modulateur en anneau

et suiveur d'enveloppe

Un modulateur en anneau est un circuit utilisé à l'origine à la modulation et à la détection de signaux de transmission dans les systèmes de télécommunications. Cependant, à une époque plus récente, le modulateur en anneau a trouvé une application intéressante dans le domaine de la musique électronique et, en fait, il compte désormais au nombre des équipements normaux de nombreux synthétiseurs.

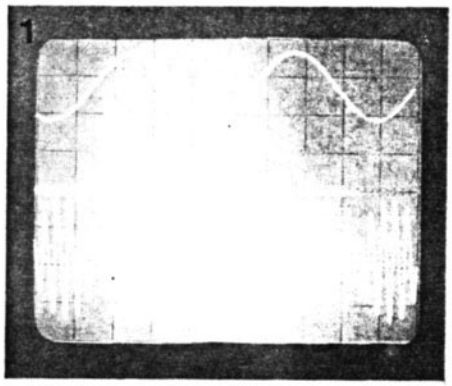
Le modulateur en anneau est essentiellement un multiplicateur à quatre quadrants (1 quadrant = 90°), ce qui veut dire que c'est un circuit qui multiplie deux tensions d'entrée, qu'elles soient positives ou négatives, et fait en sorte que la polarité de la tension résultante soit correcte. Par conséquent, une tension positive multipliée par une tension négative produit une tension négative; la multiplication d'une tension négative par une autre tension négative engendre une tension positive, et ainsi de suite.

La question est de savoir en quoi ce circuit de ce genre peut intéresser l'amateur passionné de musique électronique? La réponse à cette interrogation résulte de l'examen de l'expression mathématique du produit de deux ondes sinusoïdales sous la forme que voici:

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta =$$

$$\tfrac{1}{2}\cos (\alpha - \beta) - \tfrac{1}{2}\cos (\alpha + \beta).$$

Etant donné qu'un cosinus est tout simplement une sinusoïde ayant subi un déphasage de 90°, on peut considérer que la multiplication de deux ondes sinusoïdales a pour résultat de nouvelles sinusoïdes dont les fréquences sont respectivement la somme et la différence des deux signaux initiaux. Il est bon de noter que ceci n'est vrai que pour les signaux sinusoïdaux et ne saurait s'appliquer à d'autres formes d'onde. Mais, la combinaison de sinusoïdes produira le même résultat. Et par exemple, si une combinaison de deux ondes sinusoïdales est multipliée par une troisième onde sinusoïdale, chacune des composantes sinusoïdales du signal original dégagera ses "propres" somme et différence comme résultats de la multiplication. Ce processus de multiplication de deux signaux d'entrée sinusoïdaux est illustré par la photo de la figure 1. La sinusoïde dont le tracé est visible à la partie supérieure est multipliée par une seconde sinusoïde à fréquence supérieure, la forme d'onde résultante est celle du tracé situé à la partie inférieure.



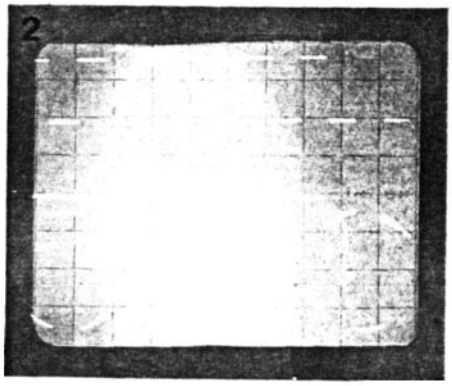


Figure 1. Le signal présenté à la partie inférieure de la photo est le résultat de la multiplication de l'onde sinusoïdale du tracé supérieur avec une seconde onde sinusoïdale de fréquence beaucoup plus élevée, effectuée par le modulateur en anneau.

Figure 2. Cette photo illustre le résultat de la multiplication d'une onde rectangulaire (tracé supérieur) et d'une onde sinusoïdale, se traduisant par le tracé à la partie inférieure.

"Klangs"

La propriété la plus caractéristique du modulateur en anneau réside dans sa capacité à exploiter la relation harmonique existant entre différentes notes. Un autre exemple servira à mieux expliquer cet aspect. Il est donc supposé que deux signaux sinusoïdaux, dont les fréquences sont respectivement de 2,5 et 4,5 kHz, soient appliqués à l'une des entrées d'un modulateur en anneau. Ces fréquences sont dans le rapport de 5 à 9, ce qui veut dire, en termes musicaux, que la note résultante est à peu près équivalente à une septième basse (les fréquences réelles correspondent plutôt à des aiguës, mais elles ont été choisies surtout pour l'illustration de l'exemple). Si une troisième onde sinusoïdale, dont la fréquence est de 500 Hz, est alors appliquée à l'autre entrée du modulateur en anneau, qu'en résultera-t-il à la sortie? Le signal de fréquence 2,5 kHz multiplié par le signal de 500 Hz engendre deux nouveaux signaux dont les fréquences respectives sont 2 et 3 kHz. De manière analogue, la multiplication des signaux de fréquences 4,5 kHz

500 Hz produira deux nouveaux signaux de 4 et 5 kHz. Par conséquent, quatre signaux dont les fréquences seront 2, 3, 4 et 5 kHz seront désormais disponibles à la sortie du modulateur, et ils constitueront un accord majeur. La relation musicale de la septième basse aura donc été transformée en une autre correspondant à un accord majeur.
Cependant, l'exemple qui vient d'être exposé n'est pas caractéristique, car il constitue davantage une exception qu'une règle qui voudrait que l'application de fréquences réparties selon une relation musicale à l'entrée d'un modulateur en anneau résulterait en l'obtention à la sortie d'un accord cohérent d'un point de vue musical. Pour la plus grande partie des cas, la relation harmonique des signaux sommes et différences disponibles à la sortie du modulateur ne sera pas adéquate et le son obtenu sera dissonant, non musical.
Ceci est particulièrement vrai lorsque d'autres formes d'onde que la sinusoïde sont utilisées en tant que signaux d'entrée. Le photo 2 est une illustration de ce qui se produit lorsqu'une sinusoïde est multipliée par un signal rectangulaire d'entrée. Chacun sait que les formes d'onde périodiques non-sinusoïdales peuvent être considérés comme étant constituées d'une onde fondamentale sinusoïdale ayant la fréquence d'un signal particulier à laquelle s'ajoute un certain nombre d'harmoniques de la fondamentale, celles-ci étant des ondes sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale. En conséquence, par exemple, une onde en dents de scie, dont la fréquence est de 1 kHz, est formée de sinusoïdes dont les fréquences sont de 1, 2, 3 kHz . . . etc. Le caractère de la note résultante est fonction de l'intensité relative des harmoniques la composant.

Quand une onde en dents de scie est appliquée à l'une des entrées d'un modulateur en anneau et qu'une onde sinusoïdale pure, d'une fréquence de 300 Hz par exemple, est appliquée à l'autre entrée, chaque harmonique de la dent de scie est multipliée par la sinusoïde et une série de signaux dont les fréquences sont 0,7; 1,3; 1,7; 2,3; 2,7; 3,3 kHz . . . etc vont être disponibles à la sortie. On constate donc que la dent de scie originale de 1 kHz et la sinusoïde de 300 Hz ont été converties par le modulateur en anneau en une note complexe composée d'harmoniques n'ayant pas de relation musicale. Et si, la sinusoïde de 300 Hz est alors remplacée par un second signal en dents de scie, le signal de sortie obtenu a une structure harmonique encore plus "dense" et plus complexe. Rien qu'à l'extrémité inférieure du spectre, il contiendra les fréquences suivantes: 100, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600 et 1700 Hz. Chacun de ces sons a une amplitude caractéristique, des fréquences particulières tendant à dominer alors que d'autres sont relativement atténuées. En raison de sa structure harmonique extrêmement complexe, le timbre du signal résultant ressemble à celui d'une grosse cloche ou d'un gong, ou encore au son d'une pièce métallique frappant une autre pièce métallique (le marteau sur l'enclume, par exemple). Ce type d'effet de percussion porte le nom de *"klang"* et les compositeurs de musique électronique l'utilisent fréquemment.
Les capacités du modulateur en anneau sont exploitées au maximum lorsque les deux signaux d'entrée subissent une variation de fréquence (modulés par un signal basse fréquence, par exemple). Il en résulte des sons qui témoignent de formidables évolutions à la fois de la hauteur de son (pour autant que l'on puisse encore parler de "hauteur de son" s'agissant de telles tonalités) et du timbre, tandis qu'ils parcourent toute la gamme des possibilités tonales allant de la pure harmonie à la dissonance la plus stridente.
L'association de sons "normaux" et d'un signal de bruit permet également de réaliser des effets extrêmement intéressants en utilisant le modulateur en anneau en combinaison avec divers types de filtres, ainsi qu'en employant conjointement plusieurs modulateurs en anneau. Stockhausen, le compositeur moderne bien connu, a déjà écrit une oeuvre pour orgue Hammond et quatre modulateurs en anneau!

3

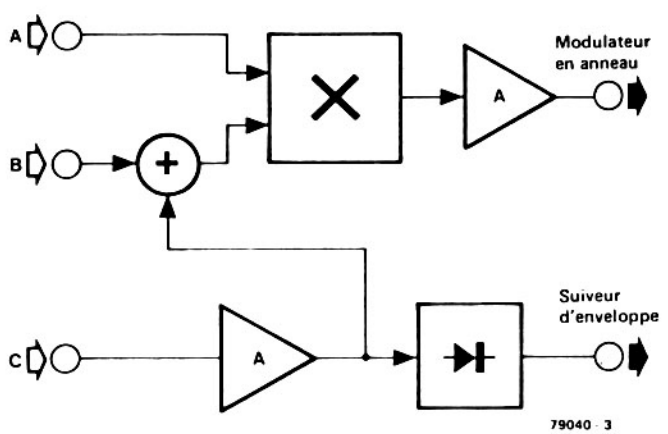


Figure 3. Schéma synoptique du modulateur en anneau d'Elektor.

Doubleur de fréquence

Le modulateur en anneau est susceptible d'être utilisé dans des applications musicales plus "conventionnelles" en tant que doubleur de fréquence ou décaleur d'octave (doubler la fréquence équivaut naturellement à décaler la hauteur de son du signal pour l'amener à l'octave immédiatement supérieure). Pour obtenir ce résultat, il suffit simplement d'appliquer le même signal aux deux entrées du modulateur. Il est clair que, dans ce cas la fréquence différentielle des deux signaux d'entrée sera de 0 Hz, ce qui veut dire qu'il n'y aura pas de signal différentiel disponible à la sortie, alors que le signal somme aura doublé la fréquence du signal d'entrée initial. Lorsque le modulateur est utilisé en doubleur de fréquence de signaux non-sinusoïdaux ou polyphoniques, l'apparition d'une intermodulation très importante entre les harmoniques les composant engendre une série d'effets sonores très intéressants. Une autre possibilité consiste à soumettre les deux signaux d'entrée à l'action d'un générateur de phasing ou d'une chambre d'écho.
Enfin, le modulateur en anneau peut être employé de manière un peu moins traditionnelle en tant qu'amplificateur commandé en tension. La tension de commande est appliquée à l'une des entrées tandis que le signal devant être modulé est injecté à l'autre.

Le modulateur en anneau, instrument de musique

Les remarques qui précèdent ne font que souligner brièvement quelques-unes des applications "musicales" du modulateur en anneau. Il est évident néanmoins qu'il constitue un instrument parfaitement indiqué pour ceux que passionne le vaste champ de la musique expérimentale et les chercheurs d'effets sonores totalement nouveaux. Mais, c'est un instrument "difficile", exigeant de la part de celui qui l'utilise un haut degré d'habileté et de connaissances s'il désire en exploiter au maximum les capacités. Cependant, le modulateur en anneau est un équipement de base de la plupart des synthétiseurs de taille

moyenne, ainsi qu'un accessoire banal dans la panoplie des guitaristes, des "joueurs de clavier" et autres instrumentistes.

Un modulateur en anneau qui n'en est pas un

Après ce préambule un peu long, mais nécessaire, les aspects techniques du circuit vont être abordés. Il convient malgré tout de commencer par mettre un terme à un léger malentendu subsistant malencontreusement au sujet du véritable nom du circuit en question. En fait, l'expression "modulateur en anneau" s'applique à un type de circuit déterminé dont le fonctionnement est celui d'un multiplicateur à quatre quadrants (pour autant qu'il s'agisse de tensions alternatives), et qui, au début de l'ère de la musique électronique, fut employé pour produire cet effet particulier. Entretemps, cependant, des circuits nouveaux et mieux adaptés ont été mis au point pour satisfaire le même objectif et ceux-ci sont utilisés presque exclusivement, dès lors qu'il s'agit d'applications musicales. Mais, la désignation de modulateur en anneau a subsisté, car la plupart des musiciens n'accordent d'intérêt qu'à ce qui sort de la "boîte noire" et non à ce qu'elle contient.

Ce type de multiplicateur, utilisé dans la plupart des circuits de modulation en anneau modernes, s'accommoderait mieux du nom de "modulateur symétrique double" et désignerait donc un circuit assez délicat composé d'une association de sources de courants commandées en tension. Dans cet ordre d'idées, il est heureux que le modulateur symétrique double soit désormais disponible sous la forme d'un circuit intégré qui ne nécessite plus que l'adjonction de quelques composants accessoires pour réaliser un "modulateur en anneau" convenant aux applications musicales.

Circuit

La figure 3 présente le schéma synoptique du modulateur en anneau d'Elektor. On constatera que celui-ci (désigné par le signe X) comporte trois entrées. Les deux entrées A et B reçoivent des niveaux de signaux allant jusqu'à environ 1,5 V de crête à crête, ce qui les rend exploitables dans le FORMANT d'Elektor ainsi que dans d'autres synthétiseurs.

L'entrée C est équipée d'un préamplificateur dont le niveau d'entrée maximum est de 10 mV et qui est donc d'une sensibilité suffisante pour la plupart des phonocapteurs de guitares et des microphones.

Le fait que les entrées B et C puissent être utilisées simultanément tandis qu'elles sont mixées préalablement à leur entrée dans le circuit intégré du modulateur, constitue une autre caractéristique de ce montage.

Un dispositif complémentaire (bien que n'étant pas un élément fonctionnel du modulateur en anneau), utilise deux ampli-ops, A2 et A4, pour former un détecteur de crête amplificateur réalisant un circuit suiveur d'enveloppe dont l'amplitude de sortie va jusqu'à 10 V de crête à crête. La forme d'onde de sortie, relative à l'enveloppe du signal d'entrée à niveau bas (entrée C) peut être employée en association avec un synthétiseur.

La figure 4 représente le schéma du circuit du modulateur en anneau, dont le coeur est IC1, modulateur symétrique double effectuant la multiplication des signaux d'entrée. C'est un circuit intégré LM 1496N de National (ou encore un MC 1496P de Motorola). Il est nécessaire de lui adjoindre quelques résistances externes pour que son fonctionnement soit satisfaisant. L'amplitude des deux signaux de sortie doit être limitée, car existe le danger que les signaux d'entrée ne soient pas suffisamment supprimés et qu'ils apparaissent à la sortie. C'est la raison pour laquelle les signaux d'entrée sont maintenus à un niveau acceptable (environ 150 mVcc au maximum) à l'aide des réseaux diviseurs R1/R3 et R8/R11, ce qui a pour effet de garantir que les signaux d'entrée seront abaissés d'environ 50 dB à la sortie. Leur suppression peut être optimalisée en ajustant les potentiomètres P2 et P3. R6 et R7 ajustent les tensions d'offset continues présentes aux bornes 8 et 10 du circuit intégré tandis que les autres résistances qui lui sont associées garan

4

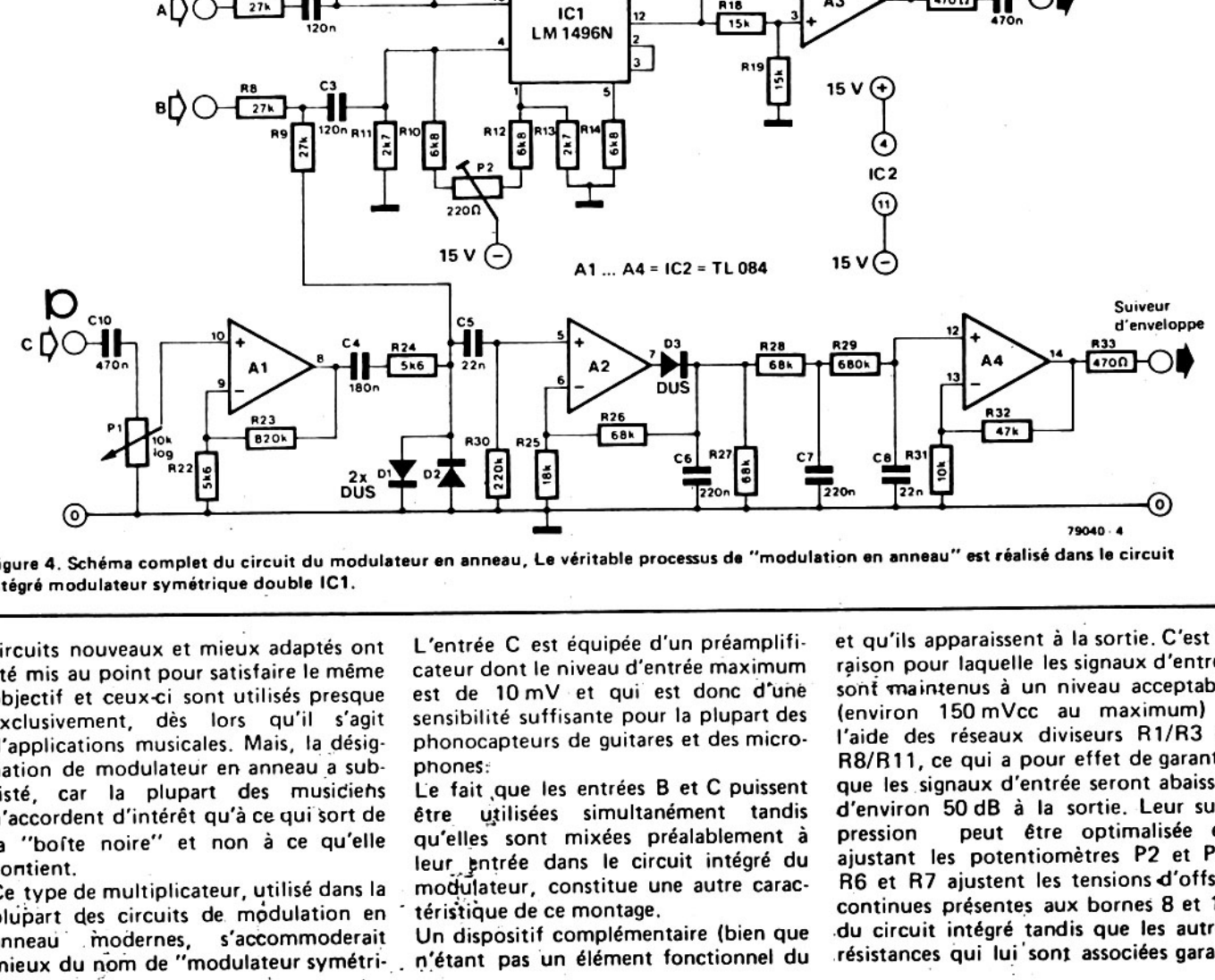
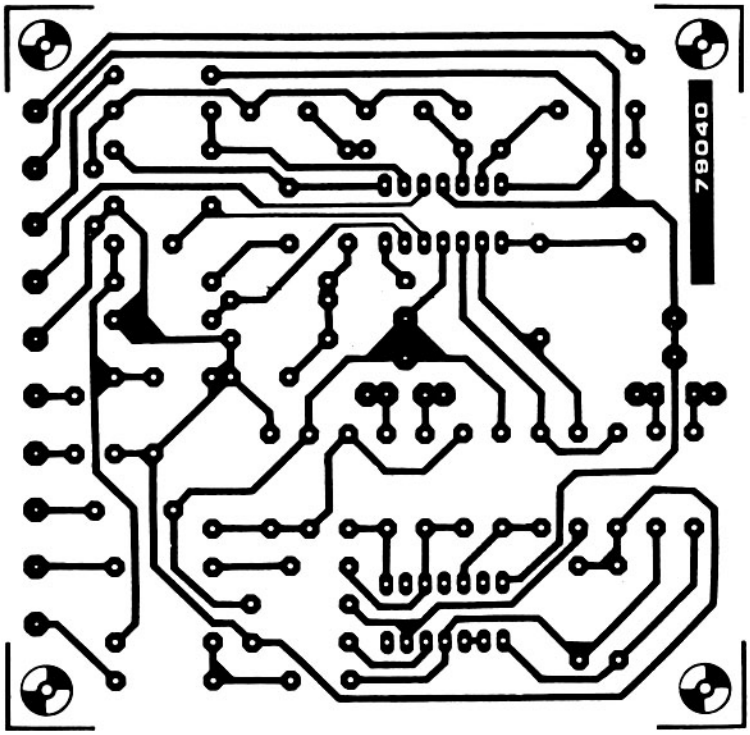


Figure 4. Schéma complet du circuit du modulateur en anneau, Le véritable processus de "modulation en anneau" est réalisé dans le circuit intégré modulateur symétrique double IC1.

5



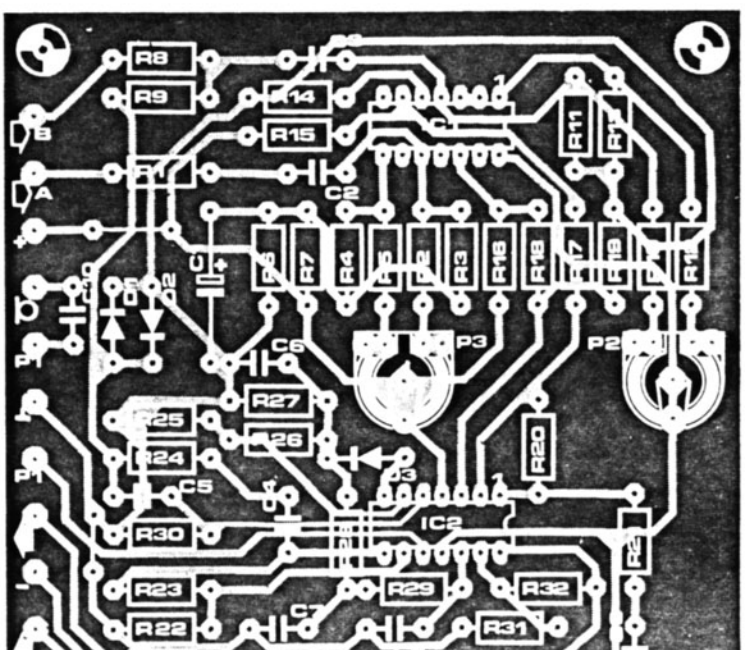


Figure 5. Circuit imprimé correspondant au schéma de la figure 4 (EPS 79040).

tissent la polarisation correcte des courants continus. La tension de sortie est ajustée à 1,5 Vcc qui est le niveau standard du synthétiseur FORMANT. L'ampli-op A3 fonctionne simplement en étage tampon de sortie.

L'entrée C, utilisant l'ampli-op A1 en préamplificateur, a été conçue en fonction des phonocapteurs de guitares, des microphones etc. Le niveau d'entrée de cet étage est réglable à l'aide de P1, tandis que sa sortie est appliquée au modulateur en anneau, par l'intermédiaire de R9, ainsi qu'au suiveur d'enveloppe via C5. Les diodes D1 et D2 sont montées pour bloquer en ce point les tensions excessivement élevées. Les deux autres ampli-ops, A2 et A4, font partie du suiveur d'enveloppe, le détecteur de crête étant formé par l'ensemble D3, C6 et A2. Le signal redressé est alors injecté au travers d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est de 10 Hz. Enfin, l'ampli-op A4 permet que la tension de sortie du suiveur d'enveloppe puisse évoluer entre 0 et 10 V environ.

Réalisation et montage

Le circuit peut être installé sur le circuit imprimé présenté en figure 5. Outre le MC 1496P, il existe un autre IC équivalent du LM 1496N, le S 5596 de Signetics. Malheureusement son brochage est différent et il ne peut donc être utilisé sur la platine de la figure 5. Les tensions d'alimentation du circuit sont de +15 V et −15 V. De l'ordre de quelques dizaines de milliampères, la consommation de courant est extrêmement faible.

La mise au point du circuit est tout à fait simple: un signal est appliqué à l'entrée A et le potentiomètre P3 est ajusté pour qu'il soit aussi peu audible que possible à la sortie. Le même processus est appliqué au signal injecté à l'entrée B, et ce, grâce au potentiomètre P2. Finalement, toute la procédure est reprise, et le circuit se trouve prêt à l'utilisation. L'amateur de musique expérimentale peut s'embarquer pour ce qu'on lui souhaite être une fructueuse "odyssée" à la découverte de nouveaux horizons musicaux . . .

Liste des composants

Résistances:
R1,R8,R9 = 27 k
R2,R5 = 12 k
R3,R4,R11,R13 = 2k7
R6,R7 = 1k5
R10,R12,R14 = 6k8
R15,R16 = 1k2
R17 . . . R20 = 15 k
R21,R33 = 470 Ω
R22,R24 = 5k6
R23 = 820 k
R25 = 18 k
R26,R27,R28 = 68 k
R29 = 680 k
R30 = 220 k
R31 = 10 k
R32 = 47 k
P1 = potentiomètre 10 k log
P2 = potentiomètre ajustable, 220 Ω (250 Ω)
P3 = potentiomètre ajustable, 500 Ω

Condensateurs:
C1 = 100 µ/16 V
C2,C3 = 120 n
C4 = 180 n
C5 = 22 n
C6,C7 = 220 n
C8 = 22 n
C9,C10 = 470 n

Semi-conducteurs:
IC1 = LM 1496N (National) ou MC 1496P (Motorola)
IC2 = TL 084
D1 . . . D3 = DUS