

## modulateur en anneau

Un modulateur en anneau est un circuit utilisé à l'origine pour la modulation et 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 un 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:

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

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

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 deux 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 de fréquence supérieure, la forme d'onde résultante est celle du tracé situé à la partie inférieure.

### Une autre harmonie

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, sont appliqués à l'une des entrées d'un modulateur en anneau. Ces fréquences sont dans un 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

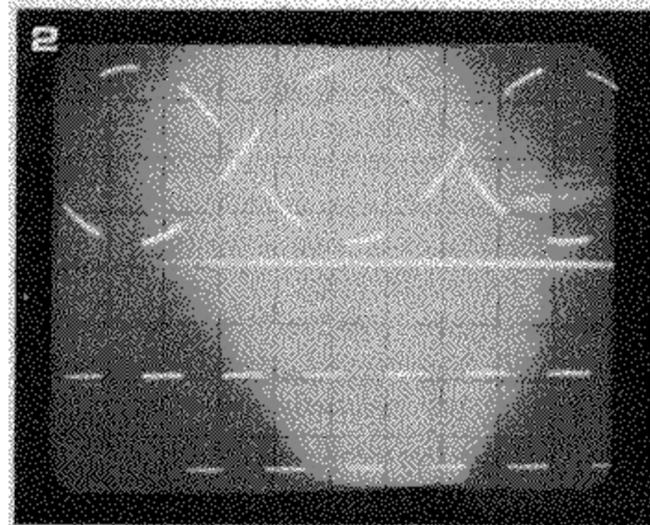
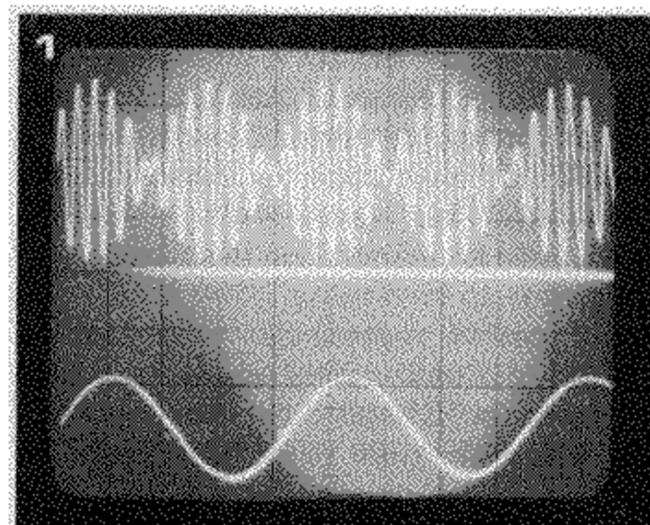
la fréquence est de 500 Hz, est alors appliquée à l'autre entrée du modulateur en anneau, qu'en résultera-t-il à la sortie? Le signal de fréquence 2,5 kHz multiplié par le signal de 500 Hz engendre deux nouveaux signaux dont les fréquences respectives sont 2 et 3 kHz. De manière analogue, la multiplication des signaux de fréquences 4,5 kHz et 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 somme et différence disponibles à la sortie du modulateur produira un son dont le spectre harmonique "biscornu" fera les délices du musicien assoiffé d'exotisme sonore. Ceci est particulièrement vrai lorsque d'autres formes d'onde que la sinusoïde sont utilisées en tant que signaux d'entrée. La 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 considérées 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. 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

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) avec une onde sinusoïdale, se traduisant par le tracé à la partie inférieure.



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, une fréquence particulière 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, un des pères de la musique électronique, a largement contribué à la systématisation de l'emploi du modulateur en anneau dès la fin des années 1950.

### 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 avec les signaux non sinusoïdaux ou polyphoniques, l'apparition d'une intermodulation très importante entre les harmoniques et les composants 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 outil 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 claviers" 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. Entre-temps, 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 sub-

sisté, 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

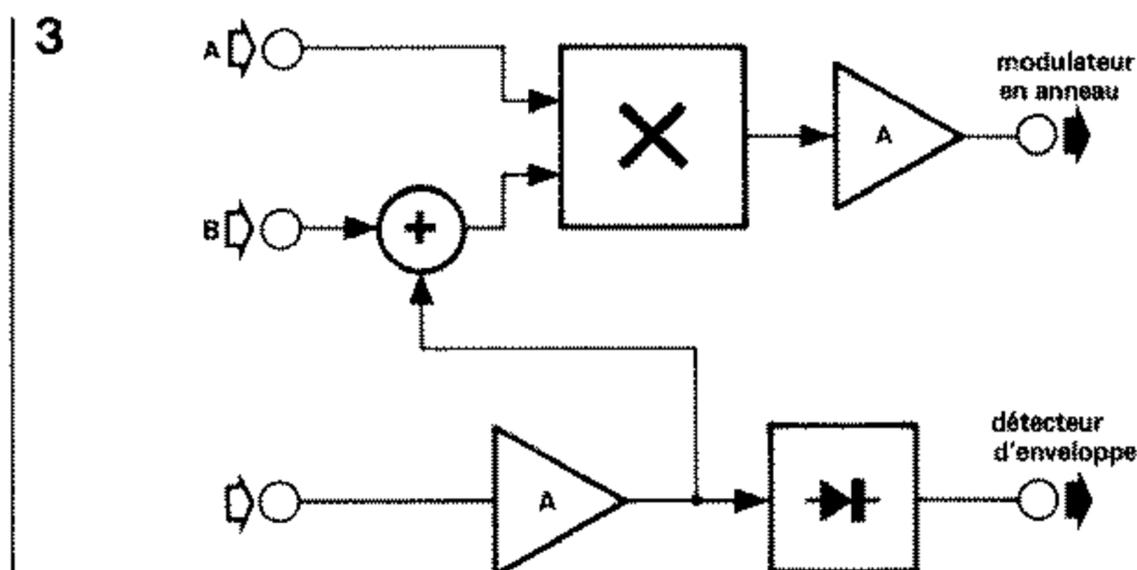
La figure 3 présente le schéma synoptique du modulateur en anneau d'Elektor. On constatera que celui-ci (désigné par le signe X) comporte trois entrées. Les deux entrées A et B reçoivent des niveaux de signaux allant jusqu'à environ 1,5 V crête à crête, ce qui les rend exploitables dans le FORMANT ainsi 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 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 cœur est IC1, modulateur symétrique double, effectuant la multiplication des



4

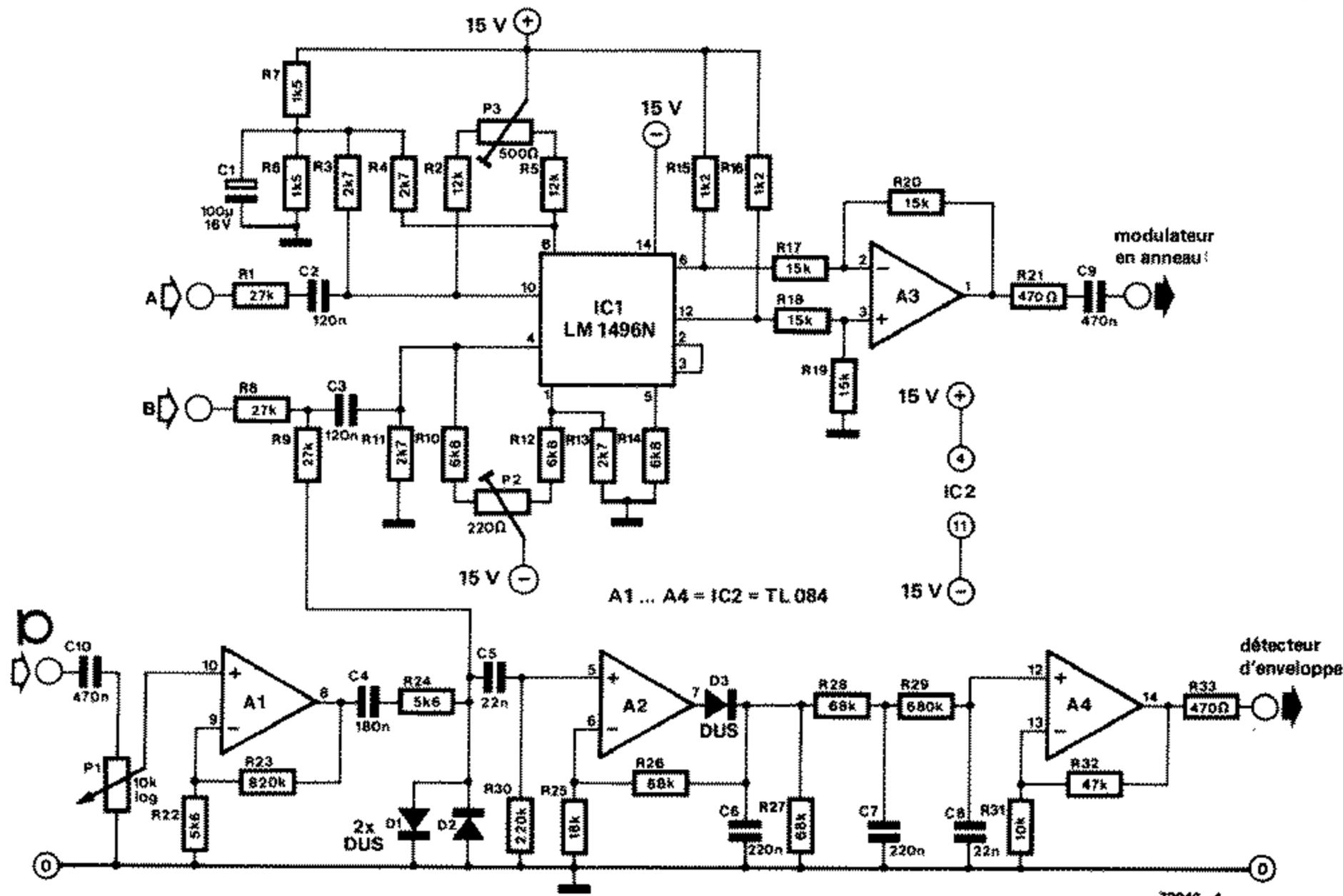


Figure 3. Schéma synoptique du modulateur en anneau d'Elaktor.

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.

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 alors les signaux d'entrée ne seraient pas suffisamment supprimés et apparaîtraient 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 un abaissement des signaux d'entrée à la sortie d'environ 50 dB. Leur suppression peut être optimisée 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 garantissent la polarisation correcte des courants continus. La tension de sortie est ajustée à 1,5 Vcc qui est le niveau standard du FORMANT. L'ampli-op A3 fonctionne simplement en étage tampon de sortie.

#### 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

##### Semiconducteurs:

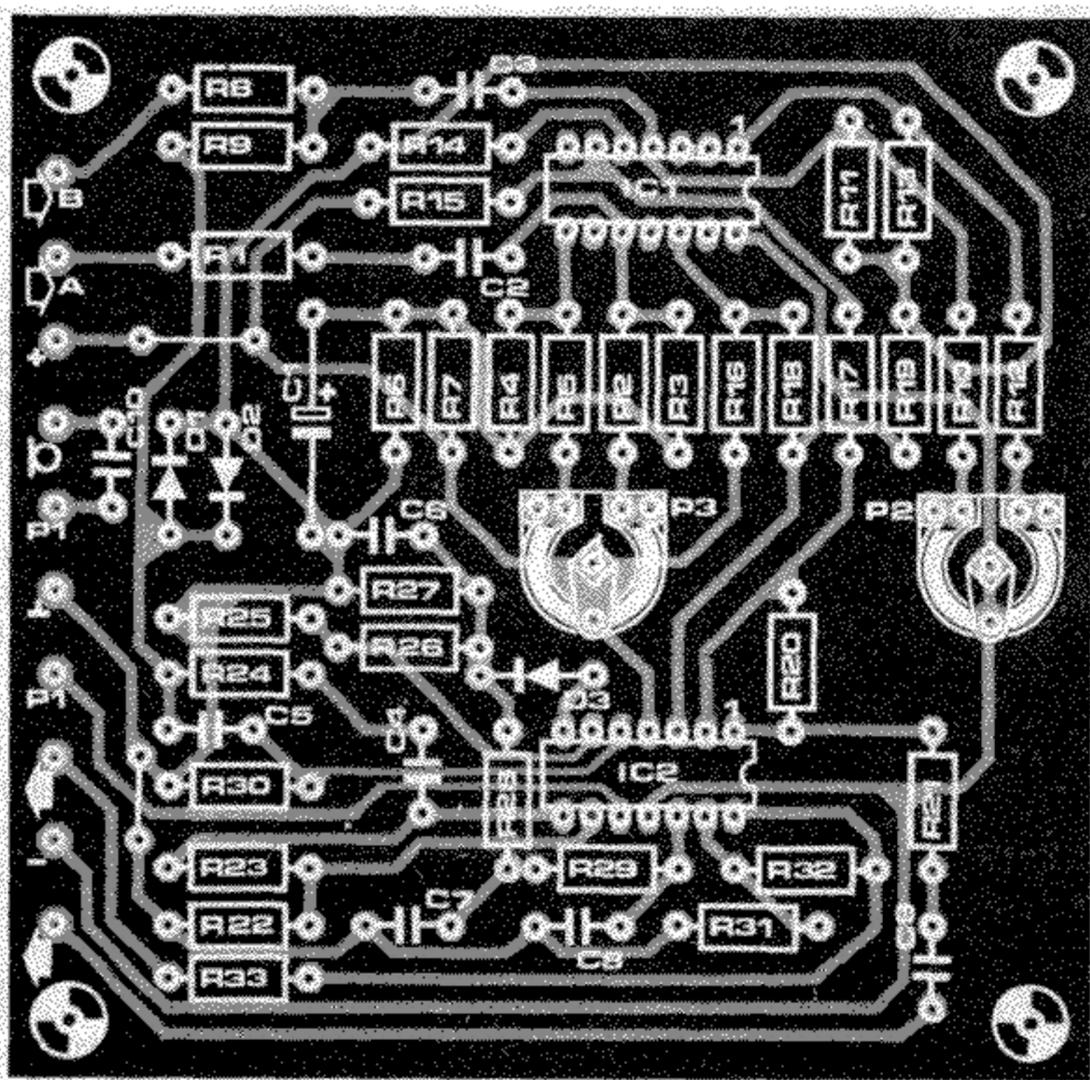
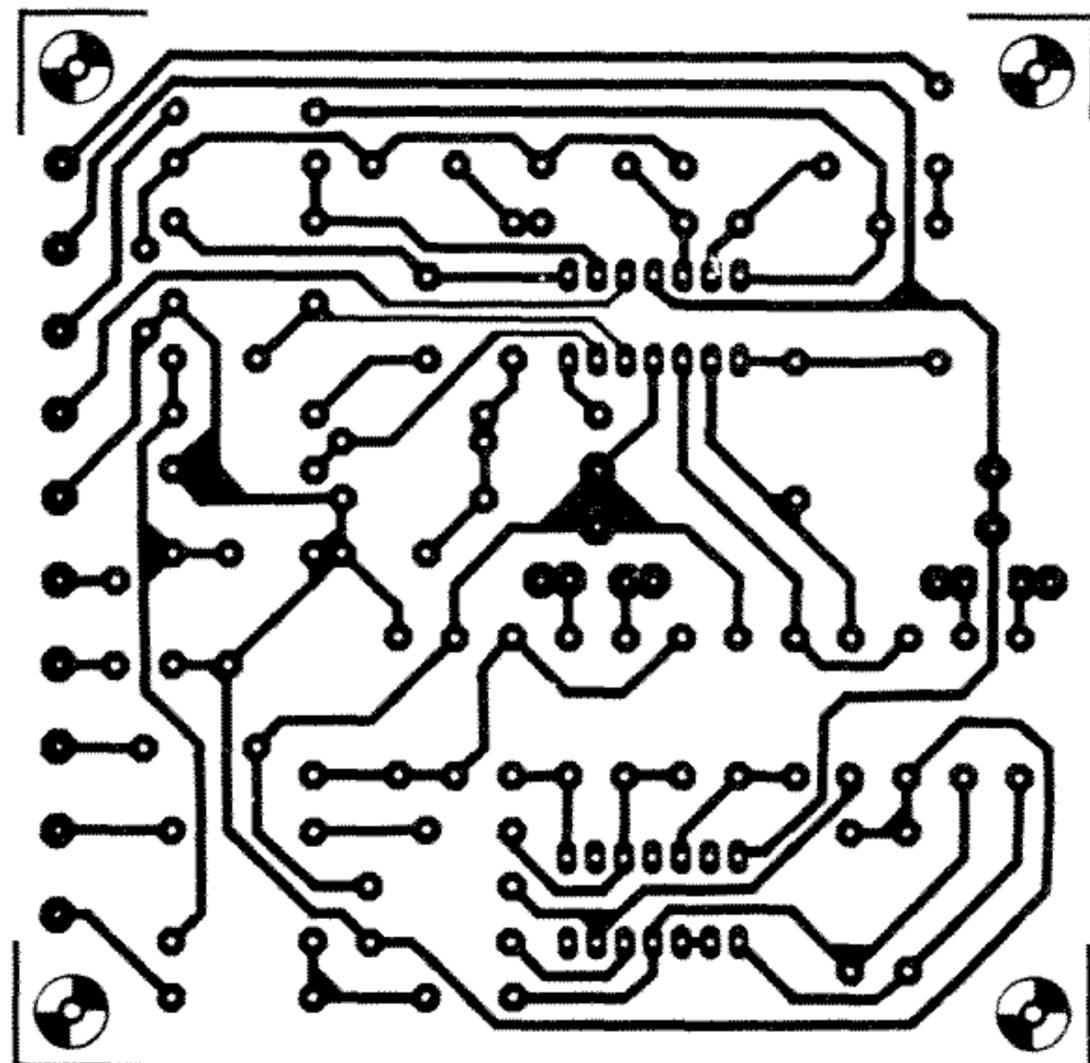
IC1 = LM 1496N (National)  
 ou MC 1496P (Motorola)  
 IC2 = TL 084  
 D1 ... D3 = DUS

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 à la tension de sortie du suiveur d'enveloppe d'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 milli-ampères, 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

5



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...

Si pour ce voyage interstellaire, c'est le FORMANT qui doit servir de navette, il va falloir couvrir ce modulateur d'oriepeaux dignes du reste de notre synthétiseur.

### Face avant

La proposition de dessin pour la face avant donnée par la figure 6 correspond aux proportions des petites faces avant du FORMANT. Le potentiomètre

Figure 5. Circuit imprimé correspondant au schéma de la figure 4.

Figure 6. Suggestion de face avant pour la mise en place du modulateur en anneau dans le FORMANT; le parcours des signaux est représenté par des flèches.

Figure 7. Le circuit imprimé de la figure 5 adapté au format européen pour une insertion plus facile dans le FORMANT.

Figure 8. Equerre de fixation de la face avant sur le circuit imprimé.

"LEVEL" correspond à P1 et sert à ajuster la sensibilité d'entrée. Pour l'entrée ES, il n'est peut-être pas inutile de prévoir un jack de 6,35 mm alors que pour les autres entrées et sorties, des jacks de 3,5 mm devraient convenir.

### Circuit imprimé

Le dessin du circuit imprimé original a été repris dans la perspective d'une insertion dans le FORMANT dont les circuits imprimés sont au standard européen et munis d'un connecteur mâle à 31 broches. Le schéma d'implantation est le même que celui de la figure 5. Les lignes d'alimentation pourront éventuellement être dotées de condensateurs de découplage.

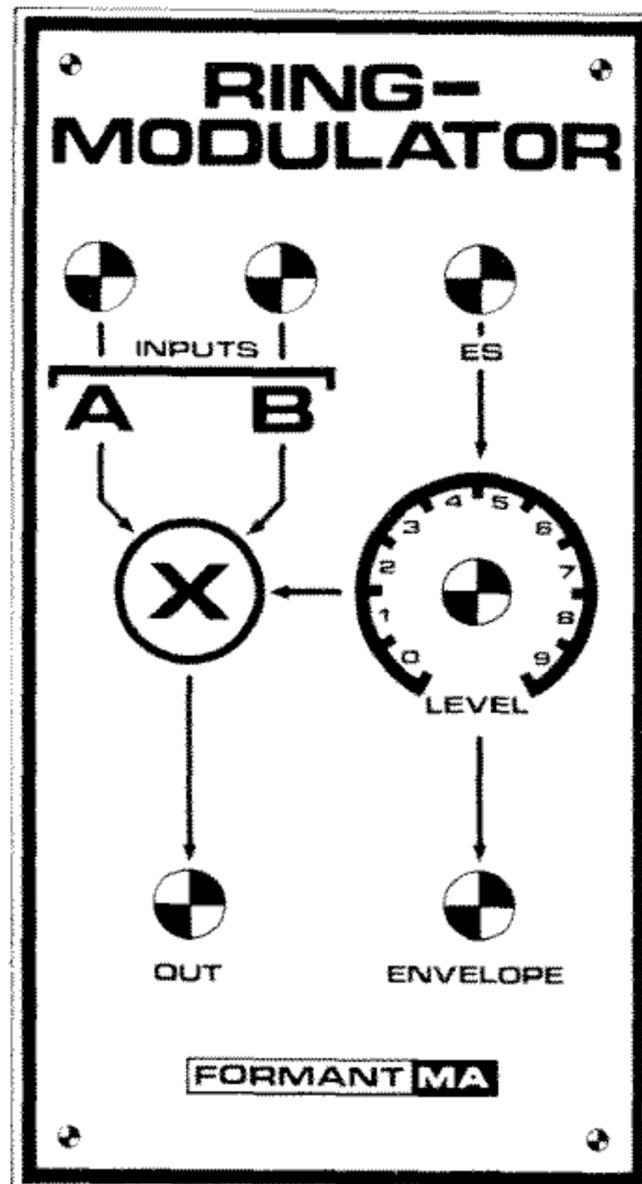
### Recommandations pour la mise en place

La réalisation du circuit imprimé, son câblage et l'ajustage ne posent pas la moindre difficulté. Le couplage du circuit imprimé et de la face avant n'en posent pas beaucoup plus, à condition de savoir comment s'y prendre. Il y a en gros deux solutions qui l'une et l'autre mettent en œuvre des équerres ou cornières du type de celle de la figure 8. La première consiste à coller l'équerre ou la cornière sur le verso de la face avant, alors que la deuxième consiste à coincer la cornière entre un ou plusieurs potentiomètres et la face avant.

### Applications

Le principe de ce montage est simple:

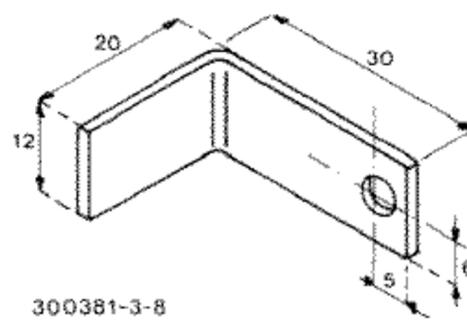
6



il n'y a de signal à la sortie que si les deux entrées A et B (ou éventuellement C) se voient chacune appliquer un signal. Le signal résultant sera composé de la somme et de la différence des fréquences des signaux d'entrée, alors que ces signaux eux-mêmes ne "passent" pas (voir tableau 1).

Si les deux signaux appliqués aux entrées sont de même fréquence, celle du signal de sortie sera le double de celle du signal d'entrée. Plus le signal d'entrée comporte d'harmoniques, plus le spectre du signal de sortie sera complexe. Si les signaux d'entrée sont à l'octave l'un de l'autre (rapport de fré-

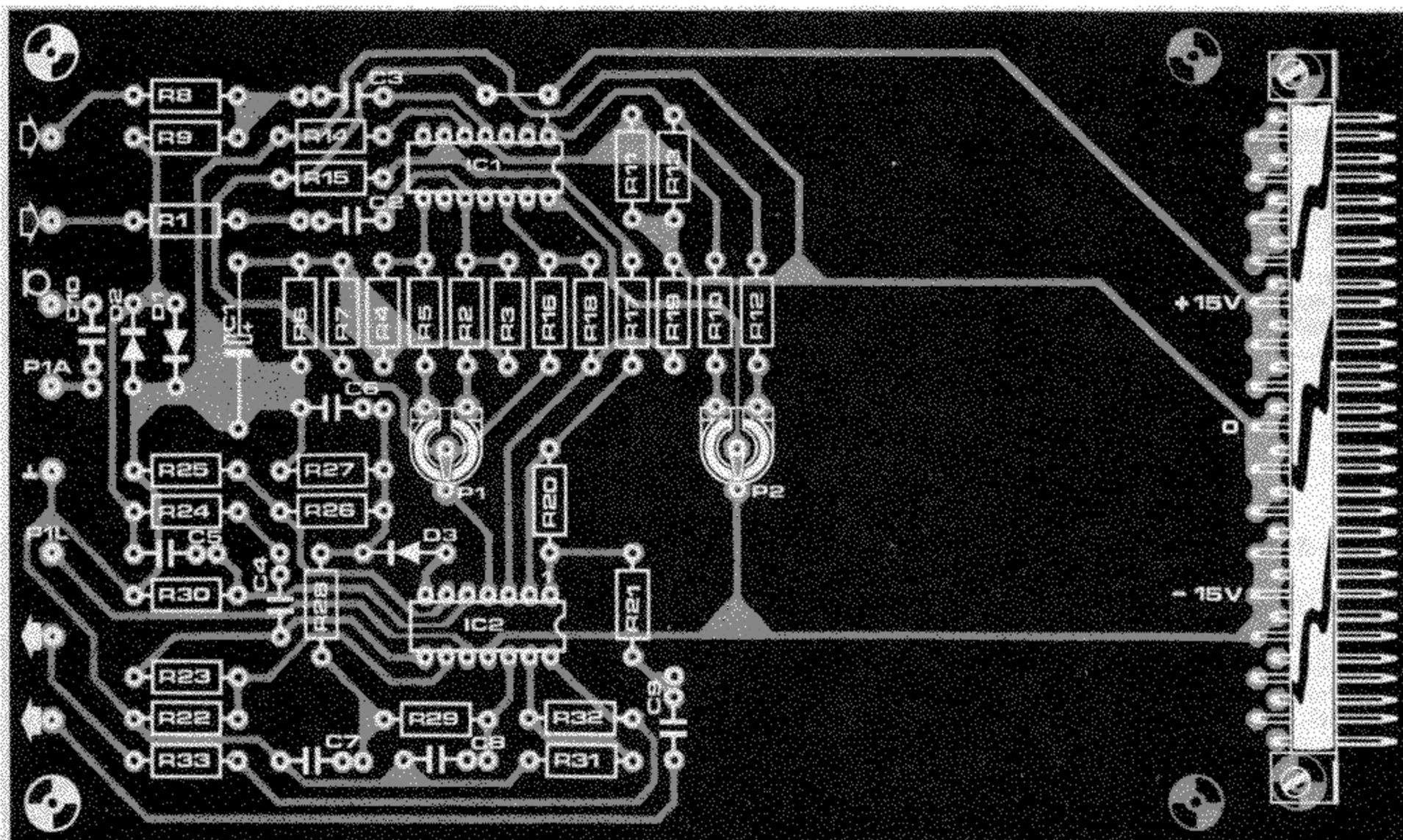
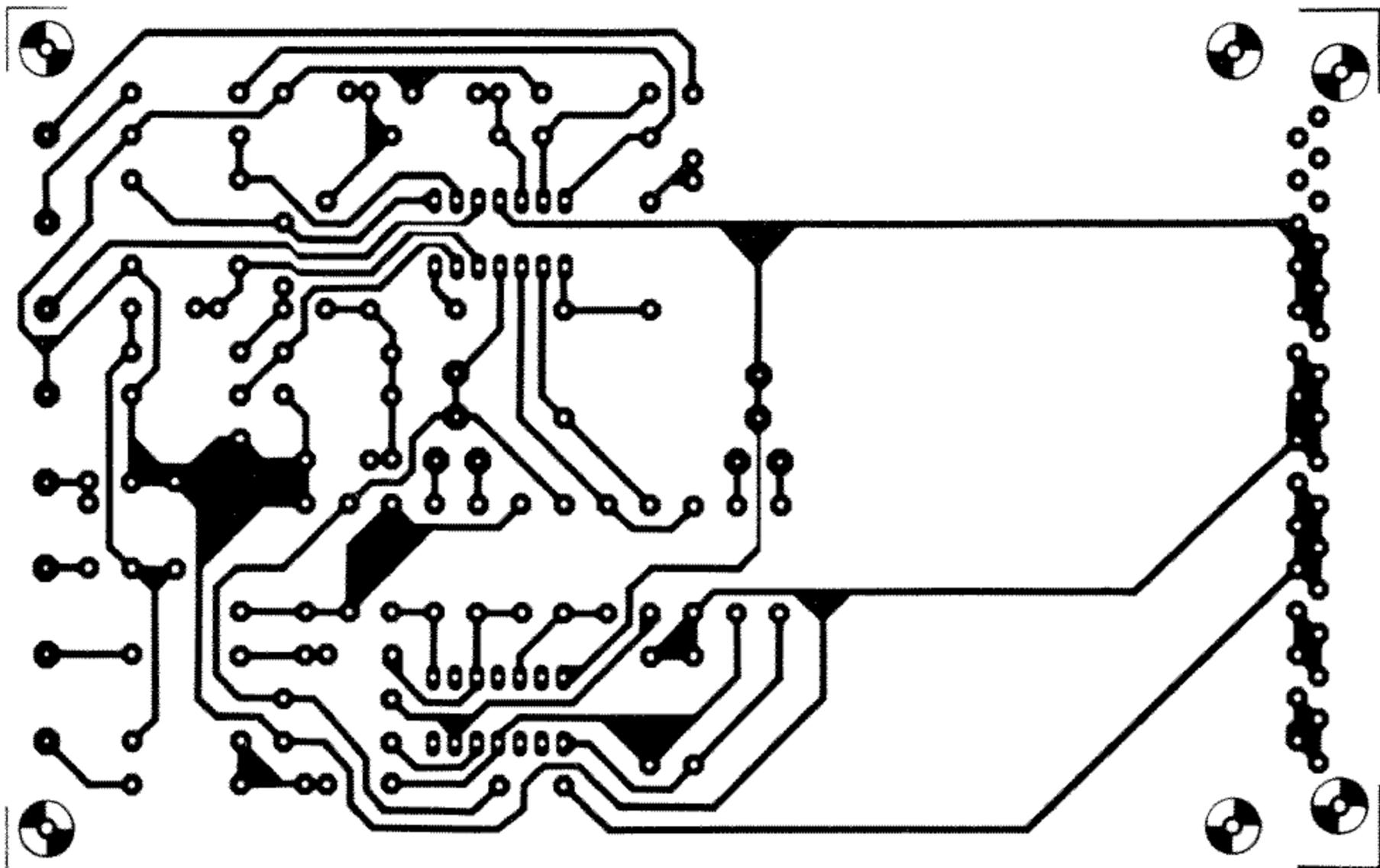
8



quences de 2 : 1), la fréquence du signal de sortie sera dans un rapport de 3 : 1 (intervalle de douzième; octave + quinte). Une manipulation particulièrement intéressante consiste à mélanger (à l'aide du mélangeur décrit au chapitre 5) le si-

gnal de sortie et l'un (ou les deux) des signaux d'entrée. Si les signaux présentent un rapport de fréquence tel que celui que nous venons de décrire, le spectre harmonique du signal résultant de ce mélange comportera les harmoniques 1, 2, 3 et 4 (figure 9). Les sons obtenus à l'aide de signaux carrés, modulés en anneau puis filtrés sont particulièrement propices à la réalisation de timbres instrumentaux du type cornemuse, cordes frottées ou accordéon (c'est moins fatigant que le piano à bretelles). Voir figure 10. Les transpositions mélodiques résultant de ce genre de manipulations sont sou-

7



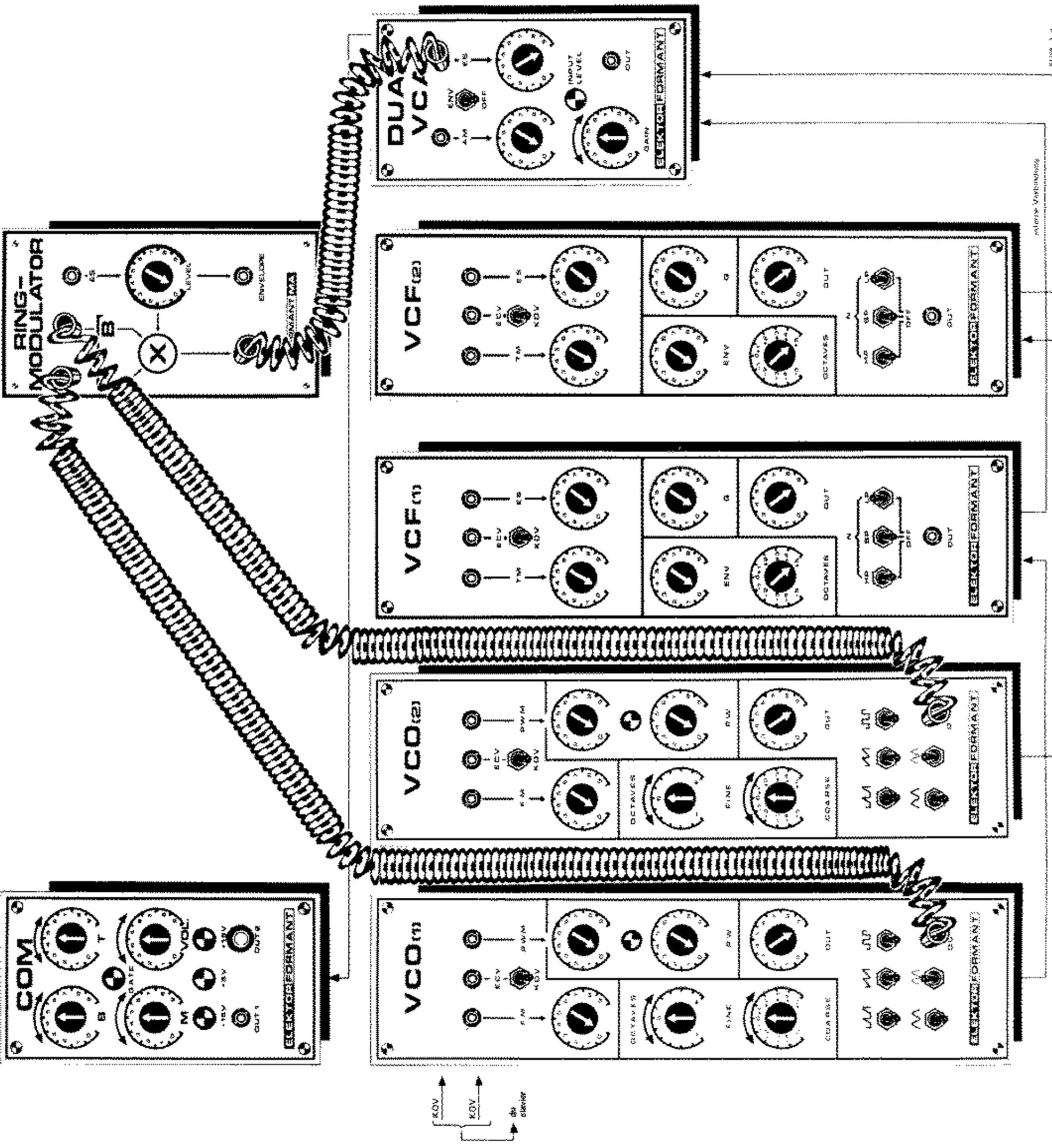
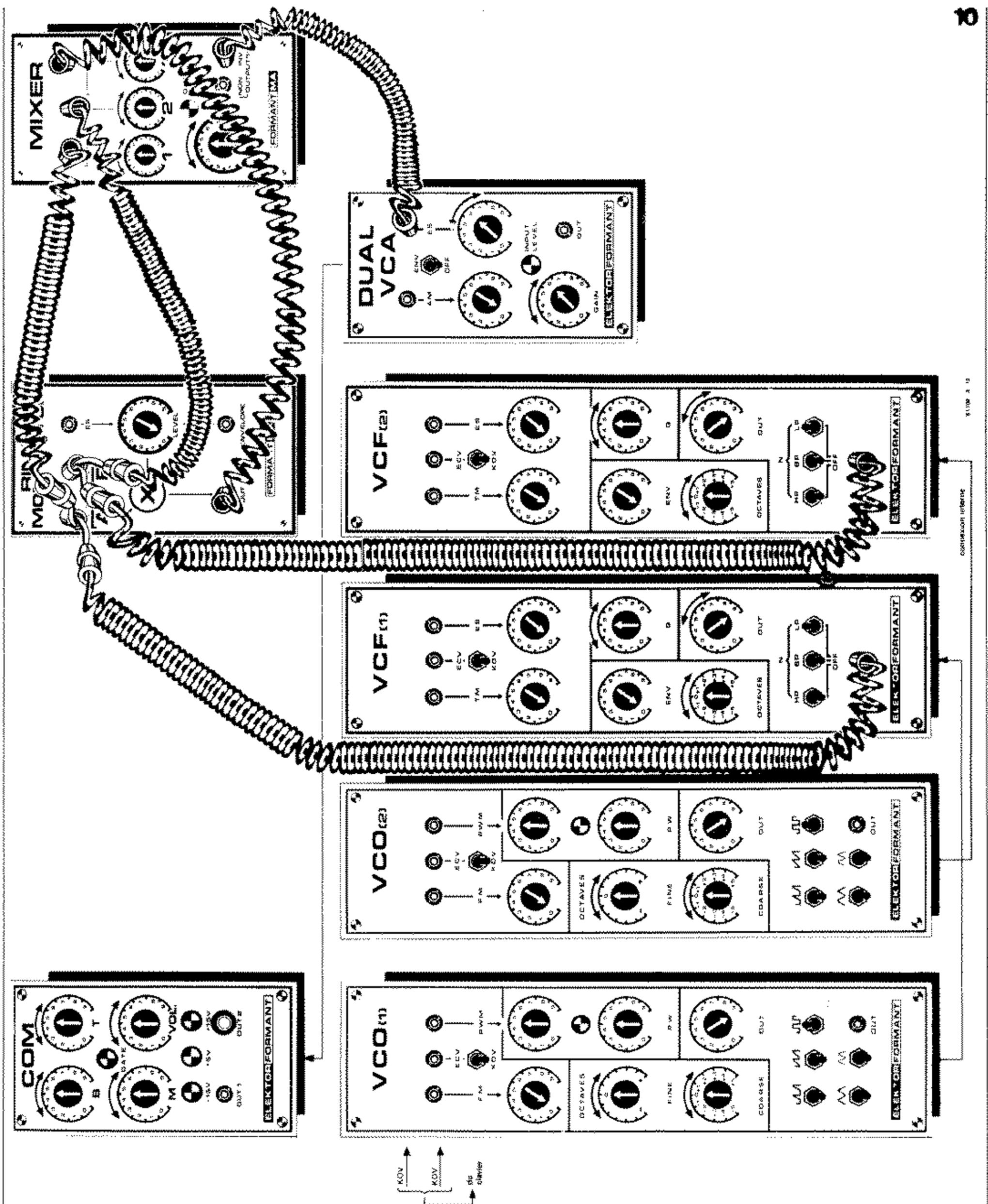


Tableau 1. Fonctionnement d'un modulateur en anneau.

Entrée A	800	700	600	500	400	300	200	100
Entrée B	400	400	400	400	400	400	400	400
Sortie (Somme)	1200	1100	1000	900	800	700	600	500
Sortie (Différence)	400	300	200	100	0	100	200	300
	Fréquence (signal sinus) en Hz							

Figure 9. Plan de câblage destiné à produire un timbre harmonique composé des harmoniques 1, 2, 3 et 4 (VCO :  $f_2 = 3 \cdot f_1$ ).

Figure 10. Plan de câblage du synthétiseur pour l'obtention de sons de cordes frottées, accordéon, cornemuse, etc.



vent pour le moins inattendues. Selon le choix des fréquences des signaux d'entrée du modulateur en anneau, il est possible de produire des sons vocaux, des gargouillis d'ondes courtes et même de faire tintinnabuler des cloches avec beaucoup de réalisme (figure 11). Ce qui caractérise ce genre de sons est la présence d'harmoniques "artificielles" ou arithmétiques, si l'on préfère. L'intensité du son résultant

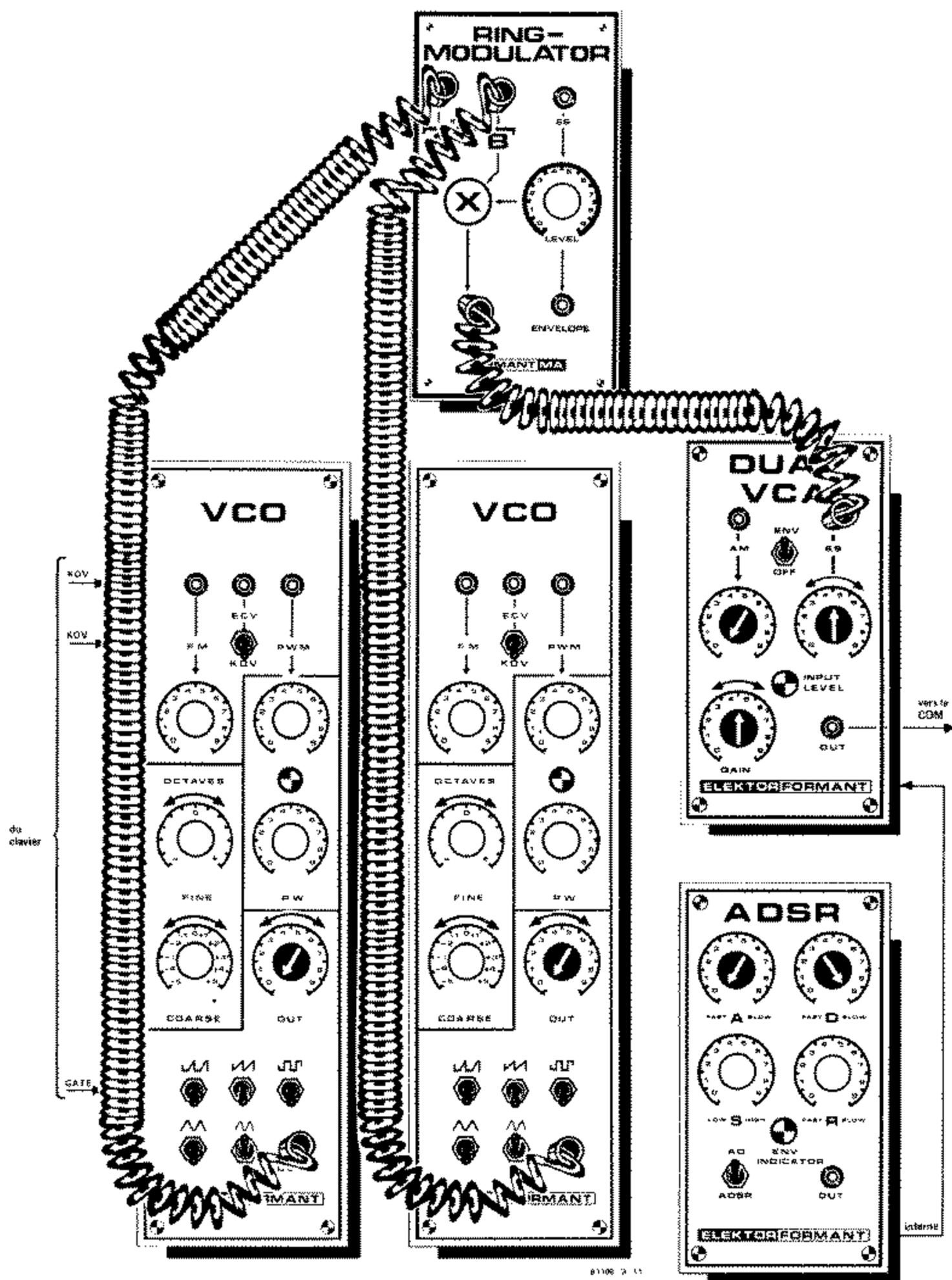
est proportionnelle à la densité des harmoniques supérieures présentes dans les signaux modulés.

Du fait que le modulateur en anneau du FORMANT est doté d'un pré-amplificateur, il est possible de lui appliquer directement le signal provenant d'instruments électriques ou de micros. Dans l'ensemble, le signal de sortie d'un modulateur en anneau est plus intéressant après un filtrage judicieux

et un mélange partiel avec le (ou les) signal (aux) modulé (s).

La modulation en anneau d'un signal vocal n'est pas sans présenter d'intérêt, notamment lorsqu'elle est associée à la modulation de largeur d'impulsion (PWM).

Le modulateur en anneau est aussi un remarquable VCA; il suffit d'appliquer un signal à moduler en amplitude à une entrée, tandis que l'autre se



## Déphaseur

### Phase Shifter

Le module déphaseur intéressera au premier chef les propriétaires de "petits" FORMANTS auxquels il permettra de diversifier leur palette sonore.

Nombreux sont les sons typiques de synthétiseur qui séduisent par leur mobilité, ou plus précisément par la micro-mobilité de leur structure interne. Cet effet est obtenu dans les synthétiseurs d'une certaine taille à l'aide de modulations de fréquence et de largeur d'impulsion différentes et indépendantes les unes des autres; c'est ainsi que naissent des cycles de déphasage plus ou moins complexes.

Les VCO du FORMANT étant équipés chacun d'une entrée de modulation de largeur d'impulsion, l'effet peut être

réalisé à partir d'un unique VCO; toutefois, ceci ne concerne que l'onde rectangulaire et ne vaut pas pour les autres formes d'onde. C'est par contre un effet qui est tout à fait à la portée du module déphaseur que nous nous apprêtons à décrire.

Contrairement à ce qui se passe dans les filtres passe-haut et passe-bas, l'amplitude de sortie d'un filtre passe-tout est constante sur une large plage de fréquences; ces modules introduisent par contre un décalage de phase plus ou moins important entre le signal qui leur est appliqué et celui qu'ils délivrent.

Le schéma de la figure 1 montre à quel point il est facile de réaliser la fonction de base d'un module déphaseur. La proportion du décalage de phase entre les signaux d'entrée et de sortie est liée à la valeur de la résistance R et du condensateur C. Le diagramme illustre

la relation qui lie le décalage de phase à la fréquence du signal; on y voit que le filtre passe-tout est du premier ordre du fait que le déphasage est compris entre 0° et 180°.

Figure 1. Schéma de principe d'un filtre passe-tout. Le diagramme de déphasage montre la relation que ce dernier entretient avec la fréquence du signal.