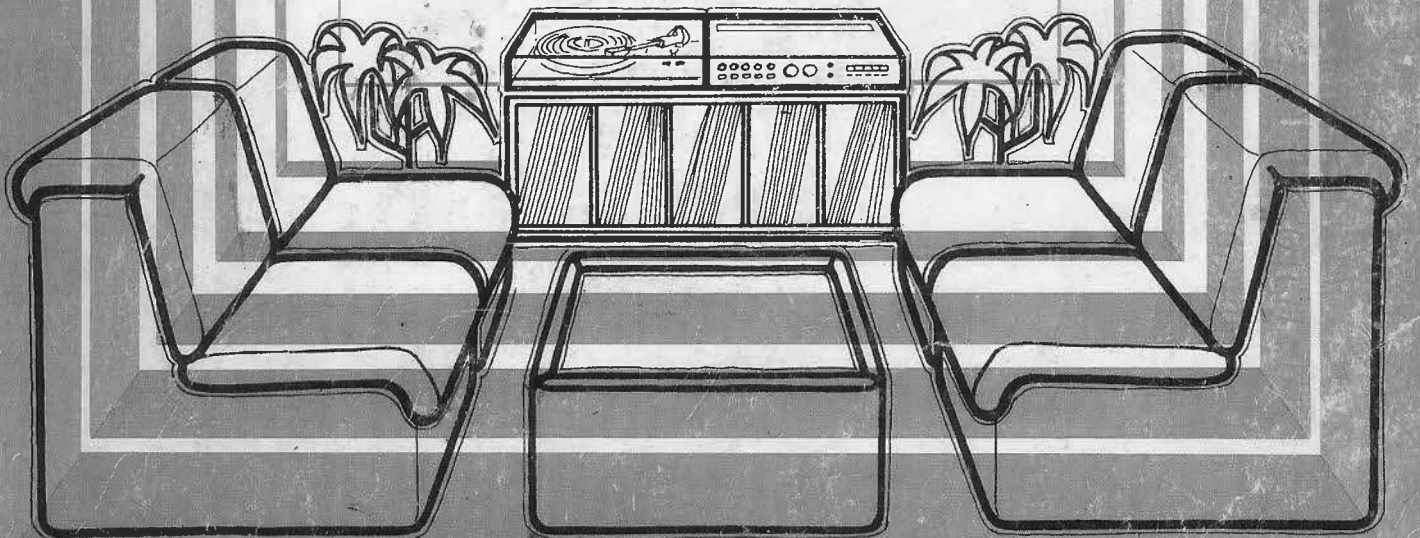
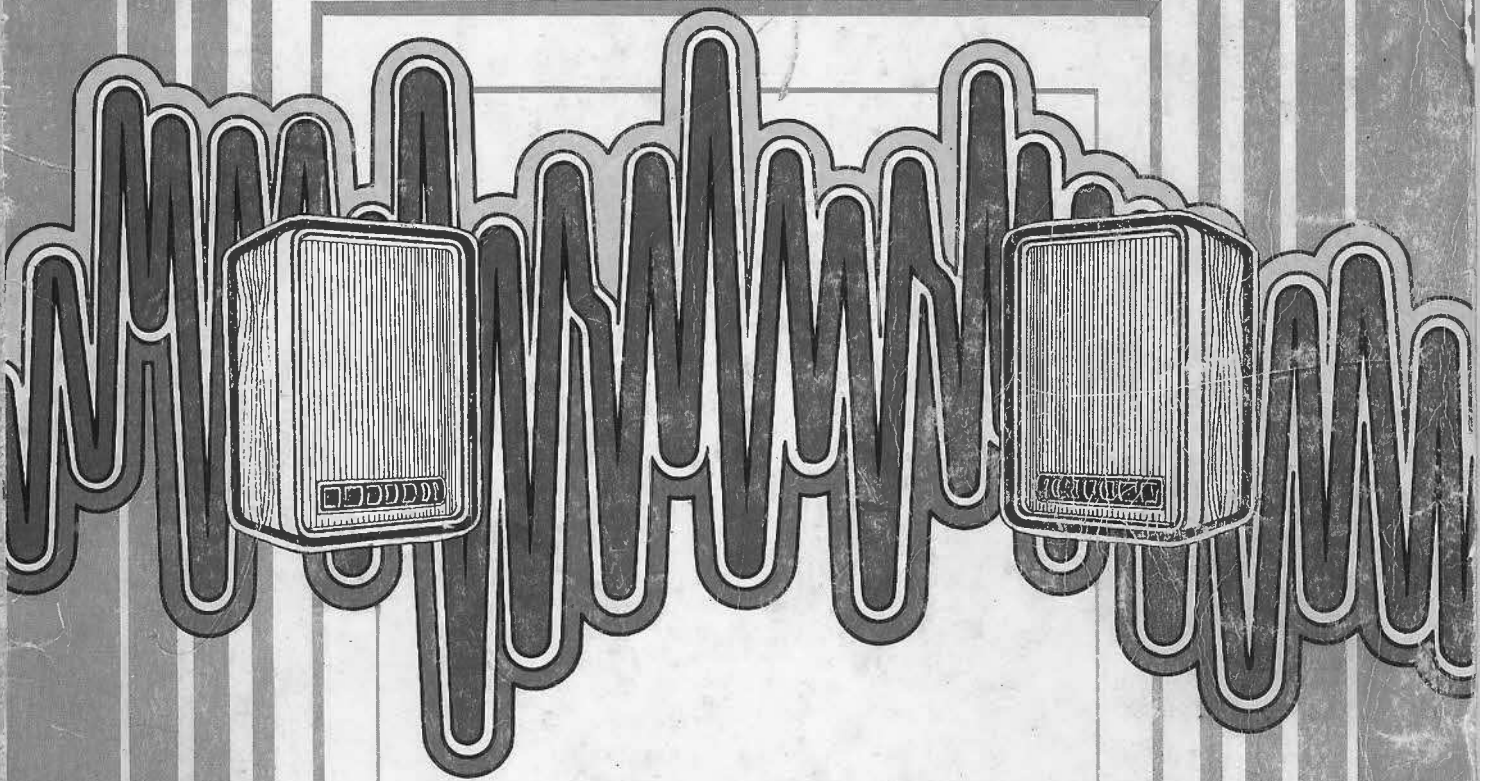


Le SON

amplification

filtrage

effets spéciaux



Société des publications Elektor

Filtres actifs pour haut-parleurs

Les systèmes de haut-parleurs de qualité sont toujours conçus sur le principe de la "division pour régner". Le spectre audio appliqué à l'entrée est fractionné en deux, trois, voire même quatre sous-bandes, chacune de celles-ci étant ensuite acheminée vers un haut-parleur réalisé en fonction du traitement de la gamme de fréquences correspondante. Le passage d'un haut-parleur à celui du niveau immédiatement supérieur dans la gamme des fréquences, se fait au moyen d'une paire de filtres complémentaires dont les flancs descendants de la réponse en fréquence "se croisent" en un point situé à quelques décibels sous le niveau de "pleine puissance". C'est la raison pour laquelle ces paires de filtres sont appelées "filtres de croisement".

Un système de haut-parleurs utilisant ces filtres est habituellement désigné comme étant "multicanal". Lorsque les cellules de filtres sont montées entre un unique amplificateur de puissance et chacun des haut-parleurs, on a affaire à un système à filtre passif. La figure 1 illustre une installation classique à trois voies. f_1 désigne la fréquence de croisement entre médiums et aigus. Les représentants du monde animal dessinés sur la figure prêtent leur cri caractéristique à la classification des basses, médiums et aigus (woofers, squawkers, tweeters).

L'idée maîtresse présidant au choix de la solution à canaux multiples réside dans le fait, qu'aux fréquences élevées, un woofer, dont la conception est optimale, est un haut-parleur sous-critique, et cela précisément pour des raisons de conception. Cela ne signifie pas qu'un jour ou l'autre une "nouvelle" méthode d'étude et de réalisation ne permettra pas de construire un haut-parleur intégral de qualité irréprochable. Le fait est qu'on n'y est simplement pas encore arrivé. Les problèmes auxquels il faut faire face sont vraiment considérables, et, dans ce domaine, l'ordinateur n'a d'autre utilité que de faire rapidement des calculs que l'être humain sait déjà faire.

Un système multicanal est nécessairement plus compliqué et plus coûteux qu'un système à haut-parleur unique. C'est là un désavantage évident. Mais

Il n'existe guère de composants qui mobilisent davantage l'attention de l'audiophile chevronné que les haut-parleurs. Cette observation s'applique particulièrement à ceux que possède la manie de l'expérimentation, ce qui les conduit parfois à ne pouvoir ou ne vouloir accepter sans réserve les idées des autres sur le sujet.

Cette tendance les entraîne éventuellement à l'investissement de sommes considérables, ne serait-ce que pour les ébénisteries, et mieux vaut ne pas insister sur les différends familiaux qui peuvent en résulter...

En tout cas, on peut toujours consacrer de bonnes espèces sonnantes et trébuchantes au remplacement des filtres séparateurs "passifs" d'un système existant, par des modèles "actifs". Naturellement, il faudra prévoir un amplificateur distinct pour chacun des haut-parleurs du dispositif.

Ce chapitre qui traite des ACF (Active Crossover Filters = filtres de croisement actifs), décrit un filtre universel capable de reproduire un grand nombre de caractéristiques de filtrage.

il existe une seconde objection à la solution du multicanal, et elle est beaucoup plus fondamentale. Au voisinage du point de croisement, les fréquences sont rayonnées par les deux haut-parleurs. Bien qu'ils soient souvent montés avec un intervalle très réduit, les deux diaphragmes rayonnants ne peuvent occuper la même position dans l'espace, et des "interférences" entre les deux ondes peuvent provoquer des irrégularités dans la réponse ainsi que dans le diagramme de rayonnement du système.

"Diviser" est une chose; mais "régner" est une toute autre chose...

La plupart des interférences peuvent être évitées lorsque les haut-parleurs dont les fréquences sont adjacentes, sont montés concentriquement, en fait l'un dans l'autre. Cela ne pose pas de problème d'ordinaire puisqu'il est possible de réaliser un tweeter optimal de dimensions plus réduites que celles d'un woofer. Dans le passé, des tweeters de l'un ou l'autre type ont été montés dans des haut-parleurs à diaphragme conique du genre woofer (ou, plus exactement, woofer-médium) et la plupart ont encore bien du succès. Le croisement est d'ordre mécanique (comme dans le "bon vieux" Philips 9710M), ou réalisé grâce à un dispositif plus évolué associant deux haut-parleurs jumeaux au croisement d'ordre électrique (comme dans le célèbre Tannoy Monitor Gold et dans certains modèles de Goodmans et d'Isophon).

Passif ou actif?

Il est incontestable qu'en l'état actuel des choses, un bon système de haut-parleurs doit comporter au moins un filtre de croisement, reste à trancher s'il sera du type "passif" ou "actif". En ce qui concerne le problème qui nous préoccupe, le filtre "actif" est celui dans lequel les bobines ont été éliminées par l'utilisation de condensateurs et d'amplificateurs.

La figure 1a montre un système à trois voies équipé d'un filtre passif classique. Celui-ci est construit en faisant appel à des bobines, des condensateurs et à tous les circuits correspondants susceptibles d'être nécessaires (par exemple,

Figure 1a. Schéma synoptique d'un système à trois voies équipé d'un filtre de croisement passif.

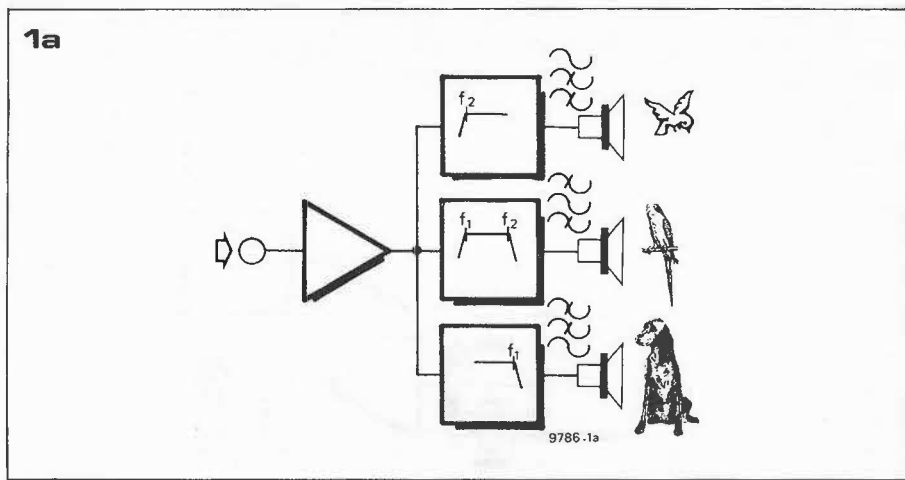


Figure 1b. A titre d'exemple, ossature d'un filtre passif à trois voies du type DN 12 SP 1004 de KEF.

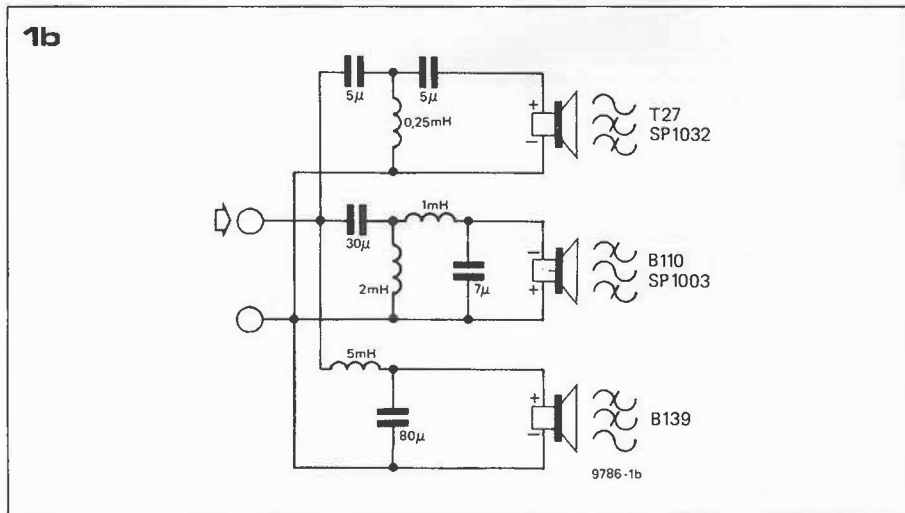


Figure 1c. Schéma synoptique d'un système à trois voies équipé d'un filtre actif.

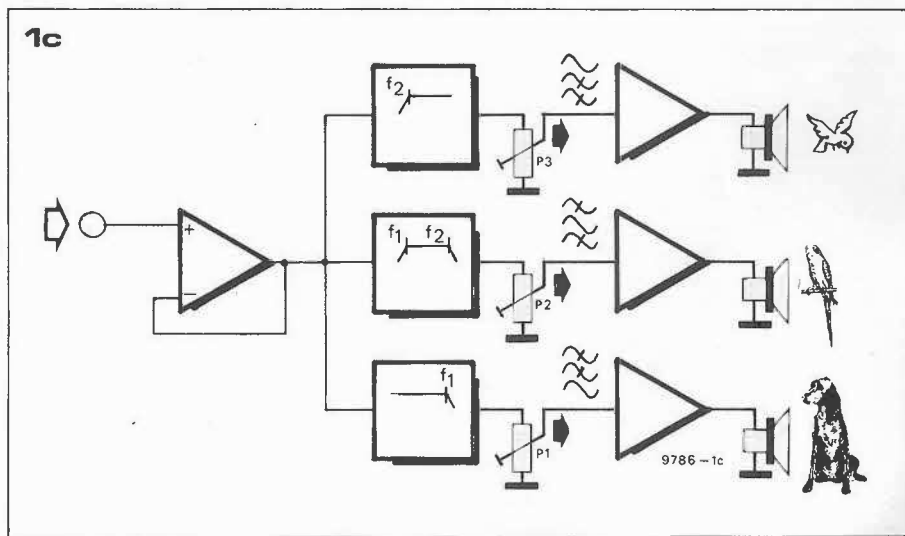
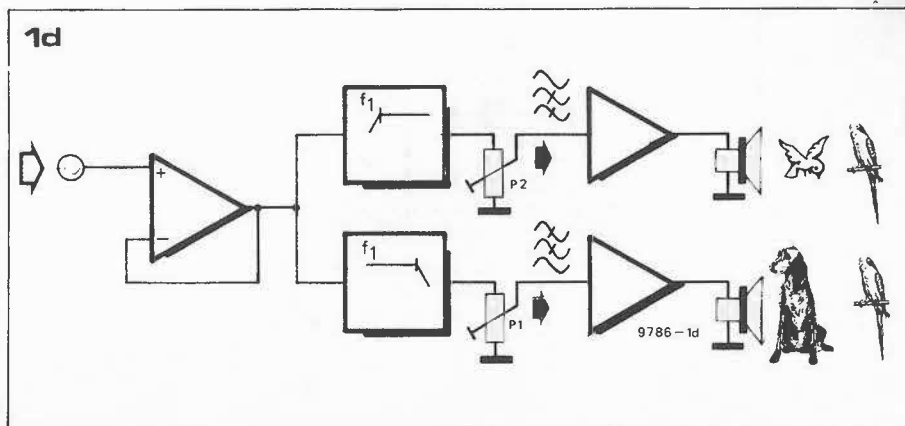


Figure 1d. Un système à deux voies équipé d'un filtre actif.

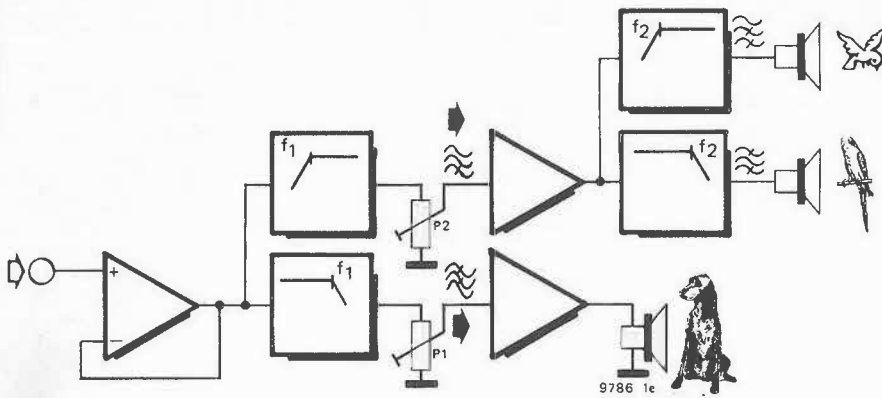


pour diminuer l'attaque d'un tweeter trop sensible). La figure 1b représente l'ossature d'un filtre passif à trois voies. Une difficulté apparaît immédiatement: la partie woofer demande qu'une bobine soit montée en série avec la bobine mobile du haut-parleur. L'inductance considérable que cela sous-entend signifie qu'il y aura une perte de puissance résultant de la résistance du matériau de la bobine sans noyau solide, constituée de nombreuses spires de fil de cuivre émaillé, ou encore qu'il se produira une distorsion provoquée par la non-linéarité d'une bobine à faibles pertes ayant un noyau ferromagnétique. Néanmoins, il ne faut pas donner trop d'importance à ces deux phénomènes. L'effet de la résistance série sur l'amortissement électrique du woofer, souvent cité, est complètement compensé par celui de la résistance de la bobine mobile et il est possible de réaliser des bobines à noyau de fer dont le taux de distorsion est insignifiant comparé à celui du haut-parleur lui-même.

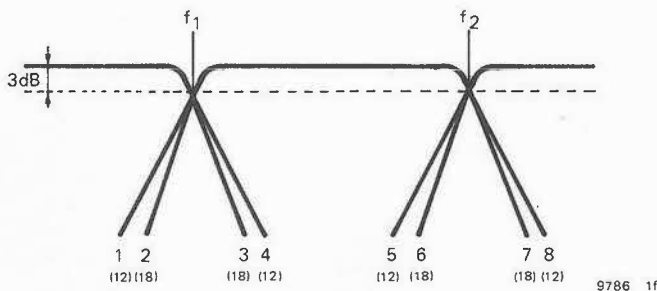
Il est plus difficile de résoudre le problème suivant: Les filtres normaux supposent une charge terminale purement résistive. Or lorsqu'un haut-parleur est connecté à un filtre de ce genre, la caractéristique finale peut ne pas être telle qu'il faudrait qu'elle soit, et elle peut même être très largement différente. L'astuce consiste à raccorder un circuit RC entre les connexions du haut-parleur pour compenser l'augmentation de l'impédance à haute fréquence (provoquée par l'inductance de la bobine), et elle gagnerait à être mieux connue; mais cela se complique lorsque l'impédance du haut-parleur comporte certaines composantes "inspirées" du "circuit" mécanique. C'est ce qui se produit d'ordinaire au voisinage de la résonance fondamentale du haut-parleur; ce peut être un défaut très coûteux dans le cas de haut-parleurs médium et aigu ayant une résonance (ainsi qu'il est normal) se situant au niveau, ou tout juste en-dessous, de leur fréquence de croisement en passe-haut.

Il est certain qu'un système à filtre passif bien conçu, vendu dans le commerce, fonctionnera très bien à tout coup, mais cette réussite est due à la com-

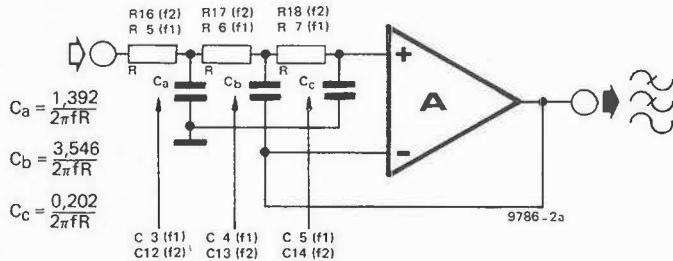
1e



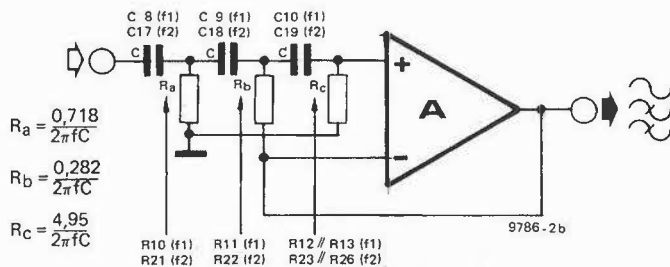
1f



2a



2b



binaison d'une solide expérience dans la réalisation et à l'utilisation d'équipements qui ne sont pas à la portée de l'audiophile amateur.

Bien que l'on puisse s'étendre bien davantage sur les filtres passifs et les circuits qui leur sont associés, le présent chapitre concerne essentiellement les systèmes *actifs* et, puisqu'il a été admis dans ce qui précède que la pratique du "do it yourself" s'accommode plus aisément des dispositifs "actifs", il faut en venir maintenant à l'exposé des moyens.

Filtres de croisement actifs

La figure 1c montre le schéma synoptique d'un filtre de croisement (électronique) actif à trois voies. Au premier abord, il apparaît clairement que chaque haut-parleur exige son propre amplificateur de puissance. En fait, cette nécessité n'est pas aussi dispendieuse qu'on pourrait le craindre, car la puissance *totale* à fournir (et par conséquent le nombre des transformateurs d'alimentation, des condensateurs de filtrage et des radiateurs) ne se trouve pas accrue par le fractionnement de l'amplificateur. Il faut considérer que le woofer s'adjugera l'amplificateur le plus puissant (c'est-à-dire, de 50 à 70 % de la puissance totale), tandis que le haut-parleur des médiums disposera des deux-tiers environ de la puissance restante. Il est évident que les caractéristiques propres de chacun des haut-parleurs utilisés seront déterminantes. Lorsqu'il est possible de se procurer des haut-parleurs ayant des impédances différentes, la répartition de la puissance entre les divers haut-parleurs peut se faire à partir d'une tension d'attaque unique, grâce à un woofer à basse impédance (4Ω, par exemple), un médium d'impédance supérieure (8Ω) et un tweeter d'impédance encore plus élevée (15Ω).

La facilité avec laquelle les différences de sensibilité entre les haut-parleurs peuvent être éliminées est un des avantages essentiels du recours aux filtres actifs. Dans le schéma de la figure 1c, cette opération est effectuée par le réglage des potentiomètres ajustables P1, P2 et P3. La figure 1d donne le schéma d'un circuit à deux voies plus simple, utilisable avec des woofers de plus faible diamètre et dont le comportement est également satisfaisant dans les fréquences intermédiaires. La figure 1e présente une autre combinaison équivalente au système à trois voies "hybride". Dans ce cas, le croisement entre les fréquences basses et les médiums est réalisé avec un filtre actif et deux amplificateurs de puissance. Cependant, les fréquences du médium et du tweeter sont délimitées par une cellule de filtrage passive.

Avant d'en arriver à l'examen des circuits de filtres, il faut noter quelques autres avantages du filtrage actif:

- la réalisation en est beaucoup plus souple;
- une modification de la

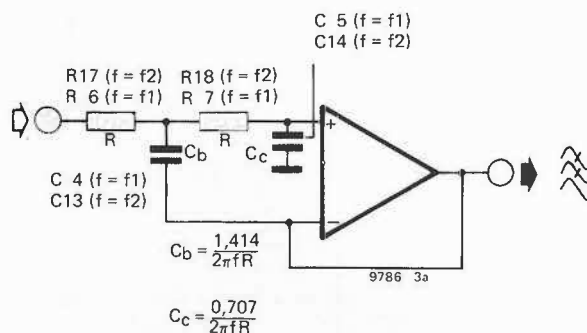
fréquence de croisement ou du niveau de l'attaque s'effectue rapidement et commodément en changeant une ou deux résistances et condensateurs, ou en modifiant le réglage d'un potentiomètre ajustable.

- il n'apparaît aucune complication provoquée par une charge terminale gênante (l'impédance du haut-parleur) lors de la construction du filtre.
- il est relativement simple d'obtenir des caractéristiques de filtres complexes, chaque fois qu'elles sont souhaitables ou nécessaires.
- puisque les amplificateurs de puissance seront habituellement installés dans les coffrets des haut-parleurs, chaque haut-parleur pourra être protégé contre les surcharges par le choix adéquat de la sensibilité maximale de l'amplificateur concerné.

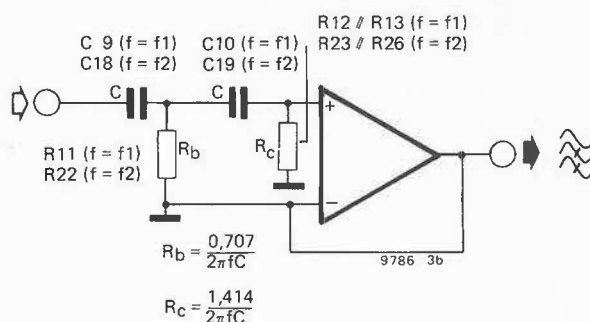
Les circuits de filtrage

La figure 1f montre un ensemble de caractéristiques de filtres analogues à celles nécessaires à un système à trois voies. Les fréquences f_1 et f_2 sont les points "-3 dB" auxquels les courbes de réponse d'une paire de filtres complémentaires "se croisent" effectivement. A la fréquence de croisement, la moitié de la puissance est acheminée au travers de chacun des deux filtres. Pour un système à trois voies, il est fréquent que f_1 se situe entre 300 et 600 Hz (mais parfois à 100 Hz, ou jusqu'à 800 Hz), et que l'autre fréquence de

3a



3b



4a

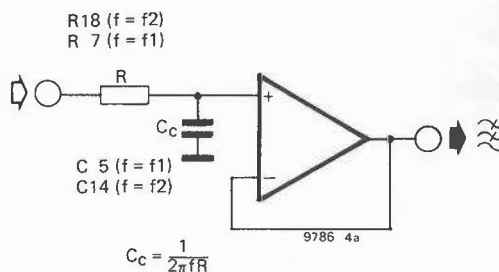


Figure 1e. Un système à trois voies hybride (actif/passif).

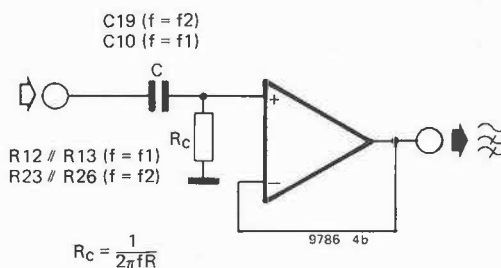
Figure 1f. Diagramme de quelques réponses en fréquence pour des pentes de 12 et 18 dB/octave, avec un ou deux croisements, en guise de contribution à l'interprétation des données du tableau 1.

Figure 2. Schéma du circuit et valeurs des composants pour un filtre de Butterworth 18 dB/octave (a) en mode passe-bas, (b) en mode passe-haut.

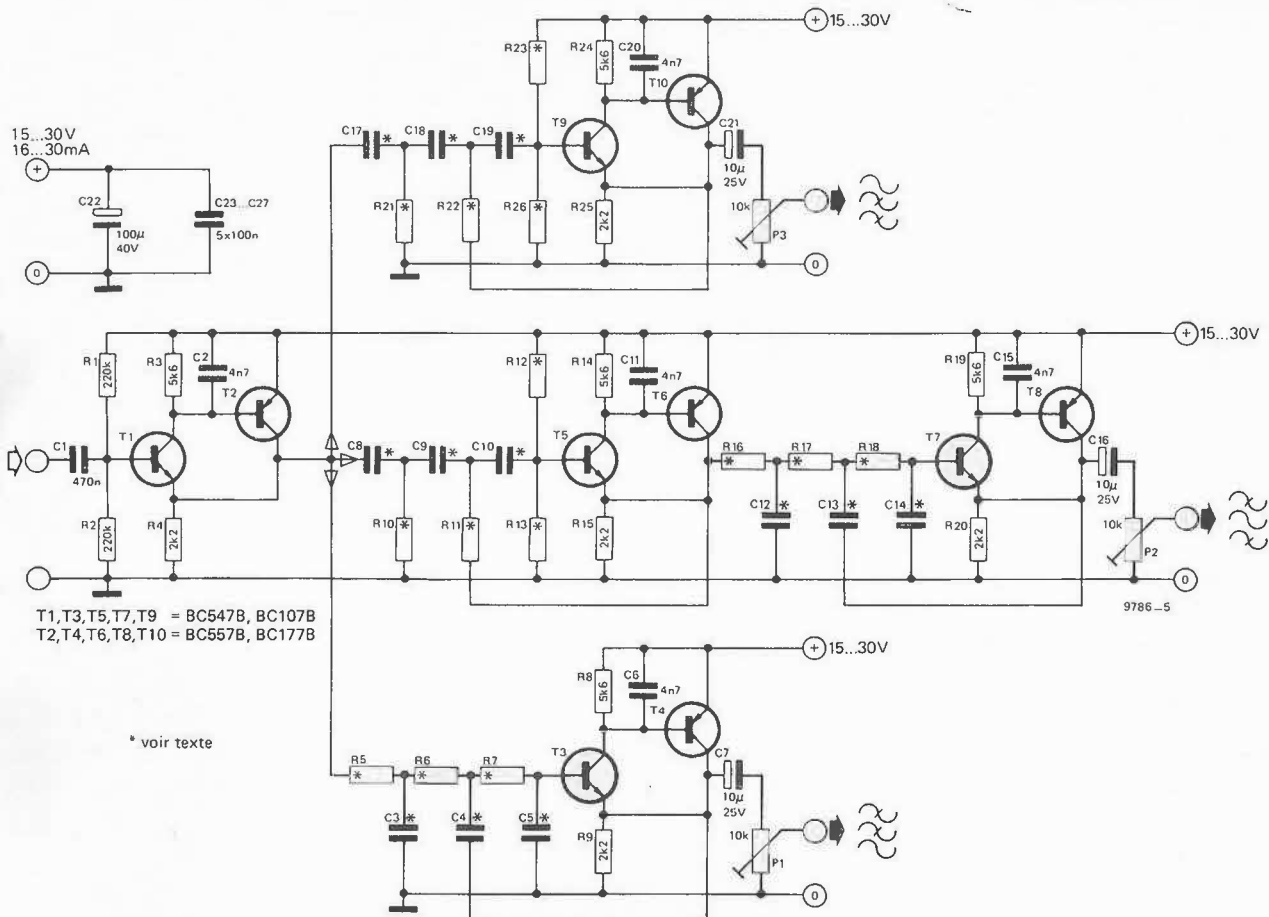
Figure 3. Schéma du circuit et valeurs des composants pour un filtre de Butterworth 12 dB/octave (a) en mode passe-bas, (b) en mode passe-haut.

Figure 4. Schéma du circuit et valeurs des composants pour un filtre de Butterworth 6 dB/octave (a) en mode passe-bas, (b) en mode passe-haut.

4b



5



croisement soit au voisinage de 5kHz généralement entre 2 et 8 kHz. Dans un système à deux voies, le croisement unique est couramment situé entre 1 et 3 kHz (typiquement aux alentours de 2 kHz).

En ce qui concerne les fréquences non transmises des différents filtres, leur pente est un multiple de 6 dB/octave (c'est-à-dire 20 dB/décade). Les courbes de la figure 1f correspondent à 12 dB/octave (1, 4, 5, 8) et 18 dB/octave (2, 3, 6, 7). En supposant que chacune des pentes puisse être utilisée pour chacun des quatre filtres, un filtre à trois voies dispose donc de 16 possibilités de combinaison. Il n'est pas toujours souhaitable de donner la même pente aux filtres d'une même paire. Il peut être nécessaire de se servir d'un *croisement asymétrique* lorsque la réponse d'un des haut-parleurs n'est pas uniforme au point de croisement. Le tableau 1 donne une liste des combinaisons réalisables.

Les quatre dernières possibilités concernent le système à deux voies. Dans ce chapitre "f1" désignera le croisement simple.

Un filtre se caractérise non seulement par la "pente limite" de la courbe descendante, nettement à l'intérieur de la "bande des fréquences non transmises", mais aussi par la "netteté

de la transition" entre la bande passante et la bande coupée. Un certain nombre de noms célèbres sont associés à la classification des filtres en catégories dont la netteté va croissante (il faut bien noter la différence entre *netteté* = *précision* et *raideur*).

Presque tous les filtres de croisement des haut-parleurs sont du type Butterworth à "amplitude uniforme maximale". Nous illustrerons donc le fonctionnement de ces filtres par des courbes du type Butterworth. Si la "bande passante" est définie comme la gamme des fréquences supérieures (passe-haut) ou inférieures (passe-bas) au point -3 dB, un filtre Butterworth donne "l'atténuation de la largeur de bande" la plus faible possible que l'on puisse obtenir sans "ondulations".

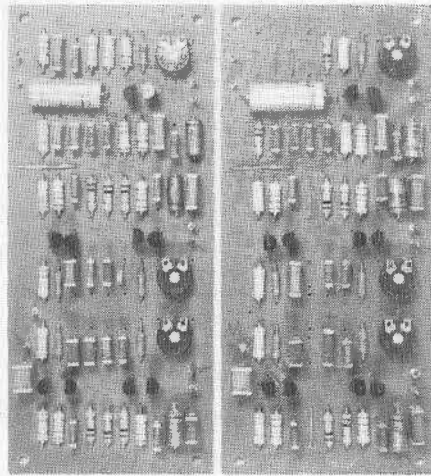
Les figures 2, 3 et 4 donnent les détails de réalisation de filtres Butterworth en mode passe-bas (figures "a"), passe-haut (figures "b") et, pour des pentes limites de 18dB/octave (figure 2), 12dB/octave (figure 3) et 6dB/octave (figure 4). Les deux jeux de références des composants correspondent aux deux croisements. (Ce point de l'exposé sera repris lorsque l'on abordera les listes de composants). L'élément actif des circuits des figures 2, 3 et 4 est un suiveur de tension. L'émetteur-suiveur est le suiveur de tension alternative le plus connu.

Puisqu'un gain en tension égal à l'unité ne peut être approché de très près que par un amplificateur dont le gain en courant est extrêmement élevé, le schéma synoptique de la figure 5 présente des "super émetteurs-suiveurs" composés chacun de deux transistors. Le calcul des valeurs des composants suppose toujours l'utilisation d'un suiveur de tension idéal; toute tentative de faire "quelques ajustements" est condamnée aux plus grandes incertitudes, et supposer qu'un suiveur à transistor unique soit idéal est beaucoup trop optimiste!

Ce chapitre n'a pas à prendre en compte les détails de l'élaboration des formules destinées à la réalisation du dispositif, il n'en sera donc pas question.

Ce qui n'empêche pas qu'il soit fait état d'une des conséquences pratiques de ces calculs. Il n'est pas toujours possible de réaliser des filtres pour lesquels tous les condensateurs et résistances déterminant la fréquence aient des valeurs adéquates. Dans le cadre de cette étude, il a été choisi des circuits ayant soit trois condensateurs d'égale valeur (mode passe-haut), soit trois résistances identiques (mode passe-bas), les valeurs des autres composants s'approchent d'autant plus que possible de celles de la série standard E 12. Bien heureusement, les filtres

Figure 5. Schéma complet du circuit d'un filtre actif pour un système à trois voies avec filtre donnant deux points de croisement 18 dB/octave symétriques.



dont le facteur "Q" est faible (et c'est le cas des Butterworth) ne perdent pas immédiatement leurs caractéristiques lorsque quelques composants diffèrent de quelques pour cent de la valeur théorique. Ce qui ne veut pas dire qu'un réalisateur tatillon ayant sous la main des résistances et condensateurs dont la valeur est conforme à 1% près ne doit succomber à sa passion de la "précision"...

Ce dernier point met fin à l'examen des aspects généraux de la construction des filtres de croisement actifs, et le temps est venu d'entrer dans les détails; l'établissement d'une "check list" facilitera cette entreprise:

- Filtres actifs seuls (figures 1c ou 1d) ou hybrides (1e)?
- Trois voies ou deux voies?
- Quels types de haut-parleurs?
- Pente des filtres?
- Quels genres d'amplificateurs?

Il vaut mieux renoncer à dégager des réponses théoriques à ces questions, car l'essentiel dépendra d'abord des préférences du constructeur, et, ensuite, des composants dont il pourra disposer. Enfin, n'oublions pas que l'objectif est de trouver une *solution exploitable!*

Il ne faut surtout pas oublier que *les haut-parleurs sont censés être utilisés à l'écoute de la musique et pas à autre*

chose. Si le son est bon, qu'importe la théorie! A partir du moment où le sens musical de l'auditeur est suffisamment développé, toute divergence entre la théorie et la satisfaction de l'oreille découle naturellement d'omissions ou d'insuffisances dans l'élaboration de cette première.

Pour simplifier ces propos, nous supposons que, premièrement, le lecteur est décidé à exécuter le travail correctement, et, secondement, qu'il a opté pour un mode de réalisation de l'enceinte.

Le choix du type de haut-parleurs constitue le problème à trancher en premier lieu. Cette décision implique d'ordinaire que l'on se plonge dans la lecture des documents édités par les fabricants, ou, tout au moins, un examen sérieux des catalogues des distributeurs spécialisés. A moins que l'on sache très précisément ce que l'on cherche, le meilleur moyen sera de choisir une combinaison recommandée par un fabricant, sous réserve de remplacer le filtre passif traditionnel par les circuits présentés dans ce chapitre. Il existe une littérature assez abondante sur la manière de réaliser des enceintes spéciales pour les graves, comme par exemple du type à pavillon replié ou à "ligne de transmission".

Le choix fondamental entre un système à deux voies ou à trois voies ne se ramène pas inéluctablement à une question de prix, la préférence étant accordée à la seconde solution lorsqu'on peut se le permettre. Au contraire, certains des meilleurs dispositifs, relativement à la qualité sonore,

comportent une combinaison de graves-médiums et d'aiguës. Cependant, ces ensembles exigent assez souvent davantage qu'un simple coffret si l'on veut que leur rendement soit réellement bon aux très basses fréquences.

Les fréquences et les pentes limites des filtres de croisement peuvent être dérivées, au moins au départ, des paramètres des filtres passifs recommandés par le fabricant de haut-parleurs. Si l'on tente de combiner l'assemblage de haut-parleurs de provenances différentes, quelques expériences préalables s'imposent (ce n'est pas toujours drôle!). Sur ce point, une ou deux indications ne seront pas inutiles et elles s'appliqueront davantage à ce qu'il "ne faut pas faire" plutôt qu'à l'inverse. Pour commencer, attention à la puissance des tweeters. Il est dans la nature des choses que leurs bobines plus faibles ne puissent traiter les puissances d'entrée importantes que les woofers encaisseront sans dommage. Les fournisseurs succombent parfois à la tentation d'indiquer un niveau de puissance élevé pour un tweeter *utilisé en combinaison avec un filtre passe-haut déterminé.* Il est certain que la "densité de puissance" dans le spectre de la musique traditionnelle diminue sensiblement au fur et à mesure de l'accroissement de la fréquence; mais cette observation n'est plus valable lorsque l'amplificateur est amené à distorsion (que ce soit accidentellement ou délibérément). En d'autres termes le filtre passe-haut associé à un tweeter déterminé aura toujours, en plus de son action sur la réponse, un effet

Tableau 1.

Les différentes combinaisons possibles de croisements symétriques ou asymétriques et des pentes de 12 ou 18 dB/octave.

Pentes des filtres pour f_1	Pentes des filtres pour f_2	Combinaison de la figure 1f	voir figures
18 12	18 18	2, 4, 6 & 7	
18 12	12 12	2, 4, 5 & 8	
18 12	18 12	2, 4, 6 & 8	
18 12	12 18	2, 4, 5 & 7	
12 18	18 18	1, 3, 6 & 7	
12 18	12 12	1, 3, 5 & 8	
12 18	18 12	1, 3, 6 & 8	
12 18	12 18	1, 3, 5 & 7	
18 18	18 18	2, 3, 6 & 7	5 & 6*
18 18	12 12	2, 3, 5 & 8	
18 18	18 12	2, 3, 6 & 8	
18 18	12 18	2, 3, 5 & 7	
12 12	18 18	1, 4, 6 & 7	
12 12	12 12	1, 4, 5 & 8	7* & 8*
12 12	18 12	1, 4, 6 & 8	
12 12	12 18	1, 4, 5 & 7	
18 18	—	2 & 3	9* & 10*
12 12	—	1 & 4	11* & 12*
12 18	—	1 & 3	
18 12	—	2 & 4	

"protecteur".

Autre indication qui vaut la peine d'être mentionnée: un haut-parleur déterminé aura toujours une réponse en fréquence s'étendant nettement plus haut que la fréquence de coupure du filtre de croisement en mode passe-bas recommandée. Mais, la réponse hors de cette gamme de fréquences est inégale ou "falote" en général, ceci étant dû au "fractionnement" du cône (ou autre diaphragme) en un certain nombre de résonances flexueuses. Ce phénomène affecte la réponse aux transitoires. Quand une atténuation du passe-haut est recommandée, abstraction faite des considérations sur la puissance d'entrée évoquées plus haut, il peut y avoir une limitation d'ordre mécanique à la qualité du son susceptible d'être obtenu en sortie, dans la gamme de fréquences non recommandée. Ce fait s'applique particulièrement aux tweeters et aux médiums du type à dôme.

Un filtre de 6dB/octave est rarement utilisé bien qu'il existe de nombreuses raisons d'estimer qu'une atténuation lente d'un woofer-médium combinée à la pente plus raide d'un tweeter donne d'excellents résultats. Il en est question présentement par souci de ne rien omettre, car, en fait, la réalisation de filtres de croisement "asymétriques" exige réellement la disponibilité d'équipement de mesure acoustique...

Les amplificateurs

Nous en arrivons maintenant à l'une des grandes causes de discussions sans fin. Combien de watts faut-il délivrer à chaque haut-parleur? Il existe de nombreuses manières de considérer cette question, en fonction du genre de musique auquel vous pensez, ou encore de ce que vous êtes prêt à investir.

Nous avons déjà noté que la dissipation (continue) dont est capable un tweeter classique est inférieure à celle d'un médium et encore sensiblement moindre que celle d'un woofer. Tout dépend simplement de la dimension physique des "moteurs" respectifs, et il semblerait évident que la capacité de charge continue des amplificateurs associés reflète ce fait. Tout ce qu'on peut espérer obtenir en disposant d'une "réserve de quelques watts", c'est de courir le risque d'avoir parfois besoin d'un haut-parleur de réserve. Il y a donc probablement mieux à faire que de chicaner sur ce point; mais, arrêtons-nous là.

Chaque haut-parleur a une capacité de charge "instantanée" déterminée, laquelle fait référence à la puissance d'attaque qu'il sera capable d'encaisser (abstraction faite de la dissipation impliquée) avant que quelque partie mobile ne soit irrémédiablement endommagée. Puisque, pour un niveau sonore donné, l'amplitude du diaphragme sera maximale à basse fréquence, la capacité de charge instantanée utile effective

dépendra du choix de la fréquence de croisement (en mode passe-haut). Ceci semble indiquer que la "capacité de charge musicale" de l'amplificateur ainsi que le choix de la fréquence de croisement doivent correspondre à la capacité de charge instantanée (la plus élevée) de chaque haut-parleur. Cette observation s'applique intégralement au médium et au tweeter: en ce qui concerne le woofer, la conclusion est analogue à la nuance près que, cette fois, la réalisation de "l'enceinte" détermine la fréquence de coupure en mode passe-haut.

Après avoir examiné la puissance limite qu'un amplificateur ne devrait pas pouvoir dépasser, nous n'avons toujours pas répondu à la vraie question: de quelle puissance faut-il disposer? La réponse, la voici: pour l'écoute normale en salle de séjour, "étonnamment peu". Si l'on s'en tient simplement à ce qu'on peut lire en lettres minuscules dans la documentation des fabricants, la plupart des puissances de sortie délivrent environ 96 dB SPL (Sound Pressure Level = niveau de pression acoustique) à une distance d'un mètre du haut-parleur (pour une mesure faite sans obstacle, est-il précisé habituellement). Dans la pratique, il se révèle très souvent que 10 à 20 watts donnent déjà une marge de sécurité très confortable!

Voici donc terminées nos réflexions sur les éléments de conception du système. Le chapitre qui va suivre présentera les circuits et les plaquettes des circuits imprimés relatifs aux filtres de 6, 12 et 18 dB/octave utilisables dans les systèmes à deux et à trois voies.

Réalisation pratique

Plusieurs décisions doivent être prises avant de commencer à réaliser un système de filtres actifs pour haut-parleurs. Les voici exposées dans l'ordre chronologique:

- Quel type de filtre: actif uniquement, hybride ou passif? Cet article ne traitera que des filtres actifs, du moins pour l'essentiel.
- Quel type de système: Deux ou trois voies? Cette décision dépendra de facteurs tels que la dimension de l'enceinte, les ressources financières disponibles et la gamme de fréquences désirée, ainsi que des préférences personnelles.
- Quels haut-parleurs? Voilà un point qui dépend en partie des réponses à la question précédente.
- Quelles fréquences de croisement et quelles pentes adopter pour les filtres? Ces décisions sont toutes deux fonction de la réponse donnée à la question précédente.
- Quels amplificateurs? Sujet de discussions sans fin; mais il est évident que la réponse dépend en partie du type de système et des haut-parleurs utilisés.

Notre attention sera tout particulièrement attirée dans cette section par les décisions relatives à la réalisation du

Liste des composants des figures 5 et 6

Résistances:

R1,R2	= 220 k
R3,R8,R14, R19 ¹ , R24 ¹	= 5k6
R4,R9,R15, R20 ¹ ,R25 ¹	= 2k2
R5 ²	voir tableau 3
R6 ³	voir tableau 3 ou 5
R7	voir tableau 3, 5 ou 7
R10 ⁴	voir tableau 4
R11 ⁵	voir tableau 4 ou 6
R12,R13	voir tableau 4, 6 ou 8
R16 ^{2,6}	voir tableau 3
R17 ^{3,6} ,R18 ¹	voir tableau 3 ou 5
R21 ^{1,4}	voir tableau 4
R22 ¹ ,R23 ¹ ,R26 ¹	voir tableau 4 ou 6
P1,P2,P3 ¹	10 k ajustable

Condensateurs:

C1	= 470 n
C2,C6,C11, C15 ¹ ,C20 ¹	= 4n7
C3 ⁴	voir tableau 3
C4 ⁵	voir tableau 3 ou 5
C5	voir tableau 3, 5 ou 7
C7,C16,C21 ¹	= 10 μ/25 V
C8 ²	voir tableau 4
C9 ³	voir tableau 4 ou 6
C10	voir tableau 4, 6 ou 8
C12 ^{1,4}	voir tableau 3
C13 ⁶ ,C14 ¹	voir tableau 3 ou 5
C17 ^{1,2}	voir tableau 4
C18 ¹ ,C19 ¹	voir tableau 4 ou 6
C22	= 100 μ/40 V
C23,C24,C25, C26 ¹ ,C27 ¹	= 100 n

Semiconducteurs:

T1,T3,T5,T7 ¹ , T9 ¹	BC 107B, BC 547B ou équivalent
T2,T4,T6,T8, T10 ¹	BC 177B, BC 557B ou équivalent

NOTES

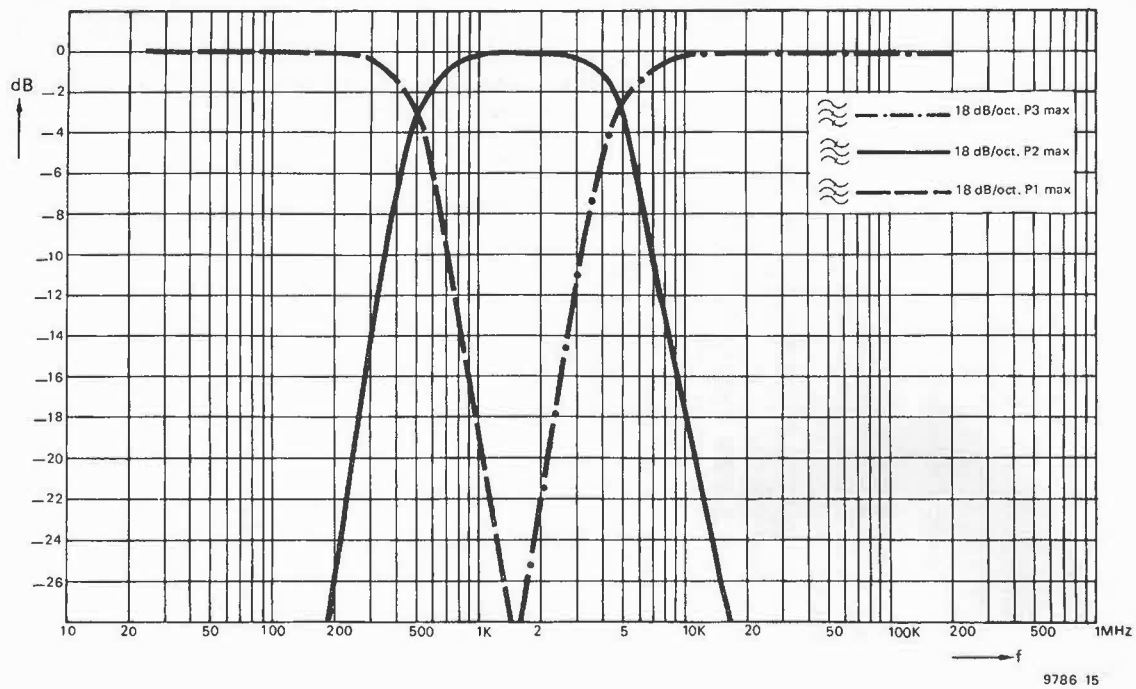
- ¹ signifie: éliminer ce composant pour le filtre à deux voies
- ² signifie: remplacer par un strap pour 12 et 6 dB/octave
- ³ signifie: remplacer par un strap pour 6 dB/octave
- ⁴ signifie: éliminer ce composant pour 12 ou 6 dB/octave
- ⁵ signifie: éliminer ce composant pour 6 dB/octave
- ⁶ signifie: remplacer par un strap pour filtre à deux voies

NB. Les pentes de 6 dB/octave ne sont utilisables que dans un nombre très limité de systèmes à deux voies; en conséquence, les tableaux ne donnent aucune indication pour les systèmes à trois voies.

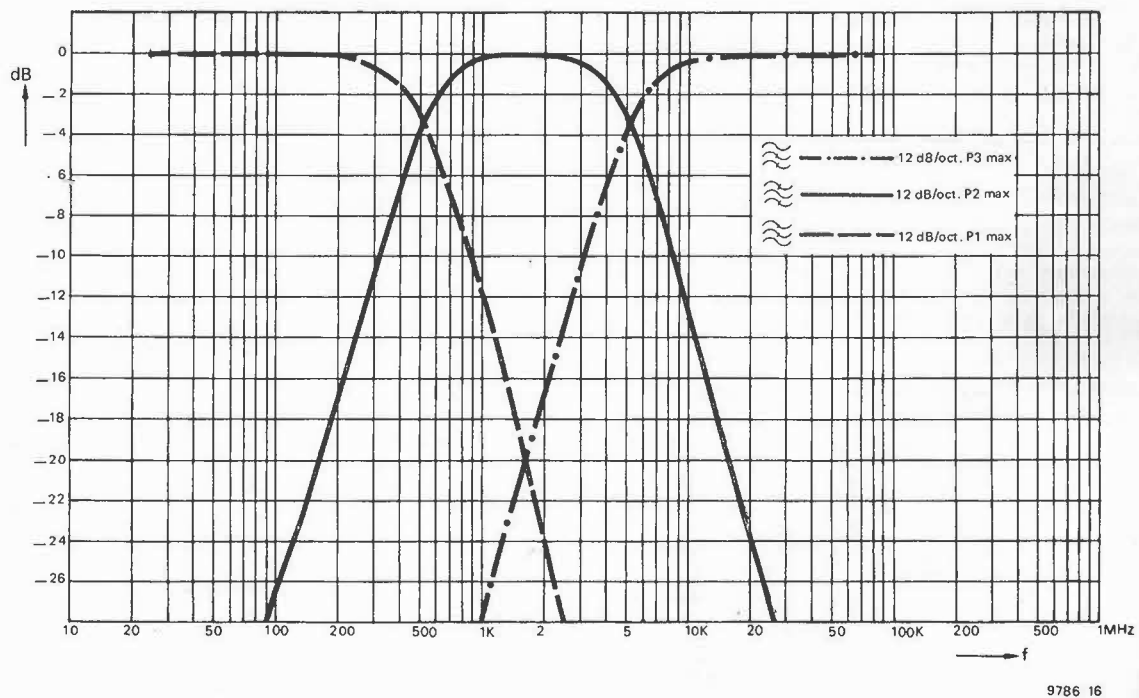
Figure 15. Réponse en fréquence du circuit de la figure 5, pour $f_1 = 500$ Hz et $f_2 = 5$ kHz.

Figure 16. Réponse en fréquence du circuit de la figure 7 pour les mêmes points de croisement que ceux de la figure 15.

15



16



filtre proprement dit: deux ou trois voies? quelle(s) fréquence(s) de croisement et quelles pentes? S'il s'agit d'un système à deux voies, la fréquence de croisement est supposée être f_1 , f_2 peut donc être écartée. Pour un système à trois voies, f_1 et f_2 sont respectivement les fréquences de croisement inférieure et supérieure. Les pentes de filtre peuvent être de 6, 12 ou 18 dB/octave, ces deux dernières sont repérées numériquement dans la figure 1f.

En guise d'exemple, un système à trois voies dont les fréquences de croisement sont de 400 Hz et 4 kHz, les pentes de filtres de 12 dB/octave au point de croisement inférieur et de 18 dB/octave au point de croisement supérieur peut être désormais défini brièvement par les caractéristiques suivantes: $f_1 = 400$ Hz, $f_2 = 4$ kHz, pentes de filtre 1, 4, 6 et 7". Cette notation abrégée sera couramment utilisée dans les tableaux qui accompagnent ce chapitre.

Le schéma du circuit le plus complexe est présenté en figure 5: c'est celui d'un système à trois voies dont toutes les pentes sont de 18 dB/octave; il correspond au tracé du circuit et à l'implantation des composants de la figure 6. Lorsqu'une combinaison moins complexe est à réaliser, il suffit de faire passer les straps nécessaires au travers des orifices prévus à cet effet dans la plaquette du circuit imprimé. Des détails complémentaires seront donnés

Tableau 2

réponse (voir figure 1f)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
composant										
R5			t3	st					st	
R6			t3	t5					st	
R7			t3	t5					t7	
C3			t3	—					—	
C4			t3	t5					—	
C5			t3	t5					t7	
C8	st	t4								st
C9	t6	t4								st
C10	t6	t4								t8
R10	—	t4								—
R11	t6	t4								—
R12	t6	t4								t8
R13	t6	t4								t8
R16							t3	st		
R17							t3	t5		
R18							t3	t5		
C12							t3	—		
C13							t3	t5		
C14							t3	t5		
C17					st	t4				
C18					t6	t4				
C19					t6	t4				
R21					—	t4				
R22					t6	t4				
R23					t6	t4				
R26					t6	t4				
voir figure	3b	2b	2a	3a	3b	2b	2a	3a	4a	4b

Liste des renvois aux tableaux donnant les valeurs des composants correspondant aux "courbes de réponse en fréquence possibles" de la figure 1f. Les références des composants sont celles indiquées dans le circuit complet et le plan d'implantation général (figures 5 & 6); t3 à t8 sont les références des tableaux, "st" signifie strap, "—" signifie éliminer.

Tableau 3

Filtre passe-bas 18 dB/octave dont la réponse en fréquence est celle de la figure 2a, pour les fréquences de croisement nominales obtenues en se servant des valeurs des composants de la série E 12.

f (Hz)	R (kΩ)			C _a (nF)	C _b (nF)	C _c (nF)
f1	R5	R6	R7	C3	C4	C5
f2	R16	R17	R18	C12	C13	C14
97	10	10	10	220	560	33
119	10	10	10	180	470	27
146	10	10	10	150	390	22
179	10	10	10	120	330	18
214	10	10	10	100	270	15
268	10	10	10	82	220	12
322	10	10	10	68	180	10
392	10	10	10	56	150	8.2
472	10	10	10	47	120	6.8
574	10	10	10	39	100	5.6
684	10	10	10	33	82	4.7
824	10	10	10	27	68	3.9
974	10	10	10	22	56	3.3
1191	10	10	10	18	47	2.7
1461	10	10	10	15	39	2.2
1786	10	10	10	12	33	1.8
2143	10	10	10	10	27	1.5
2679	10	10	10	8.2	22	1.2
3215	10	10	10	6.8	18	1
3921	8.2	8.2	8.2	6.8	18	1
4728	6.8	6.8	6.8	6.8	18	1
5742	5.6	5.6	5.6	6.8	18	1
6841	4.7	4.7	4.7	6.8	18	1
8244	3.9	3.9	3.9	6.8	18	1
9743	3.3	3.3	3.3	6.8	18	1

Tableau 4

Filtre passe-haut 18 dB/octave dont la réponse en fréquence est celle de la figure 2b, pour les fréquences de croisement nominales obtenues en se servant des valeurs des composants de la série E 12.

f (Hz)	R _a (kΩ)	R _b (kΩ)	R _c (kΩ)	C (nF)
f1	R10	R11	R12 = R13	C8 = C9 = C10
f2	R21	R22	R23 = R26	C17 = C18 = C19
114	10	3.9	150	100
139	10	3.9	150	82
168	10	3.9	150	68
204	10	3.9	150	56
243	10	3.9	150	47
293	10	3.9	150	39
346	10	3.9	150	33
423	10	3.9	150	27
519	10	3.9	150	22
635	10	3.9	150	18
762	10	3.9	150	15
952	10	3.9	150	12
1140	10	3.9	150	10
1390	10	3.9	150	8.2
1680	10	3.9	150	6.8
2040	10	3.9	150	5.6
2430	10	3.9	150	4.7
2930	10	3.9	150	3.9
3460	10	3.9	150	3.3
4230	10	3.9	150	2.7
5190	10	3.9	150	2.2
6350	10	3.9	150	1.8
7620	10	3.9	150	1.5
9520	10	3.9	150	1.2
11400	10	3.9	150	1

Tableau 5

Filtre passe-bas 12 dB/octave dont la réponse en fréquence est celle de la figure 3a, pour les fréquences de croisement nominales obtenues en se servant des valeurs des composants de la série E 12.

f (Hz)	R (kΩ)	C _b (nF)	C _c (nF)
f1	R6 = R7	C4	C5
f2	R17 = R18	C13	C14
102	22	100	47
125	18	100	47
150	15	100	47
188	12	100	47
225	10	100	47
274	10	82	39
331	10	68	33
402	10	56	27
479	10	47	22
577	39	10	4.7
682	33	10	4.7
834	27	10	4.7
1020	22	10	4.7
1250	18	10	4.7
1500	15	10	4.7
1880	12	10	4.7
2250	10	10	4.7
2740	10	8.2	3.9
3310	10	6.8	3.3
4020	10	5.6	2.7
4790	10	4.7	2.2
5840	8.2	4.7	2.2
7040	6.8	4.7	2.2
8550	5.6	4.7	2.2
10190	4.7	4.7	2.2

Tableau 6

Filtre passe-haut 12 dB/octave dont la réponse en fréquence est celle de la figure 3b, pour les fréquences de croisement nominales obtenues en se servant des valeurs des composants de la série E 12.

f (Hz)	C (nF)	R _b (kΩ)	R _c (kΩ)
f1	C9 = C10	R11	R12 = R13
f2	C18 = C19	R22	R23 = R26
113	100	10	39
137	82	10	39
165	68	10	39
201	56	10	39
239	47	10	39
289	39	10	39
341	33	10	39
417	27	10	39
511	22	10	39
625	18	10	39
750	15	10	39
938	12	10	39
1130	10	10	39
1370	8.2	10	39
1650	6.8	10	39
2010	5.6	10	39
2390	4.7	10	39
2890	3.9	10	39
3410	3.3	10	39
4170	2.7	10	39
5110	2.2	10	39
6250	1.8	10	39
7500	1.5	10	39
9380	1.2	10	39
11300	1	10	39

Tableau 7

Filtre passe-bas 6 dB/octave dont la réponse en fréquence est celle de la figure 4a, pour les fréquences de croisement nominales obtenues en se servant des valeurs des composants de la série E 12.

f (Hz)	R (kΩ)	C _c (nF)
f1	R7	C5
106	10	150
133	10	120
159	10	100
194	10	82
234	10	68
284	10	56
339	10	47
408	10	39
482	10	33
589	10	27
723	10	22
884	10	18
1060	10	15
1330	10	12
1590	10	10
1940	10	8.2
2340	10	6.8
2840	10	5.6
3390	10	4.7
4080	10	3.9
4820	10	3.3
5890	10	2.7
7230	10	2.2
8840	10	1.8
10600	10	1.5

Tableau 8

Filtre passe-haut 6 dB/octave dont la réponse en fréquence est celle de la figure 4b, pour les fréquences de croisement nominales obtenues en se servant des valeurs des composants de la série E 12.

f (Hz)	R _c (kΩ)	C (nF)
f1	R12 = R13	C19
106	22	150
133	22	120
159	22	100
194	22	82
234	22	68
284	22	56
339	22	47
408	22	39
482	22	33
589	22	27
723	22	22
884	22	18
1060	22	15
1330	22	12
1590	22	10
1940	22	8.2
2340	22	6.8
2840	22	5.6
3390	22	4.7
4080	22	3.9
4820	22	3.3
5890	22	2.7
7230	22	2.2
8840	22	1.8
10600	22	1.5

dans la suite de l'exposé.

Pour plus de facilité, tous les circuits et implantations de composants ont été reproduits plusieurs fois. Pour chacun sont représentés le schéma simplifié et les pontages par straps correspondant aux filtres moins complexes. Les schémas dont l'illustration a été retenue sont:

- Trois voies à pentes de 12 dB/octave (figures 7 et 8)
- Deux voies à pentes de 18 dB/octave (figures 9 et 10)
- Deux voies à pentes de 12 dB/octave (figures 11 et 12)
- Deux voies à pentes de 6 dB/octave (figures 13 et 14)

Les réponses en fréquence du système de la figure 5 sont enregistrées selon les courbes de la figure 15. La figure 16 donne les courbes du système de la figure 7. Dans les deux cas, les fréquences sélectionnées pour l'illustration sont de 500 Hz (f1) et 5 kHz (f2).

Choix de la réalisation

Voici une méthode pour sélectionner la réalisation désirée: d'abord, en se servant de la figure 1f ou du tableau 1, décider quel ensemble de caractéristiques de filtre va être réalisé, et quelles fréquences de croisement sont à retenir (valeurs de f1 et de f2). Le tableau 2 peut alors être utilisé comme une sorte "d'horaire de chemin de fer" pour déter-

miner quelles sont les positions de la plaquette de circuit imprimé qui resteront "en l'air", ou seront shuntées par un strap; il faudra se référer aux tableaux 3 à 8 pour connaître la valeur des composants. Cette procédure va être illustrée par des exemples.

Connexions des haut-parleurs

Comme pour les filtres passifs, il est important de raccorder chacun des haut-parleurs en position de phase relative correcte. Les règles sont les suivantes:

- Quand le filtre délivre un croisement symétrique à trois voies avec une pente de 12 dB/octave, le médium doit être connecté dans le sens inverse de celui du woofers et du tweeter. Les deux systèmes d'un ensemble stéréo doivent être raccordés de manière identique.

+	-	+
L	M	H
-	+	-

- Quand le filtre délivre un croisement symétrique à trois voies avec des pentes de 12 dB/octave, le tweeter est connecté dans le sens inverse de celui du woofers-médium

+	-
L	H
-	+

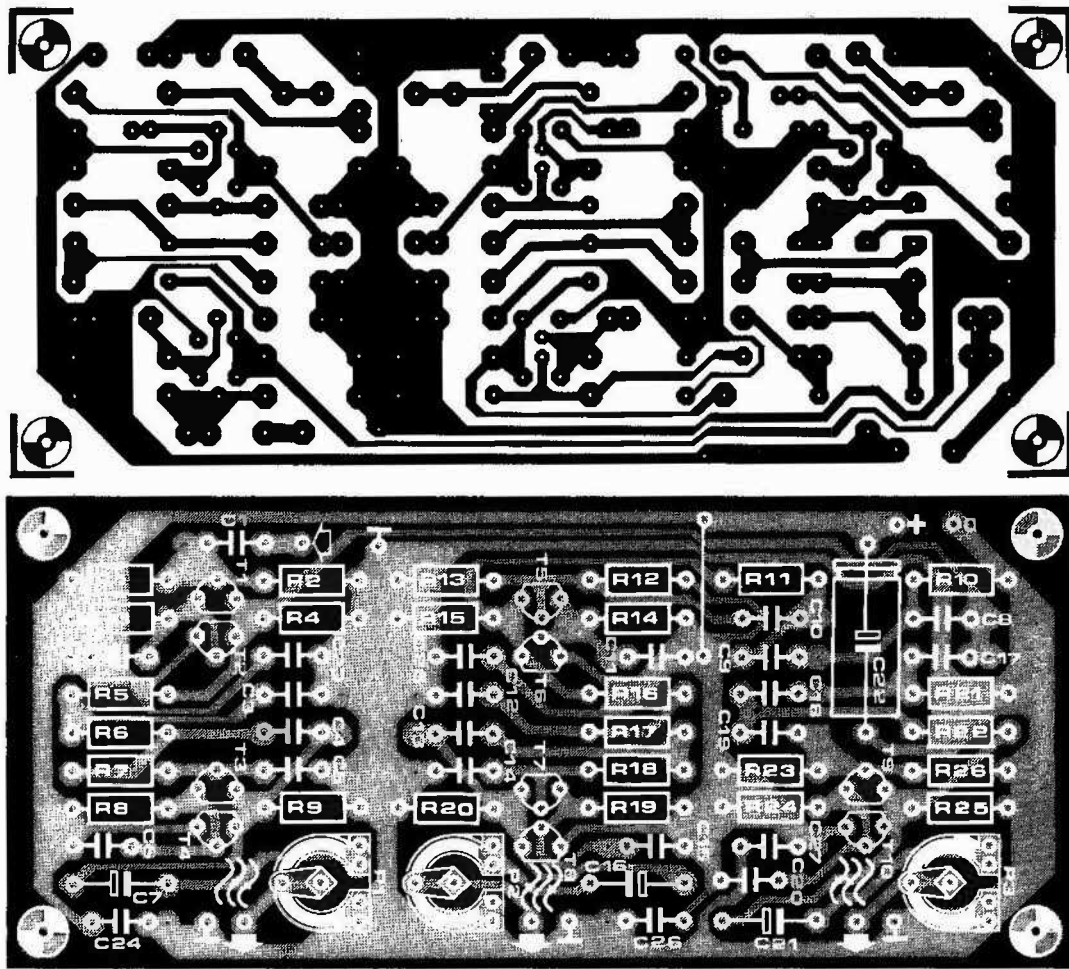
- Le problème est différent pour les pentes de 18 et 6 dB/octave avec lesquelles le déphasage au croisement totalise 270 ou 90°. Il convient, dans ce cas, de raccorder tous les haut-parleurs dans le même sens.

Les condensateurs électrochimiques de couplage des haut-parleurs dans les canaux médium et aigus peuvent avoir en principe une valeur légèrement inférieure à celle du condensateur monté dans les graves, ce qui fait gagner de la place et permet de réaliser une légère économie. Mais, il faut garder présent à l'esprit que la valeur affaiblie d'un composant aura une valeur nominale en courant alternatif plus faible ("courant ondulatoire"). La valeur la plus basse qui ait encore un courant nominal au moins égal à la valeur efficace maximum appliquée au haut-parleur, aura une capacitance suffisamment importante. En cas de doute, il faut s'assurer que le point de coupure RC du condensateur, compte tenu de l'impédance nominale du haut-parleur, soit de 3 à 5 fois inférieure à la fréquence de croisement passe-haut dans le canal concerné. Il faut aussi appliquer le facteur 3 à 5 au woofers! Cela se traduit dans la formule approchée bien connue:

$$C = \frac{10^5}{f_c} (\mu F),$$

où f_c désigne la fréquence de croisement inférieure.

6



On ne gagne rien non plus d'appréciable en réduisant la valeur des condensateurs de couplage d'entrée des amplificateurs de médium et d'aigus (on risque même d'exagérer un déphasage ou de faire apparaître une atténuation d'amplitude). C'est pour la même raison que C16 et C21 du circuit de filtre ont une capacité "inutilement importante".

Une dernière remarque concerne la fonction des potentiomètres ajustables P1, P2 et P3 dont le rôle n'est pas de servir au réglage de la commande de tonalité! Ils ne doivent être utilisés que pour compenser d'éventuelles inégalités de sensibilité des divers canaux amplificateur/haut-parleur. On peut cependant tolérer un déséquilibre délibéré qui ne soit pas supérieur à 3 dB (ce sont des correcteurs de tonalité, après tout!).

Mode d'utilisation des tableaux

- Décider du type de filtre nécessaire et se reporter à la figure 1f et/ou au tableau 1 afin de déterminer la "notation abrégée". Il faut noter que les réponses 9 et 10 sont 6 dB/octave en passe-bas et passe-haut respectivement et qu'elles ne sont pas présentées en figure 1f.
- Se reporter au tableau 2. Sous

chacune des (deux ou quatre) courbes de réponse choisies, se trouvent d'autres informations relatives au groupe de composants qui servent à déterminer la fréquence. Ce peut être soit "st" (strap), "-" (éliminer), ou une référence à l'un des tableaux 3 à 8 (par exemple, "t3" signifie "se reporter au tableau 3").

- Se reporter au tableau indiqué. Par exemple, s'assurer que la pente 3 est nécessaire pour une fréquence de croisement inférieure f_1 égale à 400 Hz. Sous la réponse 3, le tableau 2 fait référence au tableau 3 pour R5 à R7 et C3 à C5. En se reportant au tableau 3, la fréquence la plus proche de celle désirée (400 Hz) est 392 Hz. Pour cette fréquence, les valeurs de R5 à R7 sont indiquées comme étant 10 k Ω , C3 = 56 n, C4 = 150 n et C5 = 8 n2.

Système à trois voies, 12 dB/octave

A titre d'exemple, supposons que l'on désire un système de filtre à trois voies dont la pente soit de 12 dB/octave (pentes 1, 4, 5 et 8 en figure 1f) et dont les fréquences de croisement soient $f_1 = 400$ Hz et $f_2 = 3$ kHz.

En se reportant au tableau 2 on peut lire pour la pente 1, C8 = strap; R10 = éliminée; C9, C10, R11, R12, R13 seront trouvés dans le tableau 6, dans lequel la fréquence la plus proche de celle désirée pour f_1 est 417 Hz. Les valeurs des composants correspondants sont C9 = C10 = 27 n; R11 = 10 k; R12 = R13 = 39 k.

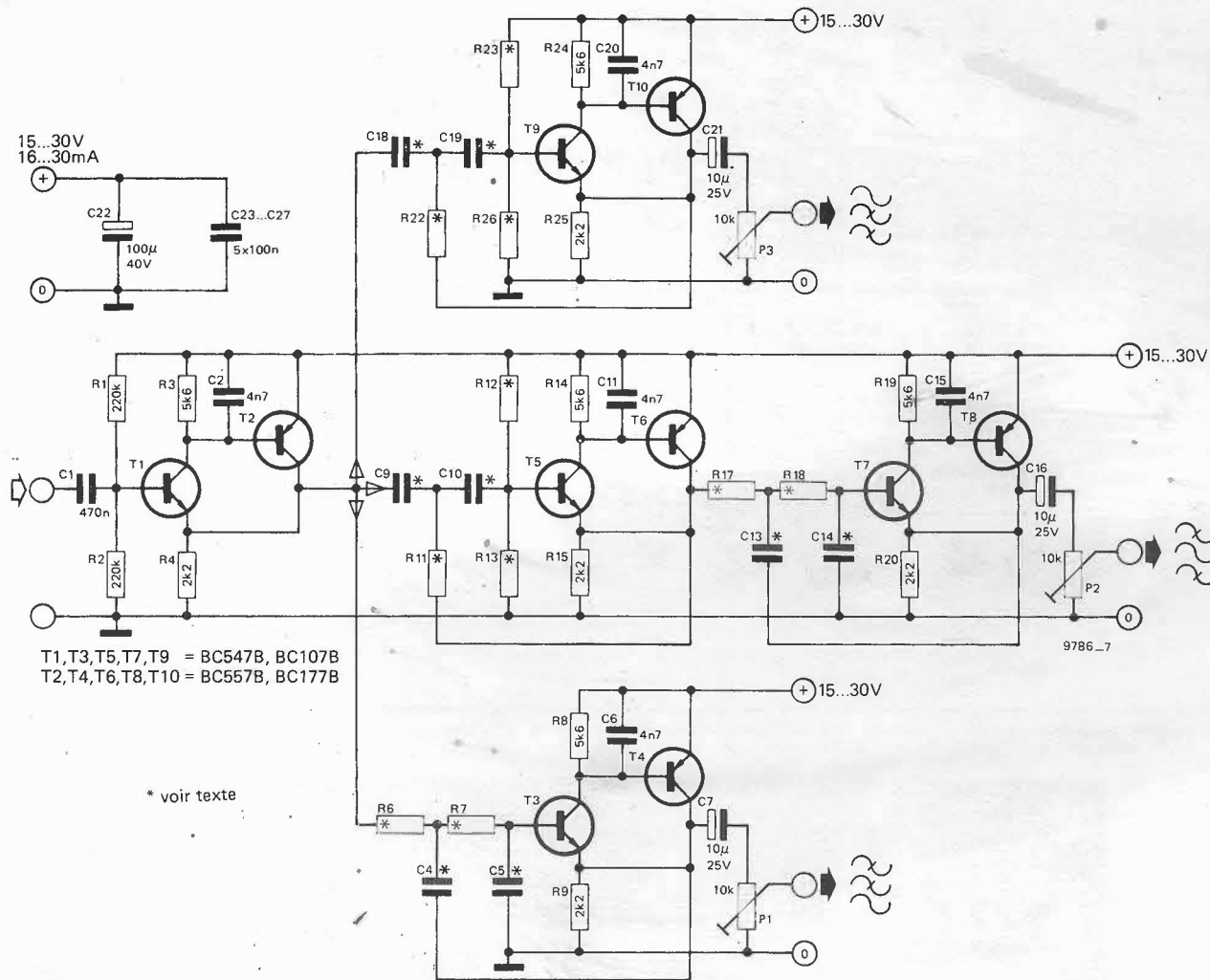
De même pour la pente 4, R5 = strap; C3 = éliminée; R6, R7, C4 et C5 seront trouvés dans le tableau 5, dans lequel les valeurs des composants correspondants à $f_1 = 402$ Hz sont R6 = R7 = 10 k; C4 = 56 n et C5 = 27 n.

Pour la pente 5: C17 = strap; R21 = éliminée; C18, C19, R22, R23 et R26 seront trouvés dans le tableau 6. Pour $f_2 = 2890$ Hz (valeur la plus proche de 3 kHz) les valeurs des composants sont: C18 = C19 = 3n9; R22 = 10 k; R23 = R26 = 39 k.

Et enfin pour la pente 8: R16 = strap; C12 = éliminée; R17, R18, C13 et C14 seront trouvés dans le tableau 5. Pour $f_2 = 2740$ Hz, on a: R17 = R18 = 10 k; C13 = 8n2; C14 = 3n9.

En se reportant à la liste des composants de la figure 6 on trouve les valeurs de tous les autres composants. Il faut remarquer que les notes se trouvant au bas des pages 2 et 4 s'appliquent dans le

7



8

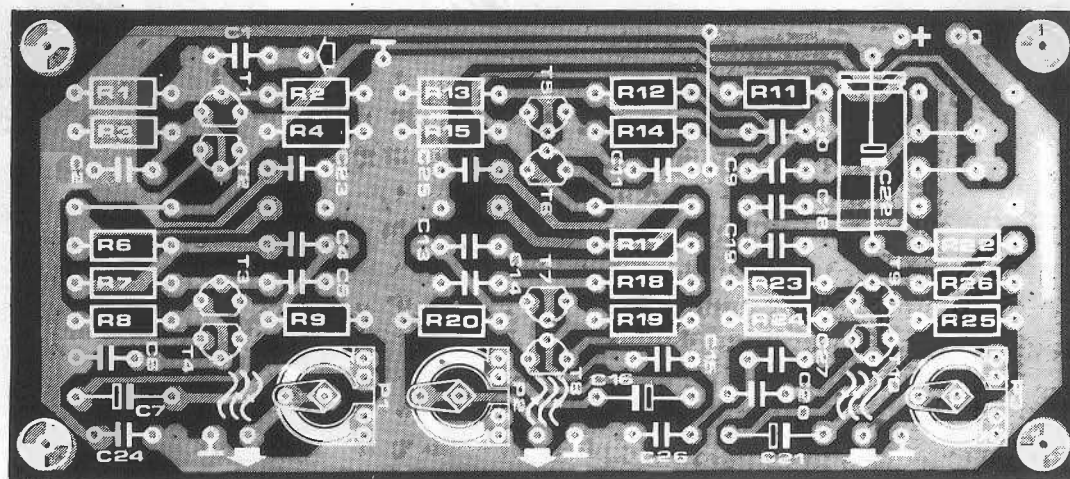


Figure 6. Circuit imprimé et implantation des composants pour le système de la figure 5 (EPS 9786).

Figure 7. Schéma du circuit d'un filtre trois voies actif avec croisements 12 dB/octave symétriques.

Figure 8. Implantation des composants modifiée pour le circuit de la figure 7.

cas présent (12 dB/octave); néanmoins, le tableau 2 nous avait déjà indiqué de placer les straps et d'omettre le montage de certains composants.

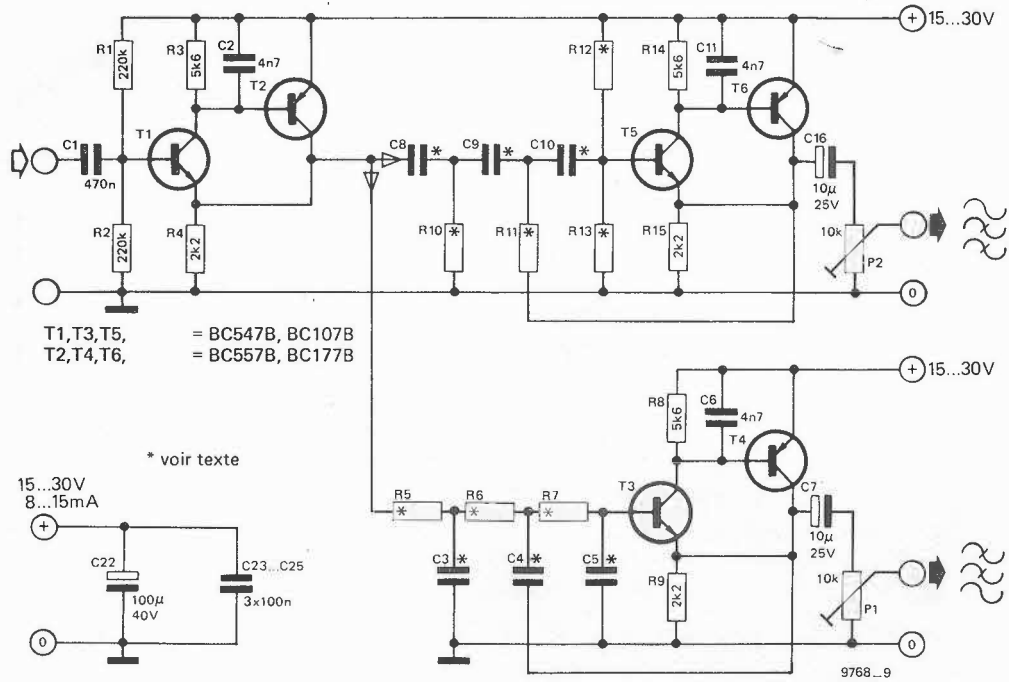
Système à deux voies, 18 dB/octave

Le filtre à deux voies est réalisé sur la même plaquette. Dans ce cas, le collec-

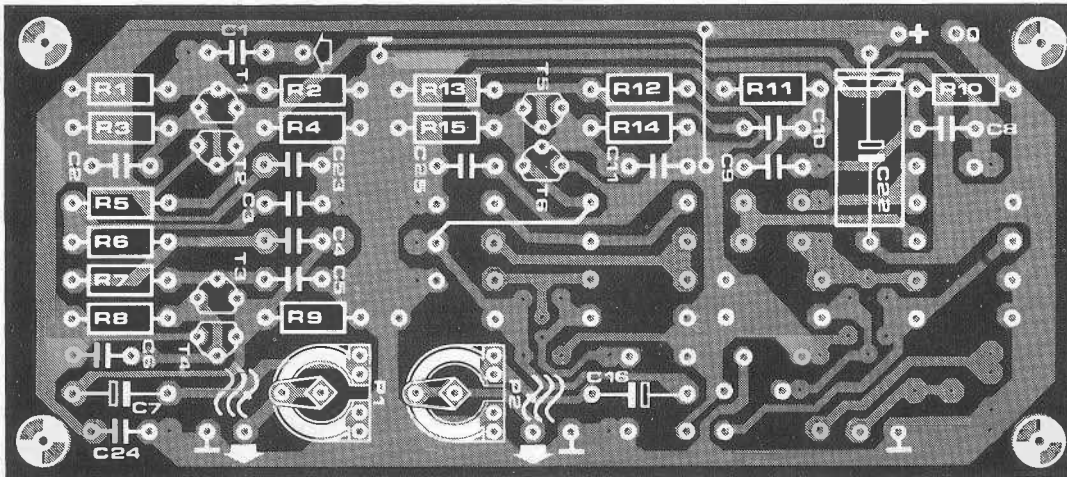
teur de T6 doit être réuni à l'extrémité "chaude" de C16, quelles que soient les pentes choisies, et le gain du canal "aigus" est ajusté préalablement grâce à P2.

Ce résultat devrait être obtenu automatiquement par une bonne utilisation des tableaux. A titre d'exemple, supposons que les pentes 2 et 3 soient retenues

9



10



pour une fréquence de croisement $f_1 = 500$ Hz.

Pour la pente 2, le tableau 2 renvoie au tableau 4 pour les composants C8 à C10 et R10 à R13. Pour la pente 3, le tableau renvoie au tableau 3 pour R5 à R7 et C3 à C5.

En se reportant d'abord au tableau 4, nous lisons pour $f_1 = 519$ Hz: R10 = 10 k; R11 = 3k9; R12 = R13 = 150 k, C8 = C9 = C10 = 22 n. Passant ensuite au tableau 3, les valeurs des composants pour $f_1 = 472$ Hz sont: R5 = R6 = R7 = 10 k; C3 = 47 n; C4 = 120 n; C5 = 6n8.

Enfin, la liste des composants de la figure 6 donne les valeurs de tous ceux qui ne figurent pas ci-dessus. La note de bas de page 1 s'applique au cas présent: "éliminer ce composant pour filtre à deux voies". Cela revient à dire que T9 et T10 (figure 5) sont supprimés ainsi que tous les composants qui leur sont

associés; de même pour T7 et T8. En outre, la note de bas de page 6 précise: "remplacer par un strap, pour filtre à deux voies". Il s'agit donc de R16, R17 et C13, ce qui permet d'utiliser l'orifice laissé libre pour la connexion reliant T6 à C16. Il faut remarquer cependant que sur le plan d'implantation des composants, on ne distingue qu'un seul strap reliant directement une extrémité de R16 à l'une de celles de C13. Cela fonctionne, bien entendu...

Système à deux voies, 12 dB/octave

La figure 1f nous indique que les pentes nécessaires portent les numéros 1 et 4. Supposons que la fréquence de croisement soit $f_1 = 1$ kHz.

Comme antérieurement, se reporter d'abord au tableau 2. Pour les pentes 1 et 4, C8 et R5 doivent être tous deux

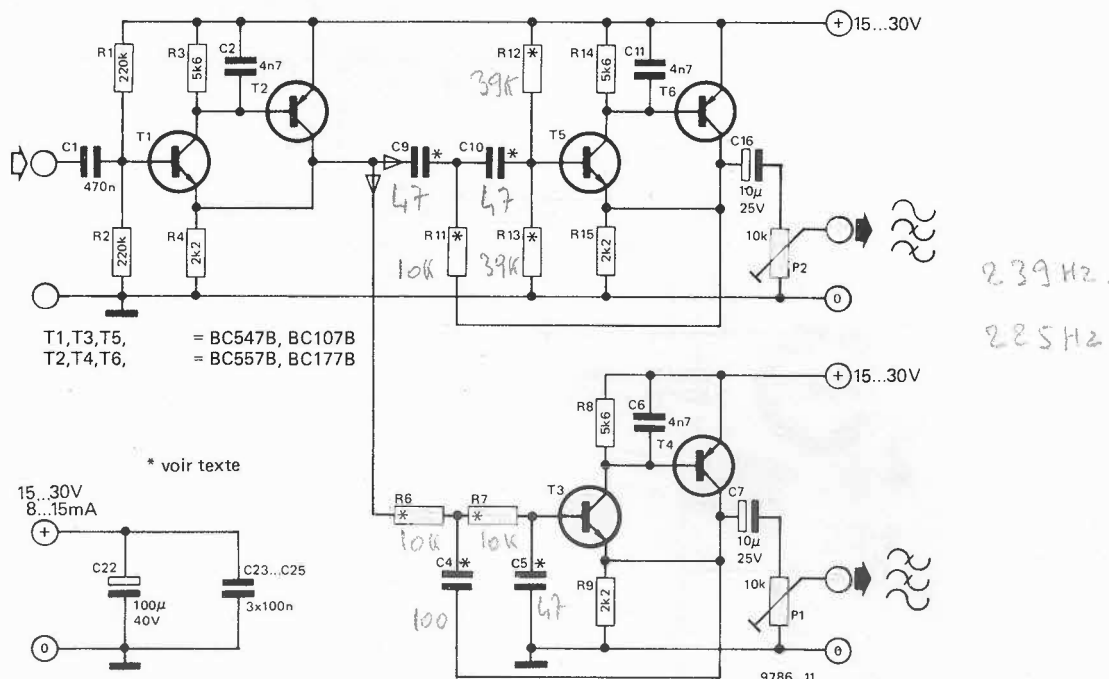
Figure 9. Circuit deux voies avec croisement 18 dB/octave symétrique.

Figure 10. Implantation des composants modifiée pour le circuit de la figure 9.

Figure 11. Circuit deux voies avec croisement 12 dB/octave symétrique.

Figure 12. Implantation des composants modifiée pour le circuit de la figure 11.

11



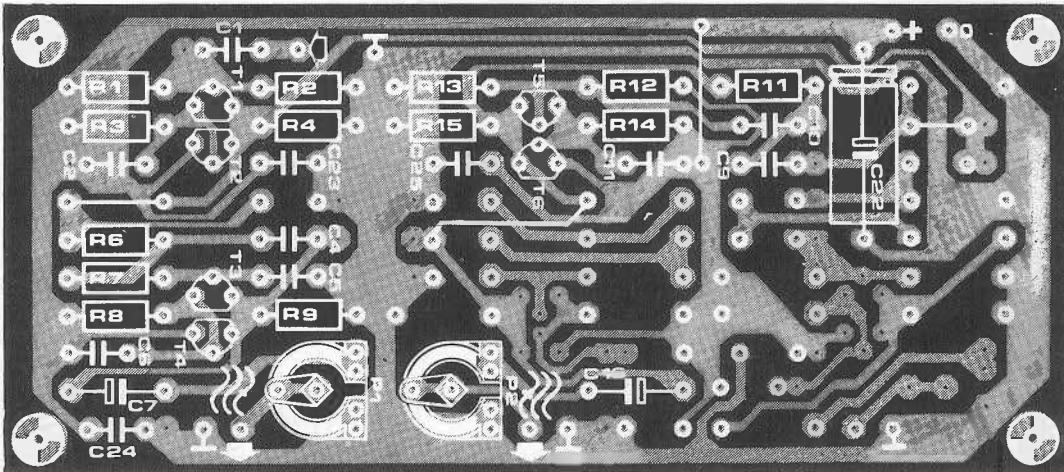
T1, T3, T5, = BC547B, BC107B
T2, T4, T6, = BC557B, BC177B

* voir texte

15.30V
8...15mA

9786-11

12



remplacés par des straps; R10 et C3 sont éliminés; les valeurs de C9, C10 et R11, R12, R13 seront trouvées dans le tableau 6; celles de R6, R7, C4 et C5 le seront dans le tableau 5.

Voyons d'abord le tableau 6. Pour $f_1 = 938 \text{ Hz}$, les valeurs des composants sont: $C_9 = C_{10} = 12 \text{ n}$; $R_{11} = 10 \text{ k}$; $R_{12} = R_{13} = 39 \text{ k}$.

Puis, le tableau 5. Dans celui-ci, la plus proche fréquence est $f_1 = 1020 \text{ Hz}$. Les valeurs de composants sont: $R_6 = R_7 = 22 \text{ k}$; $C_4 = 10 \text{ n}$; $C_5 = 4 \text{ n7}$.

Enfin, il y a lieu de voir la liste des composants. Dans ce cas, les notes de bas de pages 1, 2, 4 et 6 doivent toutes être appliquées. Autrement dit les composants portant les exposants ¹ ou ⁴ doivent être éliminés, les composants portant les exposants ² ou ⁶ remplacés par des straps.

En résumé, la liste complète des composants correspondant à cet exemple

devrait être:

Résistances:

- R1, R2 = 220 k
- R3, R8, R14 = 5k6
- R4, R9, R15 = 2k2
- R5 = strap
- R6, R7 = 22 k
- R11 = 10 k
- R12, R13 = 39 k
- R16, R17 = strap
- P1, P2 = 10 k ajustable

Condensateurs:

- C1 = 470 n
- C2, C6, C11 = 4n7
- C4 = 10 n
- C5 = 4n7
- C7, C16 = 10 µ/25 V
- C8 = strap
- C9, C10 = 12 n
- C13 = strap
- C22 = 100 µ/40 V
- C23, C24, C25 = 100 n

Semiconducteurs

- T1, T3, T5 = BC 107B ou équivalent
- T2, T4, T6 = BC 177B ou équivalent

Système à deux voies, 6 dB/octave

Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de préciser que les pentes de 6 dB/octave ne sont vraiment utiles que dans un nombre très limité d'applications. Elles doivent être employées avec une grande prudence, on pourrait sinon détruire le haut-parleur d'aigus.

Néanmoins, afin de donner une série d'exemples qui soit complète, voyons le cas d'un système à deux voies, 6 dB/octave (pentés 9 et 10 non représentées en figure 1f) dont la fréquence de croisement $f_1 = 4 \text{ kHz}$.

Le tableau 2 indique de monter un strap à la place de R5, R6, C8 et C9; C3, C4, R10 et R11 sont éliminés. Les valeurs

