéristique de l'amplificateur de référence.

Nous trouvons bien évidemment, au cœur du synoptique de la **figure 1**, une paire de blocs que l'on trouve toujours, sous une forme ou une autre, dans tout amplificateur, à savoir le sous-ensemble de l'amplificateur de tension et celui de l'amplificateur de courant. L'amplificateur de tension prend ici la forme de l'étage d'entrée associé à l'étage cascode qui sert de circuit de pré-attaque (*predriver*). L'amplificateur de courant comporte lui les transistors de pilotage et de sortie. Les dénominations du synoptique correspondent à celles utilisées dans le schéma de l'électronique, de sorte qu'il ne vous sera pas difficile de vous retrouver ces 2 blocs.

Nous avons appliqué la fameuse boucle de régulation entre l'entrée et la sortie de l'amplificateur pour éviter un offset CC gênant en sortie. La connexion des enceintes se fait par le biais d'un circuit à relais, approche maintenant classique dans le monde des amplificateurs de puissance.

Nous avons passé en revue les monuments incontournables, venons-en maintenant aux détails spécifiques de Titan. Nous constatons sur le schéma que l'amplificateur de courant est alimenté par une tension symétrique de ± 70 V, tension fournie par une alimentation rudimentaire constituée d'une paire de transformateurs de 50 V associés à une batterie de condensateurs de filtrage à bornes impressionnants –nous y reviendrons.

Il faut, pour pouvoir amener l'amplificateur de courant à pleine modulation, que l'amplificateur de tension travaille à une tension quelque peu plus élevée, en vue de compenser les inévitables pertes de tension. Cette tension plus élevée est obtenue à l'aide d'une alimentation auxiliaire externe que l'on

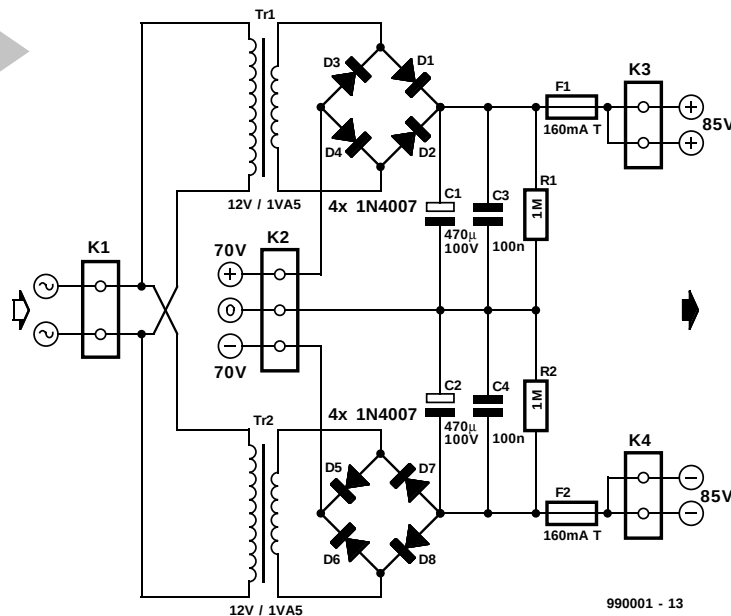


Figure 3. L'alimentation auxiliaire requise par l'amplificateur de tension a pu rester simple et compacte.

utilise pour fournir une tension de ± 15 V que l'on superpose sur la tension destinée à l'amplificateur de tension (± 70 V). La tension de ± 85 V ainsi obtenue est ramenée, par l'intermédiaire d'un régulateur situé à proximité, à une tension d'alimentation de ± 78 V. Le système de protection est, comme nous le signalions plus haut, très sophistiqué. En fait, il procède, en permanence, à une comparaison entre la tension d'entrée et la tension de sortie. En cas de différence il décolle immédiatement le relais de sortie, et simultanément, par le biais du relais d'entrée il déconnecte le signal de pilotage. Ce protection est efficace contre un offset CC, une surmodulation et un dépassement du courant maximum. On dispose en outre d'une thermoprotection qui surveille la température du radiateur et fait entrer, à partir d'un seuil de température donné, une régulation de ventilateur proportionnelle. Si la température devait dépasser, refroidissement en fonction, une valeur limite, le circuit de protection provoque le décollage du relais de sortie de l'amplificateur.

52 TRANSISTORS

La figure 2 nous donne le schéma complet de Titan. On constate que l'on se trouve en présence d'un nombre assez impressionnant de transistors et composants connexes. À strictement parler, le schéma est relativement simple, le paysage étant troublé par le montage en parallèle des transistors et la réalisation à 100% discrète des régulateurs 78 V. Dans l'ampli 50 W compact nous avons utilisé des régulateurs de tension classiques. Il est facile, en s'aidant de la numérotation de transistors du synoptique, de saisir l'essence

du schéma. Les régulateurs sont constitués des transistors T43 à T47 et T48 à T52, l'amplificateur d'entrée des transistors T1 à T10 et les étages de cascode servant au pilotage de l'amplificateur de courant font appel aux transistors T15 à T26. T29 à T34 sont les transistors de commande (driver), T35 à T42 fournissant eux la puissance en sortie. L'alimentation auxiliaire et le système de protection de la figure 1 ne se retrouvent pas sur ce schéma, nous leur avons en effet, vu que chacun de ces sous-ensembles dispose de sa propre platine, consacré leur propre schéma. Entrons dans le détail à la manière des écrevisses, c'est-à-dire à reculons.

L'amplificateur de courant

Étant données les exigences de puissance posées, il est parfaitement compréhensible que l'étage de sortie du présent amplificateur soit considéré comme sa partie la plus importante, ce qui explique que nous en parlions en premier.

L'une des exigences du cahier des charges ayant été que l'amplificateur soit capable de supporter des charges allant jusqu'à 1,5 W, nous avons opté pour le montage en parallèle de 4 paires de transistors de sortie, T35 à T42. Nous avons porté notre choix sur des composants spéciaux de Toshiba qui se distinguaient, entre autres, par un transfert joliment linéaire et un gain en courant continu pratiquement constant jusqu'à de l'ordre de 7 A. Les infocartes de ce mois-ci leur sont d'ailleurs consacrées.

Il va sans dire que non seulement les transistors de sortie mais aussi les transistors de commande doivent rester à l'intérieur de la zone de fonctionnement sûre (SOA en anglais pour Safe

Operating Area), ce qui nous a amené à opter pour un montage en (triple) parallèle. Ces « drivers » nous viennent également de chez Toshiba; il s'agit de composants relativement courants se distinguant par leur vitesse ($f_T = 200$ MHz). Nous utilisons, pour la définition de la tension de polarisation nécessaire au réglage du courant de repos, une « zener à transistor » symétrique, T27/T28. Cette paire de transistors prend place, en compagnie des transistors de puissance et des drivers, sur un seul et unique radiateur, approche garantissant un bon couplage thermique et un comportement de régulation exemplaire. Il est vrai que, dans le cas d'une modulation importante, le courant de repos augmente sensiblement, mais dès que l'amplificateur a refroidi, il reprend gentiment sa valeur nominale. Ce courant de repos est fixé à 200 mA par le biais de l'ajustable P1.

Un mot au sujet des composants situés entre les transistors de sortie et les bornes allant aux enceintes. Il est courant de rencontrer à ce niveau, sur un amplificateur, un relais destiné à la déconnexion des enceintes dans le cas d'une entrée en fonction du dispositif de sécurité. Vu le courant de sortie important auquel nous avons affaire ce sont 3 relais pris en parallèle, Re2 à Re4, que nous trouvons ici. 2 d'entre eux sont, à chaque fois, simultanément, soit activés, soit désactivés. Lors de la désactivation, l'action de ces 2 relais est quelque peu retardée pour laisser le temps au troisième relais de se mettre hors-circuit (important en cas de problème). En même temps que ce troisième relais le relais d'entrée est lui aussi désactivé de sorte que le signal de commande aura disparu à l'instant d'activation des 2 premiers relais. Cette façon de procéder ne peut qu'avoir des conséquences positives sur la durée de vie des contacts des relais. Les 3 relais trouvent place, en compagnie d'une self de sortie de bonnes dimensions, L1, sur une platine distincte qui trouvera place à proximité immédiate des bornes de sortie. L'opto-coupleur IC2 pris à la sortie sert lui aussi à la protection de courant. Sa LED mesure, par le biais du diviseur de tension R74/R75, la tension présente aux bornes de R48/R52, de sorte que le courant de sortie tant positif que négatif est tenu à l'oeil. L'utilisation d'un opto-coupleur évite la création de boucle de terre et évite d'avoir à effectuer une compensation de la tension en mode commun de ± 70 V. La tension d'alimentation de 5 V requise par l'opto-coupleur est dérivée du circuit de protection.

Montage en cascade

Le courant de sortie supérieur à la normale de l'amplificateur requiert un pilotage des drivers défini en consé-

quence, c'est-à-dire sensiblement plus costaud que ce à quoi nous sommes habitués. Ceci explique que la sortie de l'amplificateur de tension prenne la forme de 3 étages en cascade montés en parallèle, T15 à T26. Ces cascades sont paramétrées à un courant de 10 à 15 mA, mais la mise en oeuvre d'une contre-réaction de courant fait que ledit courant peut, en fonction de la charge et de la modulation, voir sa valeur augmenter sensiblement. Ceci explique que le type de transistors utilisés pour T21 à T26 soient en mesure, à une V_{CE} de 150 V, de véhiculer un courant de quelque 50 mA. T15 à T20 peuvent être des BCXXX courants.

L'amplificateur d'entrée et les étages en cascade sont interconnectés par des tampons additionnels, T11 et T12, de manière à abaisser l'impédance de l'étage d'entrée, leur présence ayant en outre permis d'augmenter légèrement la valeur de R13 et R15, de sorte que l'étage d'entrée introduit un gain additionnel de quelque 3 dB. Les résistances R19 et R21 remplissent une triple fonction. Elles servent, tout d'abord, à limiter la dissipation des tampons; elles permettent ensuite de se passer d'une tension additionnelle de paramétrage des tampons tout en, tertio, limitant à une valeur sûre le courant maximal à travers les tampons et partant à travers les étages en cascade. Le gain en boucle ouverte de Titan dépend uniquement de l'étage d'entrée et de l'étage en cascade. Le gain du premier dépend du rapport $R13/R12 + R8$ (et $R15/R14 + R8$); il est ainsi supérieur à 10 (20 dB). Le gain des cascades dépend principalement du rapport entre le montage parallèle de R31 et R32 et des résistances R24, R25 et R26 prises elles aussi quasiment en parallèle. Le mode push-pull adopté permet d'augmenter le tout d'un facteur 2, de sorte que le gain de total est proche de 900 fois. À eux deux, l'étage d'entrée et l'étage en cascade fournissent un gain en tension de l'ordre de 8 500 environ.

Amplificateur d'entrée

En fait, les transistors T3 et T4 constituent, à eux seuls, l'amplificateur d'entrée. La construction en cascade à base de T9 et de T10 sert uniquement à permettre à cet étage de supporter la tension élevée mise en jeu. Le réglage de ces 2 derniers transistors est l'affaire des diodes zener D5 et D7 qui font partie

du même diviseur de tension que celui servant au paramétrage des transistors T21 à T26. Le courant à travers les zeners est, à des fins de stabilité, maintenu à valeur constante à l'aide des sources de courant à FET basées sur T13 et T14. R22 et R23 limitent la dissipation et la tension appliquée aux FET. Pour le reste, l'étage d'entrée est pratiquement identique à celui de l'amplificateur 50 W compact. La chute de tension aux bornes des résistances d'émetteur des tampons T1 et T2 détermine la chute de tension aux bornes des résistances d'émetteur T3 et T4 et partant le paramétrage de l'amplificateur d'entrée. Pour éliminer, à ce niveau, l'influence de variations de température, les paires T1/T3 et T2/T4 doivent être couplées thermiquement par un montage face à face bloqué à l'aide d'un serre-câble.

Le paramétrage des tampons T1 et T2 exige un réglage très fin, ce qui explique l'adjonction des sources de courant T5 et T6. Les LED D1 et D2, dont le courant est déterminé par les sources de courant à FET T7 et T8, servent de référence pour les sources de courant. Ici encore, en vue de garantir la thermo-stabilité, les paires D1/T5 et D2/T6 doivent être couplées thermiquement (à l'aide d'un serre-câble), opération facilitée par l'utilisation, pour D1 et D2, de LED plates. Il est possible, pour compenser une éventuelle asymétrie de l'étage d'entrée, d'ajuster, par le biais de l'ajustable P2, le courant à travers T5 de manière à ce qu'il soit égale à celui traversant T6 (à mesurer aux bornes des résistances R4 et R6 respectivement).

Contre-réaction et compensation

La contre-réaction de l'amplificateur de sortie se fait depuis la sortie de l'étage de puissance vers le point nodal des émetteurs de T3 et T4, et ce par l'intermédiaire de R10 et R11. On a affaire ici à une contre-réaction de courant vu que le courant traversant T3 et T4 dépend de la tension aux bornes de R8, tension qui, elle, dépend à son tour du courant véhiculé par les résistances R10 et R11. Le gain de tension total de l'amplificateur de sortie est fixé par le rapport entre R8 et $R10 + R11$.

Les composants C3, C4, C5, R16 et R17 font partie de la compensation indispensable à un fonctionnement stable de l'amplificateur. Nous avons prévu, à tout hasard, de la place pour un réseau de compensation additionnel

(C14/R30), mais cette combinaison RC n'est normalement pas nécessaire. La présence, à l'entrée, d'un filtre passe-bas, R2/C2, est une *must* vu que des signaux rapides (à haute fréquence) peuvent aisément, avec un amplificateur aussi rapide, entraîner de la distorsion; ce filtre est en outre indispensable à la stabilité du système. Le condensateur de couplage C1 est, enfin, nécessaire vu que la compensation d'offset existante ne compense que le courant de polarisation des tampons d'entrée et qu'elle n'a pas pour fonction d'éliminer d'éventuelles tensions continues atterrissant sur l'entrée.

Évoquons, pour terminer, quelques points méritant d'être notés. On trouve à l'entrée de l'amplificateur un relais, Re1, qui permet de bloquer le signal sur son trajet vers l'entrée de l'amplificateur. Ce relais fait partie du dispositif de protection et sert, entre autres, à protéger l'étage d'entrée en cas de surmodulation. Nous reviendrons, un peu plus tard, au détail de ce circuit de protection. Nous nous contenterons, pour le moment, d'indiquer que ce circuit procède à une comparaison permanente entre les signaux d'entrée et de sortie de l'amplificateur, dérivés respectivement des points P-IN et P-LS. Il nous faut en outre signaler que le réseau R9/P1 est uniquement destiné au réglage de la réjection en mode commun lorsque l'on envisage, à un stade ultérieur, le montage en pont de 2 amplificateurs. Ledit réseau n'étant nécessaire que sur l'un des 2 amplificateurs, il peut être mis ou non en circuit par le biais du cavalier JP1.

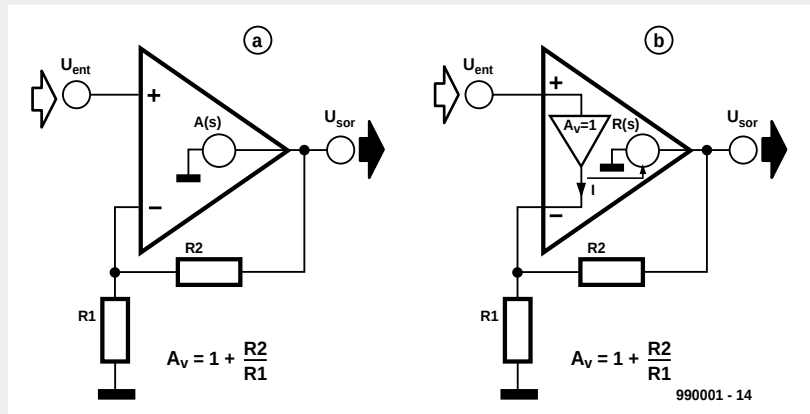
Venons-en à la compensation d'offset. Elle prend la forme d'un intégrateur au coeur duquel règne IC1; celui-ci compare, approche classique, la tension continue en sortie de l'amplificateur avec le potentiel de la masse. Dès la moindre déviation, la sortie de IC1 commande le paramétrage de T1/T2 de façon telle que la sortie reste, en moyenne, au potentiel de la masse. L'amplificateur opérationnel utilisé à cet endroit est un OP90, composant combinant une consommation de courant extrêmement faible (20 mA) à un offset d'entrée très faible (450 mV). La tension d'alimentation de ce sous-ensemble est dérivée, par le biais des diodes D16 et D17 des ± 15 V alimentant l'étage d'entrée, de sorte que lors de la coupure de Titan l'amplificateur opérationnel reste alimenté un peu

Contre-réaction de courant

Un amplificateur doté de la contre-réaction de tension classique (**figure a**), multiplie la différence de tension existant entre ses 2 entrées par le gain en boucle ouverte. La boucle de contre-réaction force la sortie à une tension qui, après division par le réseau $R1/R2$, est égale à la tension d'entrée. À l'inverse d'un amplificateur à contre-réaction de tension dont les entrées présentent une impédance élevée, un amplificateur à contre-réaction de courant (**figure b**) possède une entrée à haute impédance et une entrée à faible impédance. Son étage d'entrée prend la forme d'un étage tampon à gain unitaire pris entre l'entrée non-inverseuse et l'entrée inverseuse, cette dernière « entrée » étant en fait une sortie à faible impédance. L'étage tampon est suivi d'un étage d'adaptation d'impédance qui convertit le courant de sortie du tampon en une tension de sortie qui lui est directement proportionnelle.

Le principe de la boucle de contre-réaction de courant est le suivant : lorsque la tension appliquée à l'entrée non-inverseuse augmente, l'entrée inverseuse suit de sorte que le tampon fait circuler un courant à travers $R1$. Ce courant, amplifié par l'étage d'adaptation d'impédance, va faire croître la tension de sortie de l'amplificateur jusqu'à ce que le courant de sortie passant par $R2$ soit égal au courant de tampon véhiculé par $R1$. On pourra se contenter, pour maintenir, au repos, la tension de sortie à la valeur requise, d'un courant de tampon extrêmement faible. Le rapport $1 + R2/R1$ détermine le gain en boucle fermée du circuit.

L'une des caractéristiques spécifiques d'un amplificateur à contre-réaction de courant est que la bande passante en boucle fermée est pratiquement indépendante du gain en boucle fermée, alors que dans le cas d'une contre-réaction de tension, la bande passante se réduit au fur et à mesure de l'augmentation du gain en boucle fermée – une relation connue sous le terme de « produit gain x bande ».



plus longtemps, éliminant d'éventuels parasites. D14 et D15 protègent, en situation d'erreur, l'entrée de IC1 contre des tensions d'entrée trop élevées. R54 et R55 ont été dimensionnées pour un courant de compensation de 1 mA au maximum, valeur suffisante pour éliminer toute différence entre les courants de base de T1 et T2.

Régulation

Les avantages présentés par la contre-réaction de courant ont pour corollaire un inconvénient majeur à savoir une mauvaise réjection de la tension d'alimentation. Ceci nous oblige à prévoir une régulation de la tension d'alimentation de l'amplificateur de tension. Compte-tenu de la valeur élevée de la tension symétrique requise et du fait que la tension non régulée servant de tension d'entrée pouvait varier sensiblement sous l'effet de la charge de l'amplificateur, nous avons opté pour une paire de régulateurs à faible chute de tension discrets constitués respectivement des transistors T43 à T47 et T48 à T52 et des composants connexes. La tension d'alimentation de l'amplificateur de tension doit, pour compenser les chutes de tension dûs, entre autres, au étages en cascade, être sensiblement supérieure aux ± 70 V requis pour l'alimentation de l'amplificateur de courant, à savoir ± 78 V. Il faut ajouter à cela que la tension d'entrée des régulateurs de tension discrets doit elle aussi sensiblement plus importante, ceci pour pouvoir garantir, en toutes circonstances, une régulation efficace.

La consommation de courant de l'amplificateur de tension est, heureusement, relativement faible (70 mA environ) de sorte que l'on pourra se satisfaire, pour rehausser la tension d'entrée des régulateurs de tension, d'une alimentation auxiliaire de petit calibre. La **figure 3** nous apprend que l'alimentation auxiliaire ne représente en fait rien de plus qu'une paire de petits transformateurs et un pont de redressement. La tension de sortie de ± 15 V est prise en série avec les ± 70 V fournis par l'alimentation principale, de sorte que l'on dispose d'une tension non régulée de ± 85 V.

Nous nous limiterons, en ce qui concerne la description des régulateurs de tension discrets, à celle de celui fournissant la tension positive, ceci pour éviter de « noyer le poisson ». L'autre branche est identique, à la polarité des transistors près.

La référence prend la forme d'une diode zener de 39 V, D9, de sorte qu'il suffit au régulateur de tension de l'amplifier d'un facteur deux pour que nous disposions de la tension de sortie requise. En prenant, pour l'alimentation de la diode zener, une source de courant à FET, T43, nous disposons d'une tension de référence parfaite que l'on tamponne, pour plus de sécurité, à l'aide du condensateur C30. L'amplificateur différentiel T45/T46 paramétré par la source de courant T44 compare, par le biais du diviseur résistif $R63/R64/P4$, la tension de sortie avec la tension de référence, de sorte que la tension de sortie est ajustable par l'in-

termédiaire de P4. T47 constitue l'étage de sortie du régulateur; la tension de sortie reste stable jusqu'à 0,2 V en-dessous de la tension d'entrée.

R57 et D8 protègent T43 contre un niveau de tension trop élevée lors de la mise sous tension d'alimentation, D10 empêchant le courant de circuler dans le sens inverse à travers le régulateur. C31 et C32 optimisent le comportement en fréquence du régulateur, R56/C28/C29 servent quant à eux au lissage et au découplage HF de la tension d'entrée de ± 85 V.

EN GUISE DE CONCLUSION

Nous en avons terminé avec le synoptique et le schéma de principe de Titan. Nous avons parlé du plus important, mais n'en avons pas encore fini. Le circuit de protection est le dernier sous-ensemble essentiel dont nous ayons encore à parler. Le système de régulation du ventilateur aura lui également voix au chapitre, de même que les étapes de réalisation des platines et de montage de l'ensemble dans un coffret. Nous vous proposerons bien évidemment également les spécifications complètes assaisonnées des courbes de mesure auxquelles vous êtes habitués dans le cas d'une réalisation de ce niveau. À l'écriture de ces lignes nous étions en train de tester la configuration en pont, sujet auquel nous reviendrons. Comme vous le constatez, la matière pour le prochain article ne manque pas !

(990001-1)