

La tendance actuelle en matière de conception des circuits sélectifs pour filtres et oscillateurs HF ou BF est incontestablement à la suppression des bobinages chaque fois que la chose est possible sans dégradation des performances. Or les circuits RC, même cascades de façon à présenter des pôles multiples, ne peuvent guère prétendre à la sélectivité et à la précision de fréquence des circuits LC. Leur usage le plus courant se situe donc le plus souvent dans le domaine des filtres à bande relativement large, et encore faut-il souvent prévoir des éléments ajustables ou de haute précision. Enfin, les dérives en température demeurent souvent non négligeables.

# Les filtres piézo-céramiques et leur utilisation en HF et BF

Dans tous les cas où l'on exige des courbes de réponse très sélectives ainsi qu'une excellente stabilité de fréquence, la solution la plus satisfaisante pour remplacer les circuits LC se trouve être l'emploi de filtres à éléments piézo-électriques.

## Principe général des éléments piézo-électriques sélectifs

Rappelons une donnée historique non sans rapport avec notre propos : dans l'histoire de l'horlogerie, une précision acceptable dans la mesure du temps n'a pu être obtenue que lors de l'introduction de mouvements à balancier. Cette référence de période purement mécanique est en effet extrêmement précise et étroitement liée aux caractéristiques géométriques et physiques d'un pendule, caractéristiques sur lesquelles il est assez aisé d'intervenir.

Ceci pour introduire l'usage des quartz dans les oscillateurs de précision. Nous ne reviendrons pas, bien sûr, sur les principes mis en jeu, mais poursuivrons notre parallèle horlogerie-électronique en notant que la fréquence d'un quartz est déterminée par sa taille, c'est-à-dire par un ensemble de caractéristiques géométriques, tout comme un balancier.

Notre parallèle se trouvera bouclé sur lui-même lorsque nous aurons remarqué que des quartz prennent de plus en plus la place des balanciers en

tant que référence temporelle dans les mouvements d'horlogerie modernes.

Le premier usage des quartz a bien sûr été la stabilisation en fréquence des oscillateurs d'émission et de réception, permettant d'exiger moins de précision dans les circuits accordés de ces étages. Dans certains cas, il est même possible de supprimer tout bobinage de ces oscillateurs.

Les chaînes FI des récepteurs de télécommunications ont ensuite pu profiter également de la stabilité de fréquence des quartz. En effet, au lieu de distribuer les éléments sélectifs (circuits LC) entre les étages d'un amplificateur, il est possible de mettre en œuvre un **filtre à quartz**, ensemble de quartz de fréquences bien définies, assemblés de manière à constituer un filtre passe-bande dont la courbe de réponse est déterminée de façon très exacte, suivi d'un bloc d'amplification à grand gain et à sélectivité quasiment inexistante.

La sélectivité du récepteur est donc entièrement obtenue dès la sortie du mélangeur et seul le signal FI parfaitement pur se trouve soumis à l'amplification.

Ce procédé prend toute sa valeur avec l'usage de plus en plus répandu de circuits intégrés remplissant en un

seul boîtier la fonction d'amplification FI à grand gain et à faible coût. C'est ici qu'intervient la notion de prix de revient des filtres à quartz, qui est très élevée en comparaison du coût total du récepteur.

L'introduction à cette technique de la sélectivité en tête sans bobinages ne pouvait donc se faire dans les récepteurs grand public ou professionnels économiques qu'à la condition essentielle de ramener le prix des éléments sélectifs à une valeur voisine de celle des circuits intégrés d'amplification. Une telle réduction de prix n'était pas concevable pour un filtre à quartz, d'où l'introduction de nouvelles technologies de réalisation de cristaux piézo-électriques artificiels (céramiques).

A la différence des quartz, cristaux

naturels taillés à la demande, les céramiques piézo-électriques sont obtenues par cuisson sous pression d'un mélange de composants chimiques dont la formule varie selon le type de produit à obtenir.

La fabrication d'un cristal piézo-électrique de dimensions (donc de fréquence) standardisées peut se faire à l'aide de procédés industriels automatisés, en très grande série, d'où une diminution considérable de prix de revient. C'est pourquoi un filtre, même composé de nombreux cristaux résonateurs, mais opérant sur une fréquence standard (455 kHz par exemple) peut n'intervenir que pour une part très raisonnable dans le coût total d'une platine FI à hautes performances. De plus, la réduction voire la suppres-

sion des opérations d'alignement, fabrication contribuent encore à la réduction des coûts de production tout en permettant une amélioration des performances.

### Exemple de circuits FI à filtres céramique

Les exemples de schémas que nous allons donner ici font appel à des filtres de différents modèles choisis dans la gamme Murata/Stettner, représentée en France par Emile Joly S.A. Certains sont extraits de notes d'applications du fabricant, d'autres ont été conçues par nous en vue d'applications particulières, mais tous ont été vérifiés sur maquettes et sélectionnés pour leurs bonnes performances.

L'implantation de circuits imprimés utilisant ces composants ne pose pas de problème particulier, car les filtres céramique ne présentant pas de rayonnement magnétique, contrairement aux circuits LC, n'exigent aucun blindage.

Il convient toutefois de souligner que, comme tout résonateur mécanique, un filtre céramique présente des résonances parasites éloignées de la fréquence nominale. En conséquence, il est recommandé de prévoir un circuit LC dans la chaîne FI, opérant une réjection de ces fréquences indésirables. La configuration la plus fréquente est que le mélangeur débite dans le primaire d'un transfo FI dont le secondaire attaque, à travers une résistance appropriée, le filtre céramique. L'impédance d'entrée se trouve ainsi correctement adaptée. Côté sortie, la plupart des circuits intégrés que l'on rencontre à ce niveau permettent de prévoir une résistance de charge de la valeur voulue.

La figure 1 permet d'effectuer la liaison avec les anciens montages à

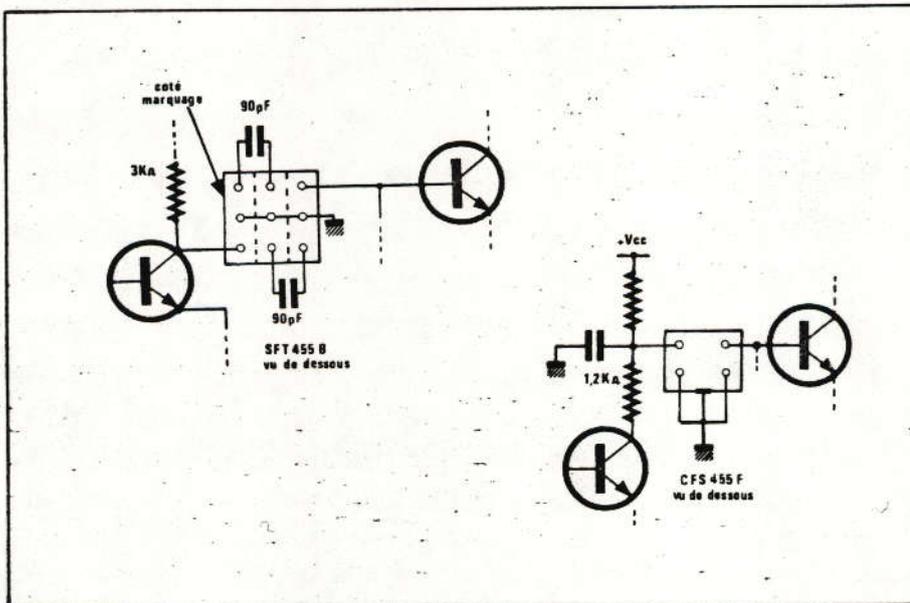


Fig. 2. - Variantes de la figure 1 permettant une meilleure sélectivité.

type filtre	BFU 455 K	SFZ 455 A	SFT 455 B	CFS 455 F
BP à 3dB	8 ± 2 KHz	4,5 ± 1 KHz	4,5 ± 1 KHz	4,2 KHz

Fig. 3. - Bandes passantes des filtres mentionnés.

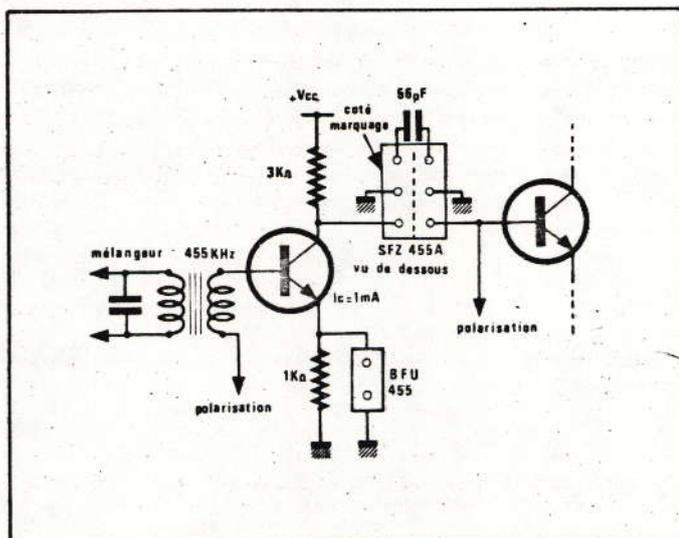


Fig. 1. - Utilisation des filtres céramique dans une chaîne FI classique.

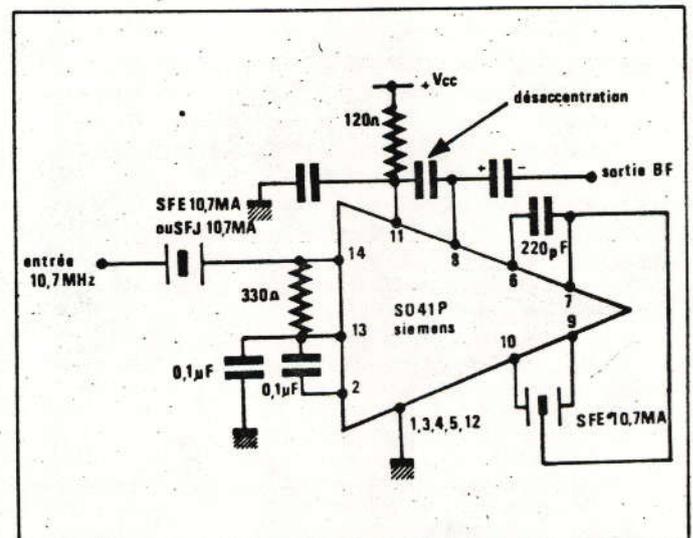


Fig. 4. - Un ampli FI démodulateur FM à filtres céramique.

sélectivité répartie. On peut en effet utiliser les filtres céramique en liaison entre deux étages à transistor, et remplacer les condensateurs de découplage des résistances d'émetteur par des filtres spécialement conçus à cet effet (pour rendre sélective la contre-réaction d'émetteur). La figure 2 donne les indications voulues pour utiliser des filtres à haute sélectivité dans le cas de l'étude de récepteurs performants. Les valeurs de résistances indiquées sur les figures doivent être respectées afin de conserver une bonne adaptation des filtres. La figure 3 donne une idée des bandes passantes que l'on peut obtenir pour chaque élément.

En figure 4, nous atteignons le domaine de la FM, avec les sélectivités plus larges rendues nécessaires par la réception d'émissions stéréo multiplex.

Le montage représenté, que nous avons utilisé maintes fois dans la pratique, utilise un circuit intégré SO 41 P Siemens et a également été testé sur TDA 1047 et TBA 120 S. Les filtres servent à obtenir la sélectivité et à accorder le démodulateur. Cette figure 4 représente donc à elle seule une platine FI 10,7 MHz complète, et dépourvue de tout réglage. Des sensibilités excellentes peuvent être obtenues avec une bonne tête VHF en ajoutant le montage de la figure 5 pour augmenter le gain FI. La figure 6 donne les caractéristiques principales des filtres employés. Ils peuvent éventuellement être associés en cascade, leurs impédances d'entrée et de sortie étant identiques.

Le schéma de la figure 7 nous ramène à la réception AM, avec un récepteur complet dont la sélectivité est obtenue par transfo et filtre céramique. Un choix correct de bobinage d'accord et d'oscillateur local permet de couvrir toute fréquence inférieure ou égale à 30 MHz.

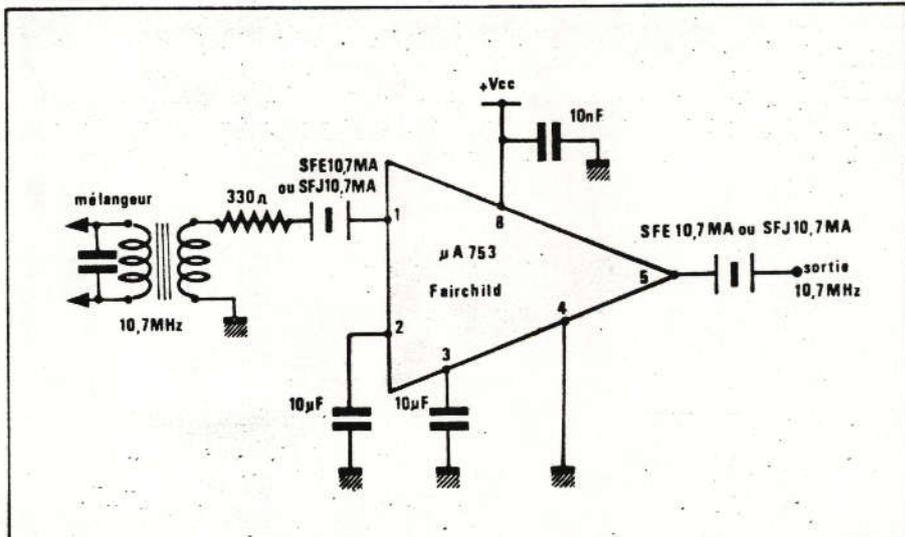


Fig. 5. - Un ampli-limiteur 10,7 MHz à filtres céramique.

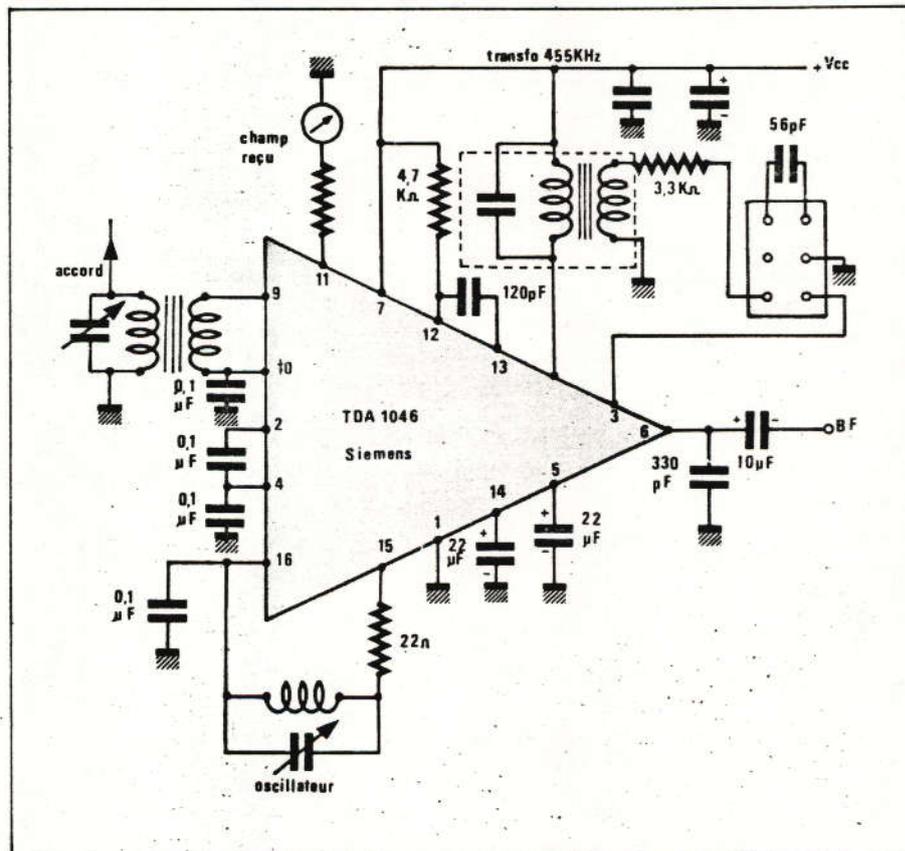


Fig. 7. - Un récepteur AM complet à circuit intégré et filtre céramique.

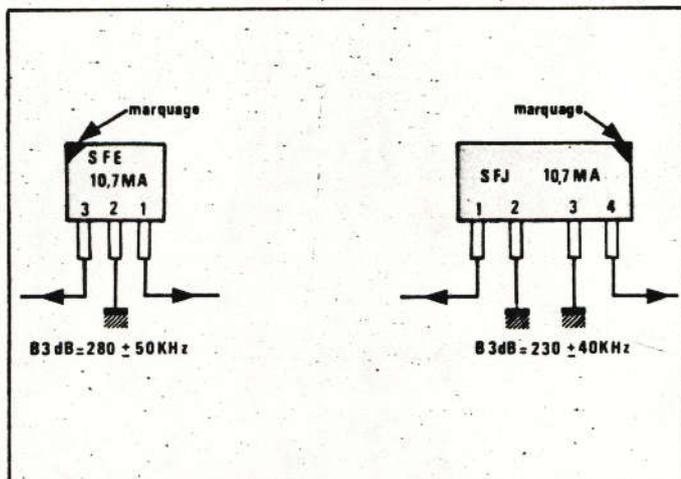


Fig. 6. - Brochage des filtres utilisés en figure 5.

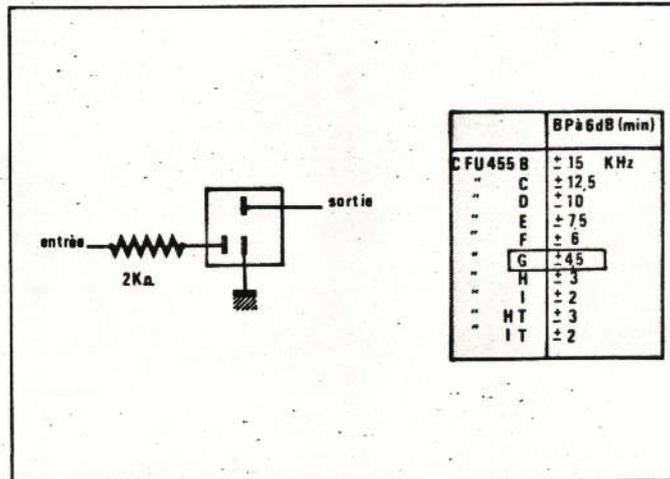


Fig. 8. - Brochage du CFU 455 vu de dessous et sa bande passante selon les modèles.

La sélectivité peut être améliorée en utilisant le SFT 455B, le CF5455F ou le CFU455 (fig. 8) à la place du SFZ 455A, qui permet déjà des performances intéressantes, notamment en réception « radiodiffusion ». Les modèles plus sélectifs ne s'imposent vraiment que pour des applications « télécommunications ».

Nous ne quitterons pas le domaine 455 kHz « télécommunications » avec la figure 9, qui montre comment réaliser un discriminateur FM de très bonne qualité avec le CFY 455S.

L'ensemble des composants 10,7 MHz et 455 kHz que nous venons de décrire peuvent d'ailleurs équiper de façon très valable de nombreux types de récepteurs de télécommunications FM ou AM à double changement de fréquence. En 27 MHz notamment, on notera en plus l'existence du SFE 27 MA qui, disposé en entrée de récepteur, présente une bande passante de 500 kHz à 3 dB centrée sur 27,185 MHz.

### L'utilisation des diapasons piézo-électriques en B.F.

Les filtres céramique pour circuits FI, tout comme les quartz, exploitent la résonance mécanique de l'élément piézo-électrique lui-même. Pour les fréquences tombant dans le spectre BF (codage et décodage d'ordres de télécommande, par exemple) il existe une autre méthode, consistant à utiliser comme élément résonant un petit diapason en acier sur lequel sont soudés des transducteurs piézo-électriques. L'un sert à exciter le diapason, et l'autre met en évidence les vibrations apparaissant à la résonance.

La figure 10 montre l'organisation interne d'un tel composant. Trois broches de raccordement rejoignent la masse et les deux transducteurs, dont le « point froid » est relié au diapason d'acier proprement dit.

Les conséquences de ces principes sont les suivantes :

- l'impédance d'entrée et celle de sortie sont celles des transducteurs céramique (300 k $\Omega$  à la fréquence nominale) et donc essentiellement capacitives (700 pF environ) ;
- la largeur de bande est très faible (1,5 Hz pour 300 Hz et 3,5 Hz pour 3 000 Hz, ceci à 3 dB) ;
- la précision de fréquence est très bonne ( $\pm 0,5$  à 1 Hz) ;
- le temps de réponse est assez long : pour un oscillateur, la mise en oscillation peut prendre plusieurs secondes. Pour un sélecteur de fréquence (« relais

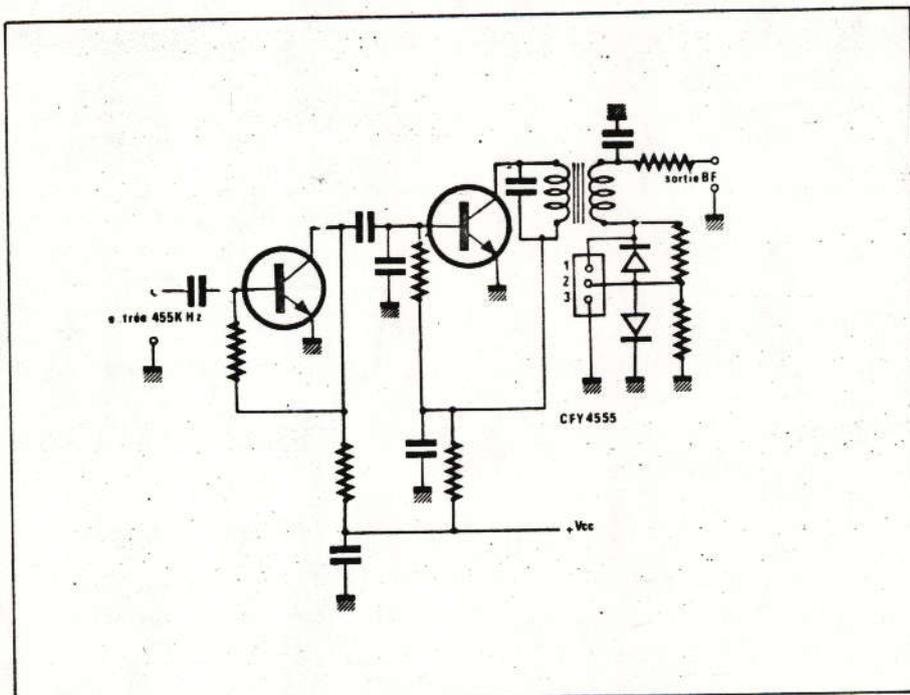


Fig. 9. - Utilisation du CFY 455S en discriminateur FM à 455 kHz.

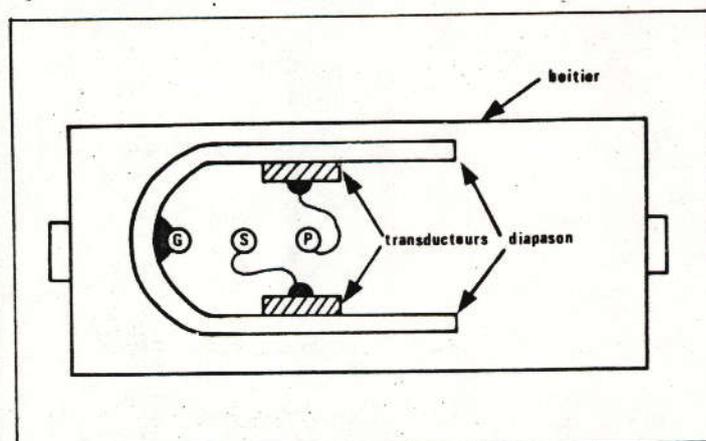


Fig. 10. - Structure interne d'un diapason piézoélectrique.

	Circuit LC	MIC	Diapasons
Portée	3	2	1
Sécurité	3	1	2
Nombre de canaux possibles	3	1	2
Temps de réponse	1	3	2
Simplicité	2	3	1
Coût	1	3	2
Stabilité dans le temps et en température	3	1	2

Fig. 11. - Performances de 3 systèmes de télécommande.

de fréquence », bien que plus rapide, la réaction est trop lente pour permettre une utilisation en transmission de données digitales. Par contre, cet amortissement important présente un avantage considérable pour les télécommandes sur voie radio. En effet, lorsqu'un délai de réponse de quelques dizaines à quelques centaines de mil-

lisecondes est acceptable (ce qui est très généralement le cas), on peut obtenir une protection exceptionnelle contre les parasitages les plus divers et notamment les conversations en phonie.

Nous nous sommes livrés à une expérimentation comparative sur le

terrain de trois systèmes de notre conception destinés à une télécommande tout ou rien à plusieurs canaux sur une voie radio fortement parasitée par de la phonie (27 MHz) :

- transmission par tonalités décodage par filtres LC ;
- transmission par tonalités décodage par diapasons ;
- transmission digitalisée en MIC.

Le système à diapasons, moyennant un réglage correct à l'origine, est arrivé en tête au point de vue portée, c'est-à-dire capacité d'extraction d'un signal noyé dans le bruit : la télécommande reste possible alors qu'une conversation devient incompréhensible.

La figure 11 donne les résultats détaillés de nos essais, sous forme d'un classement de la première à la troisième place. On peut constater que le système à diapasons constitue généra-

lement un bon compromis pour la majorité des applications. Ceci explique que nombre d'entreprises de premier plan (EDF, RATP, aciéries, chantiers divers, etc.) utilisent avec succès différents équipements comportant des diapasons.

### Mise en œuvre des diapasons

Une installation de télécommande à diapasons se compose de plus souvent d'oscillations et de sélecteurs regroupés en matrices plus ou moins complexes. Il est pratiquement obligatoire d'utiliser des diapasons aux deux extrémités de la liaison, en raison de la faible tolérance existant sur les fréquences. Dans le cas de très nombreux canaux, on pourrait toutefois envisager à l'émission l'utilisation de diviseurs

programmables de fréquence pilotés par une horloge à quartz.

Lors de l'étude de circuits à diapasons, il faut tenir compte de deux facteurs :

- l'impédance nominale des diapasons étant de 300 k $\Omega$ , si l'attaque et le prélèvement se font sous des impédances inférieures, la largeur de bande se trouvera réduite au prix toutefois d'un affaiblissement plus élevé. Ceci peut être utile lorsqu'une très grande sécurité de décodage doit être obtenue.

- Il existe un déphasage entre les signaux d'entrée et de sortie. Ce déphasage dépend de l'adaptation d'impédance à l'entrée et à la sortie et de la fréquence.

Dans le cas d'une adaptation optimale (300 k $\Omega$ ), le déphasage est de 90°, ce qui ne permet pas la réalisation d'un circuit oscillateur simple. Toutefois, le déphasage atteint 180° pour

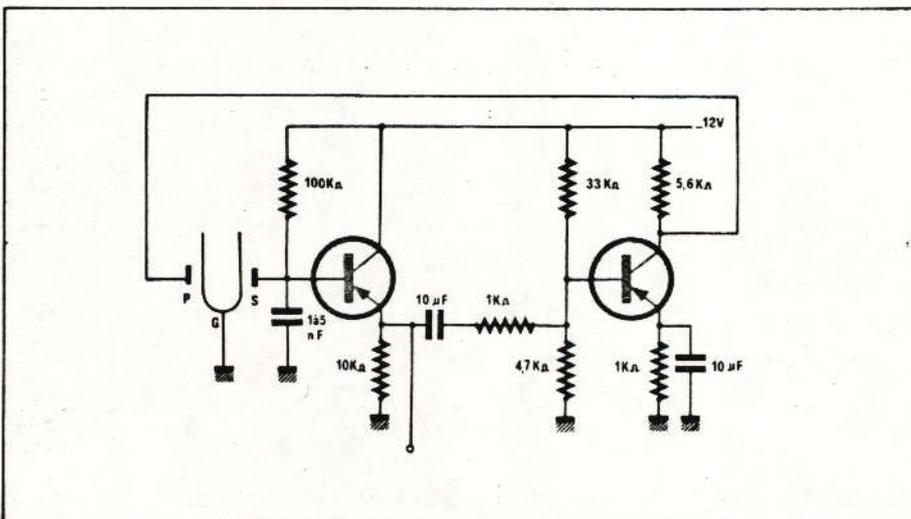
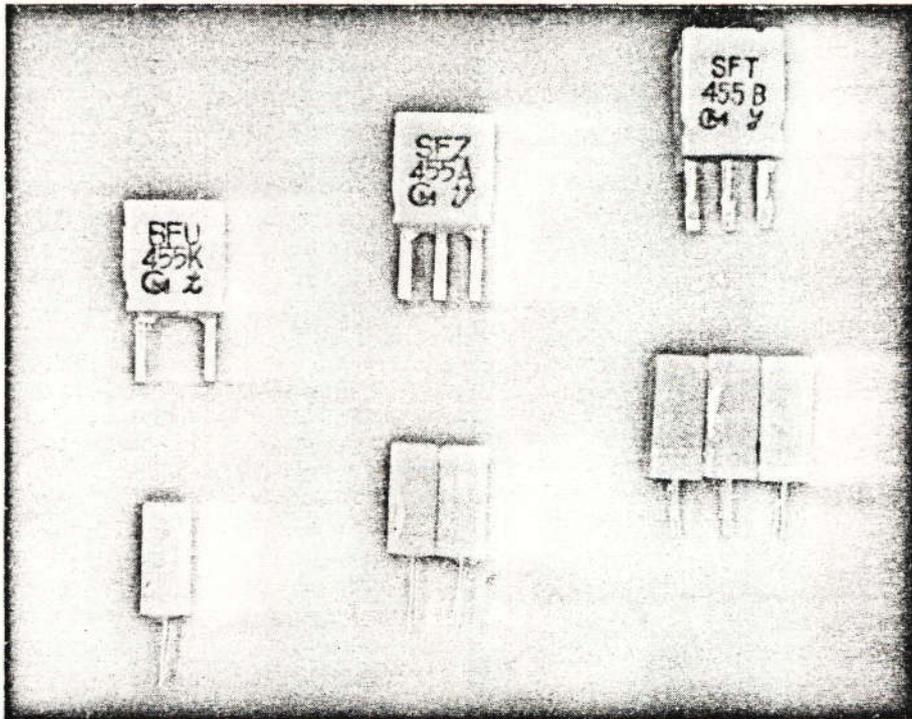


Fig. 12. - Un oscillateur à transistors utilisant un diapason.

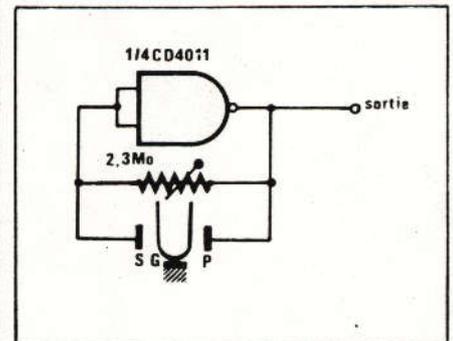


Fig. 13. - Un oscillateur à circuit CMOS.

une fréquence inférieure de 0,2 à 0,5 % à la fréquence de résonance. C'est la raison pour laquelle il existe des diapasons de même fréquence marquée, mais différents selon qu'ils sont destinés à l'émission ou à la réception. Les premiers sont réglés sur une fréquence augmentée de 0,2 à 0,5 % pour permettre la réalisation simple d'oscillateurs.

Différentes voies peuvent être suivies lors de la conception d'un ensemble de télécommande à diapasons :

- étude complète des circuits à l'aide de composants courants ;
- utilisation de composants spécifiques associés à des diapasons ;
- utilisation de « relais de fréquence » comprenant dans un même bloc fonctionnel le diapason et son électronique.

### 1 - Exemples de circuits à composants courants :

L'oscillateur de la figure 12 ne fait appel qu'à deux transistors. Celui de la figure 13 utilise une porte inverseuse de la série CMOS. Son intérêt est particulièrement net lorsque des signaux rectangulaires sont nécessaires. Dans un tel cas, la résistance ajustable de 2,2 M $\Omega$  sera remplacée par une

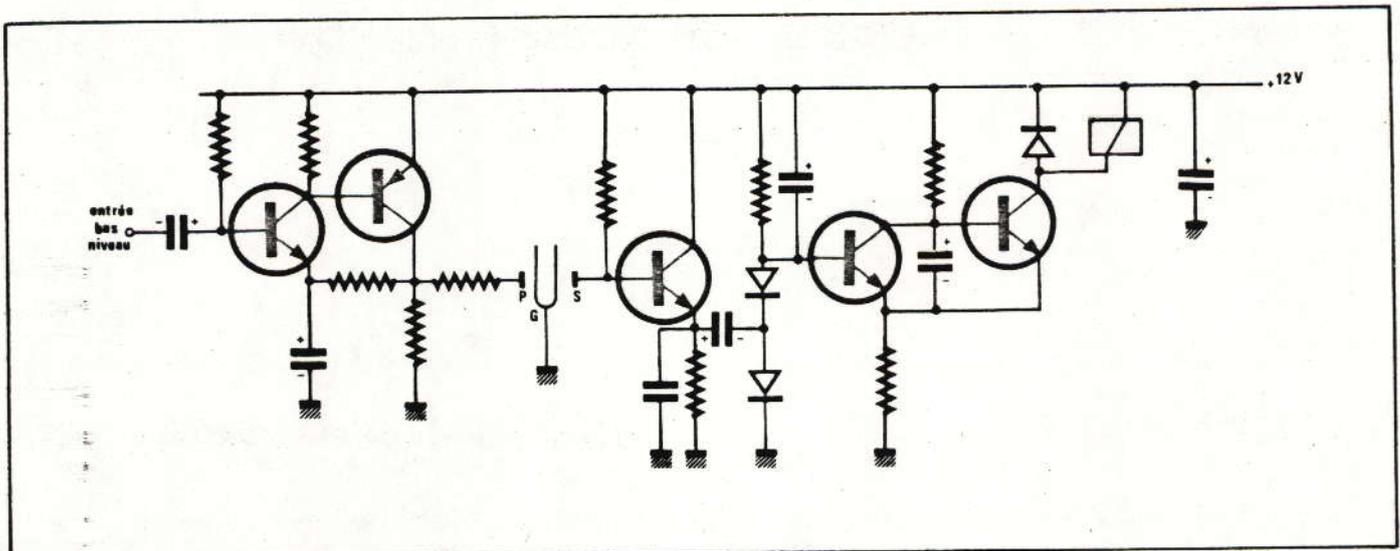


Fig. 14. - Un sélecteur à transistors.

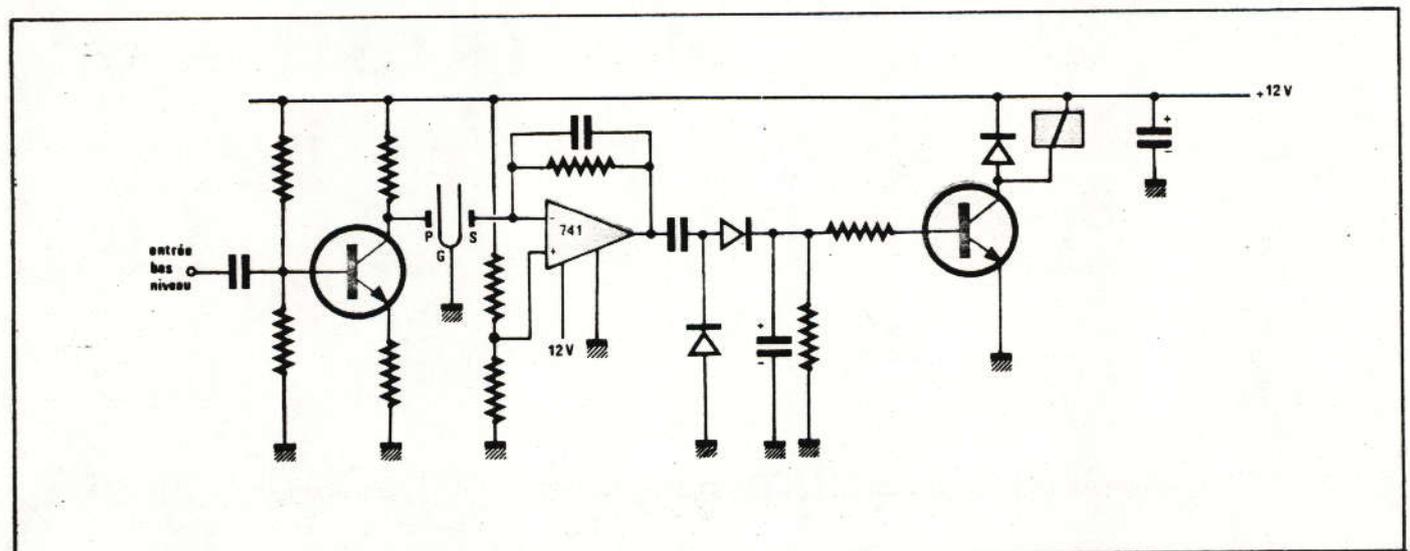
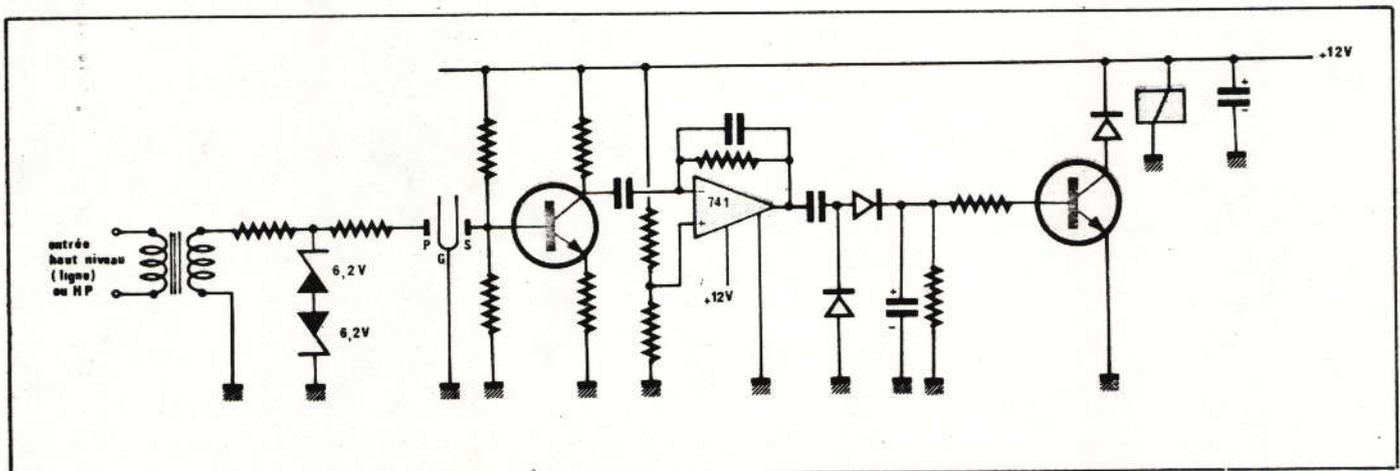


Fig. 15. - Deux sélecteurs à circuit intégré.

2,2 M $\Omega$  fixe. Les signaux de sortie seront compatibles avec toute entrée CMOS et notamment avec toute porte chargée de laisser passer ou non ces signaux. En effet, cet oscillateur exige 2 à 3 secondes pour démarrer, ce qui rend préférable une manipulation extérieure des signaux. Le sélecteur transistorisé de la figure 14 est prévu pour utiliser les signaux relativement faibles issus d'un discriminateur FM.

Le sélecteur de la figure 15a, par

contre, utilise les signaux provenant d'une sortie pour haut-parleur ou d'une ligne filaire 600  $\Omega$ . Celui de la figure 15b est, lui aussi, prévu pour un fonctionnement à bas niveau (discriminateur ou détecteur AM).

## 2 - Exemples de circuits à composants spécifiques :

Le fabricant des diapasons (Murata/Stettner) fournit également des circuits intégrés hybrides parfaitement

adaptés à des utilisations en oscillateur ou en relais de fréquence. Les figures 16 et 17 montrent les schémas d'application de deux de ces circuits que nous avons sélectionnés.

On rappelle que la mise en oscillation d'un diapason n'est pas instantanée et qu'il vaut mieux procéder à l'émission par action sur une porte autorisant ou non le passage du signal. La figure 18 donne un exemple de réalisation d'une telle porte.

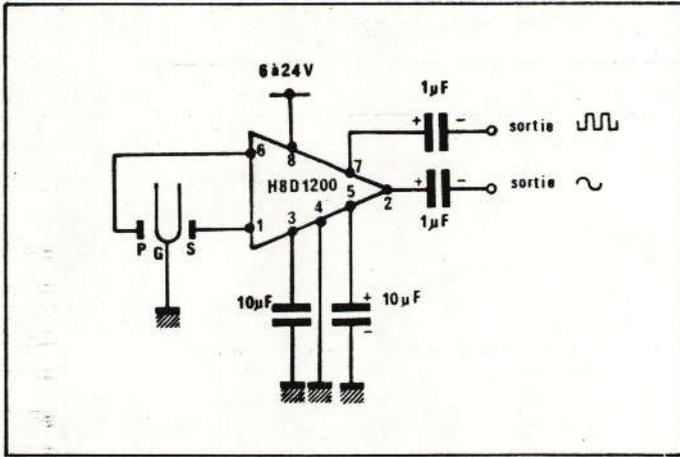


Fig. 16. - Un oscillateur à circuit hybride.

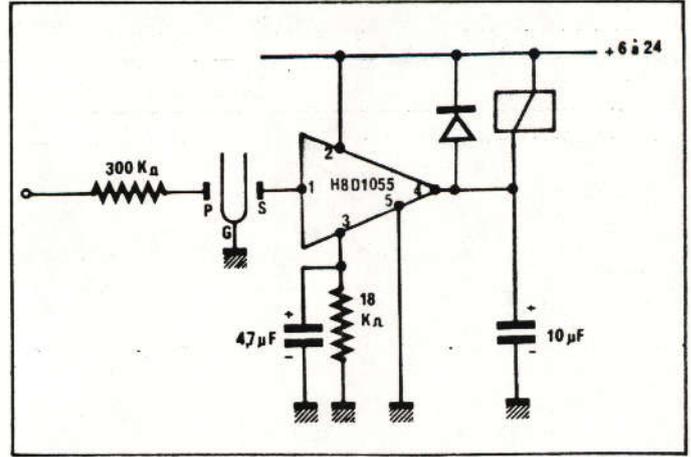


Fig. 17. - Un sélecteur à circuit hybride.

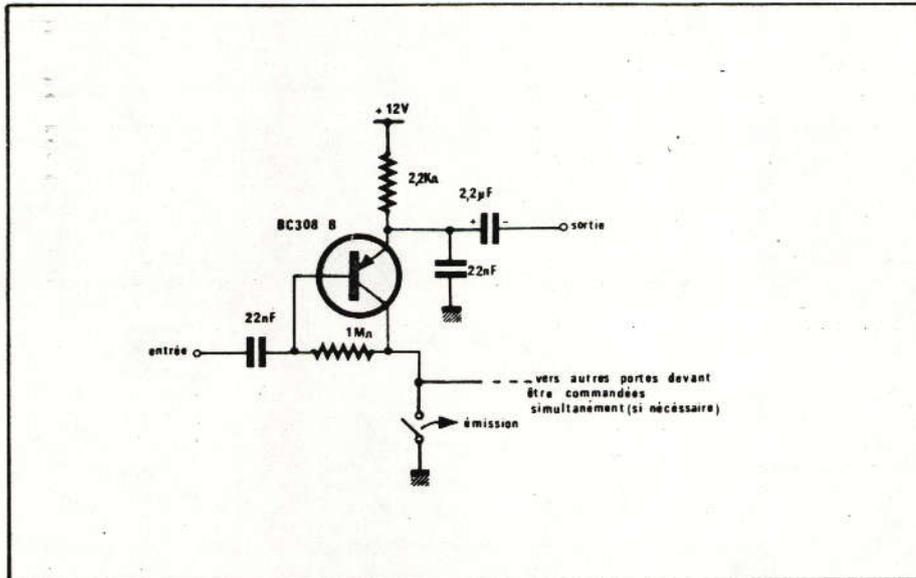
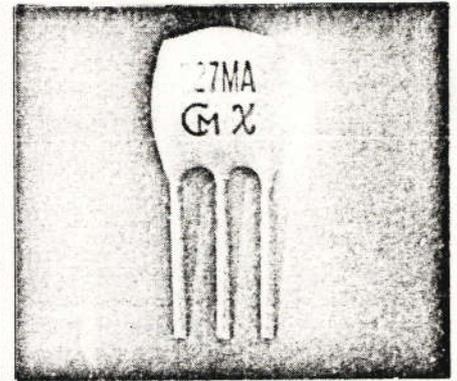


Fig. 18. - Une porte de commande pour oscillateur.



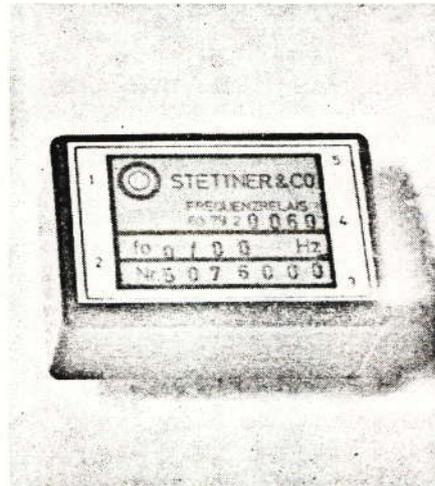
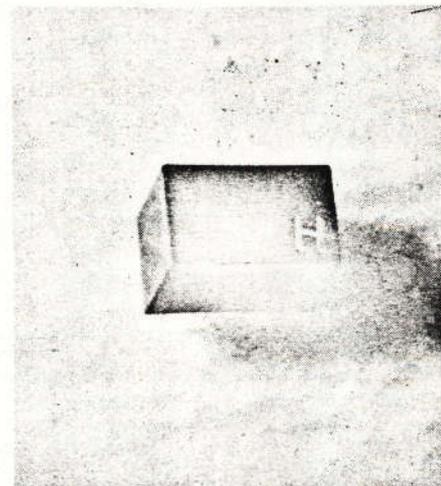
La transmission des tonalités ainsi définies peut se faire par voie radio ou sur ligne téléphonique. Les applications sont nombreuses dans les domaines de la télécommande, de la télésurveillance, et de la signalisation lorsque la complexité de l'installation ne justifie pas l'emploi de techniques digitales. Des systèmes simples d'appel sélectif en radiotéléphonie et en interphonie peuvent également être réalisés à relativement peu de frais. L'enregistrement des signaux sur bande magnétique peut permettre toutes sortes de programmations en temps différé avec un matériel d'enregistrement lecture des plus courants.

## Conclusion

Les exemples que nous avons envisagés au cours de cette étude font partie de domaines très variés. De quelques centaines de Hertz pour les diapasons jusqu'à 27 MHz pour les filtres céramique, la plupart des applications exigeant des circuits à haute sélectivité peuvent s'accommoder des éléments standards (donc peu coûteux) des séries de filtres piézo-céramiques.

Toutes sortes de sélections de fréquence peuvent ainsi être réalisées pratiquement sans aucun réglage, ce qui représente un très gros avantage tant en fabrication qu'en maintenance.

**Patrick Gueulle**  
Ingénieur-Conseil



## 3 - Oscillateurs et relais de fréquence intégrés :

Le fournisseur de ces diapasons possède à son catalogue une large gamme de modules enrobés ou non, à diapasons interchangeable ou non, destinés à l'émission et à la réception d'ordres de télécommande.

Dans certains cas, lorsqu'il est souhaitable d'augmenter le nombre d'ordres différents pouvant être trans-

mis ou encore lorsque la sécurité doit être maximale, on éprouve la nécessité de transmettre plusieurs tonalités simultanément (de 2 à 4). Côté réception, des fonctions logiques appropriées reconstituent les ordres ainsi codés. Il existe des modules récepteurs spécialement optimisés en vue de ces utilisations particulières, dans lesquelles une fréquence ne doit en aucun cas en perturber une autre ou saturer l'amplificateur.