

A la pêche aux ondes... en FM

par Jean-Philippe MULLER
Lycée Louis Armand - 68100 Mulhouse

1. INTRODUCTION

Cet article décrit le fonctionnement et la réalisation pratique d'un récepteur à modulation de fréquence pour la bande de radiodiffusion commerciale de 88 MHz à 108 MHz.

La structure utilisée est celle qui est universellement adoptée en réception, que ce soit en modulation d'amplitude, de fréquence ou en télévision.

La maquette proposée, volontairement très simple à réaliser, est utilisée depuis plusieurs années pour l'enseignement de la physique appliquée aux télécommunications au niveau de la classe de BTS Électronique.

La réalisation fait appel à des circuits intégrés bien connus depuis de nombreuses années, mais qui répondent bien à nos objectifs.

2. QUEL POISSON PÊCHER ?

La figure 1 est une fenêtre ouverte sur la bande de fréquence comprise entre 0 et 600 MHz. L'analyseur de spectre haute-fréquence a été simplement muni d'une antenne, simple bout de fil d'une dizaine de centimètres.

On y distingue bien la bande de radiodiffusion FM de 88 MHz à 108 MHz, l'émetteur Canal Plus en VHF à 176 MHz et les trois émetteurs de TV en UHF pour la région mulhousienne :

- France 2 sur le canal 21 à 471.25 MHz,
- France 3 24 à 495.25 MHz,
- TF1 27 à 519.25 MHz.

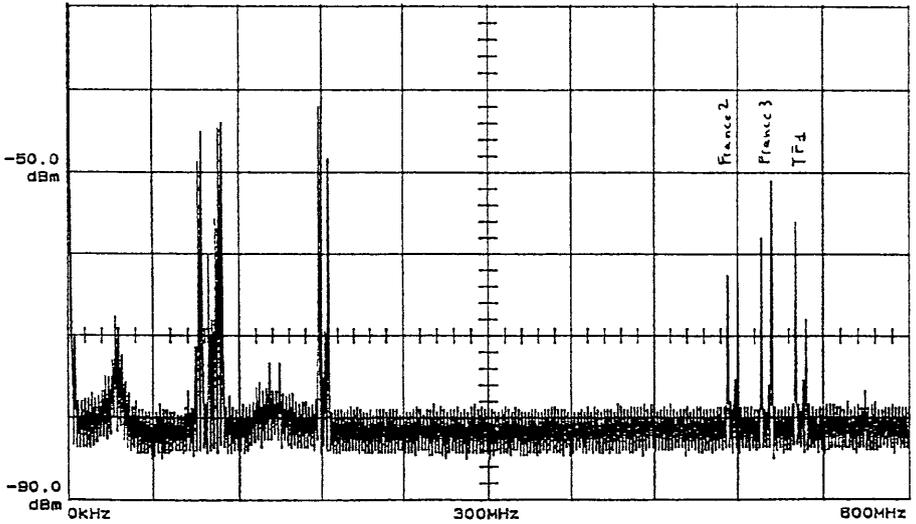


Figure 1 : Spectre de la bande 0-600 MHz.

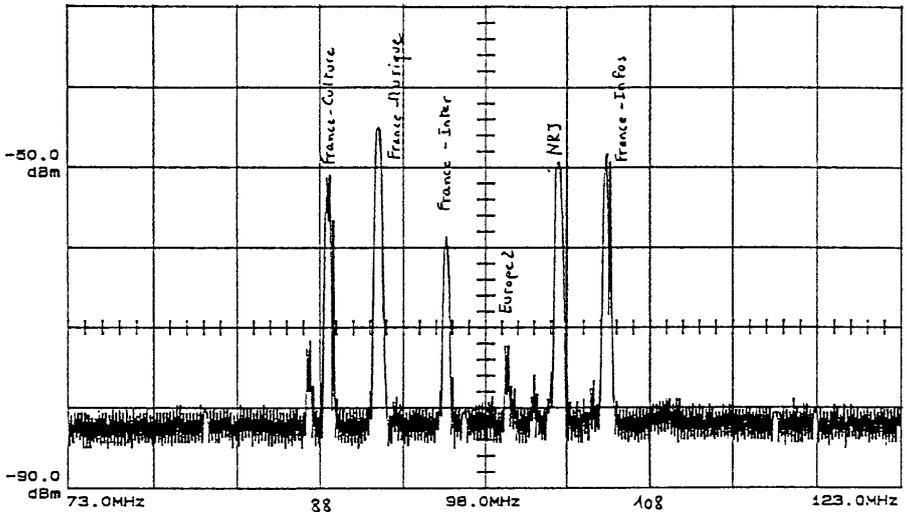


Figure 2 : spectre de la bande FM.

Intéressons-nous à la bande FM. Nous y repérons sans problème les émetteurs les plus puissants de la région :

- France-Culture à la fréquence de 88,7 MHz,
- France-Musique 91,6 MHz,
- France-Inter 95,7 MHz,
- Europe 2 99,8 MHz,
- NRJ 102,1 MHz,
- France-Info 105,5 MHz.

La bande FM contient évidemment d'autres émetteurs, moins puissants, qui n'apparaissent donc pas nettement sur ce spectre, en particulier des émetteurs allemands et suisses. Néanmoins cette bande est moins encombrée dans notre paisible campagne alsacienne qu'en région parisienne...

L'examen du spectre nous permet également de mesurer la tension induite au niveau de l'antenne pour un émetteur donné.

Par exemple, pour France-Inter et avec une antenne de 10 cm environ, le signal reçu à un niveau de $V = -58$ dBm soit $V = 0,3$ mV.

Rappelons la relation entre une tension exprimée en dBm et la tension exprimée en volts :

V en dBm = $10 \cdot \log$ (puissance sur 50 ohms / 1 milliwatt)

$$= 10 \cdot \log (V^2/50 \cdot 10^{-3}) = 10 \cdot \log (V^2/0,05) = 20 \log(V) + 13$$

Le signal reçu pour France-Inter est donc un signal sinusoïdal d'amplitude 0,3 mV et de fréquence $f(t)$ variable autour de la fréquence moyenne encore appelée fréquence de la porteuse à $f_1 = 95,7$ MHz :

$$f(t) = f_1 + k \cdot s(t)$$

où $s(t)$ est le signal basse-fréquence.

La variation $k \cdot s(t)$ est limitée dans la bande FM à 75 kHz de part et d'autre de la porteuse.

3. COMMENT NE PRENDRE QU'UN SEUL POISSON

Pour capter un émetteur donné, deux solutions existent :

- déplacer le filet pour attraper le poisson qu'on veut,
- faire venir le poisson qui nous intéresse dans le filet qui est fixe.

La première solution, la plus simple a priori, nécessite un filtre sélectif de fréquence centrale variable et de largeur fixe égale à la bande occupée par un émetteur, soit environ 300 kHz. Ce filtre doit avoir en plus une transmittance nulle en dehors de sa bande passante. Cela fait beaucoup pour un seul filtre, ce qui fait que cette solution n'est pratiquement jamais adoptée.

La deuxième solution utilise un changement de fréquence qui translate l'émetteur à recevoir sur l'axe des fréquences pour l'amener à l'intérieur de la bande passante d'un filtre sélectif fixe appelé filtre de fréquence intermédiaire.

La structure devient alors la suivante :

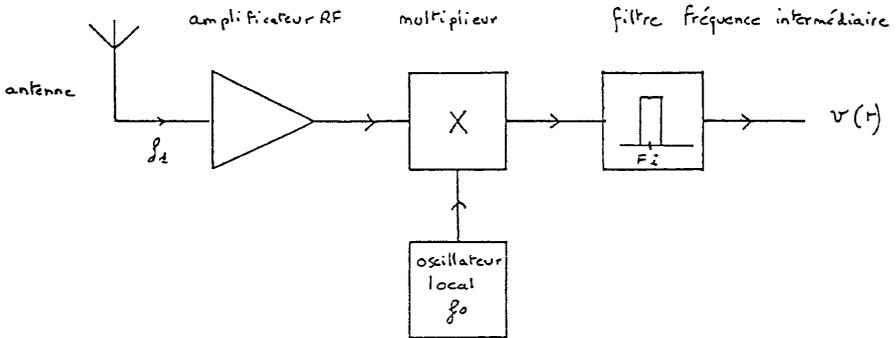


Figure 3 : Étape changeur de fréquence.

La multiplication d'un signal sinusoïdal de fréquence f_1 fixe ou variable par un signal sinusoïdal de fréquence f_0 conduit à un changement de fréquence.

En effet, à la sortie du multiplieur, nous avons :

$$v(t) = V \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_0 t) = 0.5 V \sin(\omega_1 - \omega_0) t + 0.5 V \sin(\omega_1 + \omega_0) t$$

On se sert de cette propriété pour translate le signal de l'émetteur de la fréquence f_1 à la fréquence $f_1 - f_0$.

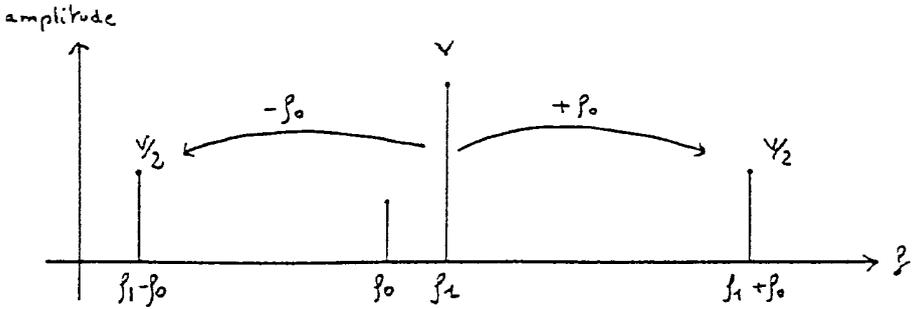


Figure 4 : Opération de multiplication.

Dans un récepteur, les signaux captés par l'antenne correspondant à tous les émetteurs sont soumis à ce traitement. Les porteuses de tous les émetteurs de la bande FM seront donc déplacées sur l'axe des fréquences vers le haut et vers le bas d'une valeur f_0 .

Sur la figure 5, nous voyons le spectre de $v(t)$ lorsque $f_0 = 85$ MHz. Nous retrouvons notre bande FM déplacée vers les basses fréquences et vers les hautes fréquences de 85 MHz.

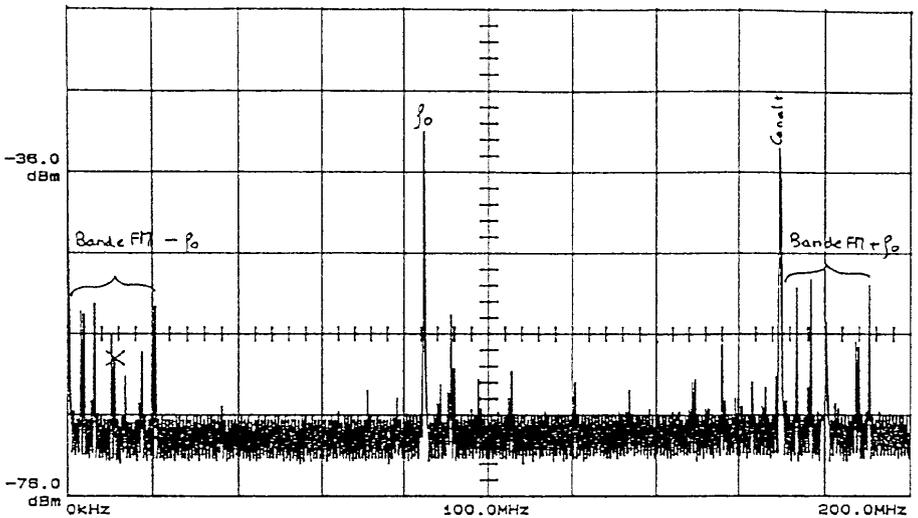


Figure 5 : Spectre du signal FM multiplié par $f_0 = 85$ MHz

L'émetteur de France-Inter, initialement à 95,7 MHz se trouve donc après multiplication à :

$$95,7 + 85 = 180,7 \text{ MHz} \quad \text{et} \quad 95,7 - 85 = 10,7 \text{ MHz}$$

Un filtre sélectif fixe de fréquence centrale $F_i = 10,7 \text{ MHz}$ (valeur standard en réception FM) et de largeur 300 kHz nous permettra donc de sélectionner l'émetteur de France-Inter et lui seul.

Pour changer de station, il suffira donc de changer la fréquence de l'oscillateur local f_0 . La quasi-totalité des récepteurs de radio et de télévision sélectionnent la station à recevoir selon ce principe.

La figure 6 nous montre le détail du spectre après multiplication entre 0 et 30 MHz où on retrouve notre émetteur France-Inter qui est maintenant à 10,7 MHz et traversera donc le filtre de fréquence intermédiaire :

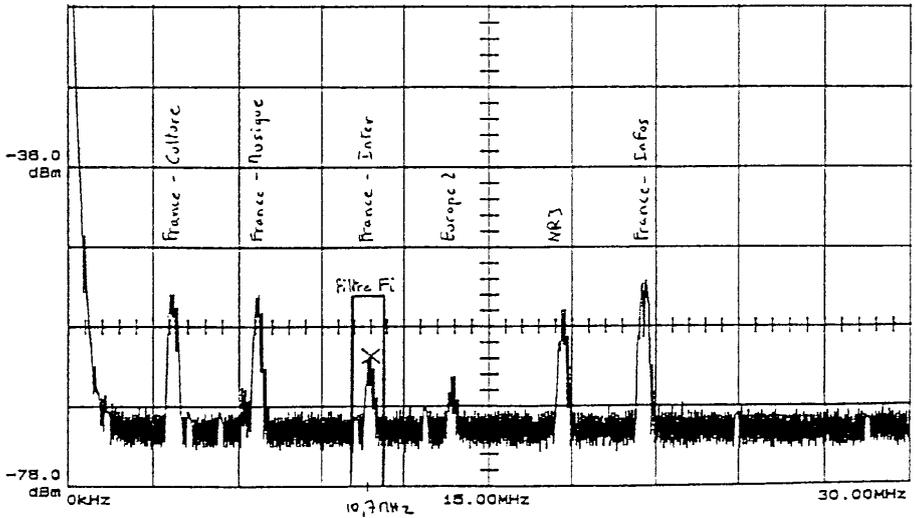


Figure 6 : Partie basse-fréquence après changement de fréquence.

Remarque : Cette structure simple et efficace a un tout petit défaut qu'il faut corriger.

En effet, pour une valeur f_0 de l'oscillateur local deux émetteurs vont être captés, ce qui n'est pas acceptable.

Prenons encore une fois l'exemple de France-Inter à 95,7 MHz. Pour capter cette station on réglera l'oscillateur local à $f_0 = 85$ MHz.

Un émetteur éventuel à la fréquence f_2 appelée fréquence image telle que :

$$f_2 = 85 - 10,7 = 74,3 \text{ MHz}$$

tombera aussi dans la bande passante du filtre Fi, car :

$$f_2 - f_0 = 74,3 - 85 = - 10,7 \text{ MHz}$$

Pour supprimer cet inconvénient et éviter la réception parasite de l'émetteur image, on accorde l'étage d'entrée sur la fréquence f_1 à recevoir.

L'élimination de l'émetteur indésirable n'est pas difficile puisque la fréquence image reste à une distance de $2f_i = 21,4$ MHz de la fréquence à recevoir.

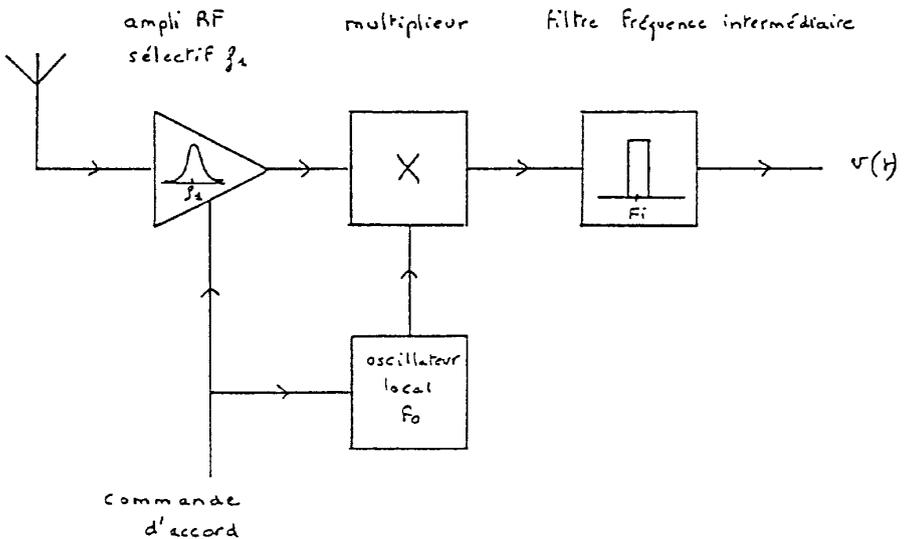


Figure 7 : Changeur de fréquence avec suppression de la fréquence image.

La commande d'accord fera donc varier l'accord de l'amplificateur radiofréquence sélectif entre :

$$f_{1\min} = 88 \text{ MHz} \quad \text{et} \quad f_{1\max} = 108 \text{ MHz}$$

et l'accord de l'oscillateur local entre :

$$f_{0\min} = f_{1\min} - 10,7 = 77,3 \text{ MHz}$$

et

$$f_{0\max} = f_{1\max} - 10,7 = 97,3 \text{ MHz}$$

4. RÉALISATION PRATIQUE DE L'ÉTAGE CHANGEUR DE FRÉQUENCE

Le circuit intégré utilisé dans ce montage réalise à la fois les fonctions d'amplificateur, d'oscillateur local et de multiplieur. On trouvera sa structure interne en annexe.

Le schéma est le suivant :

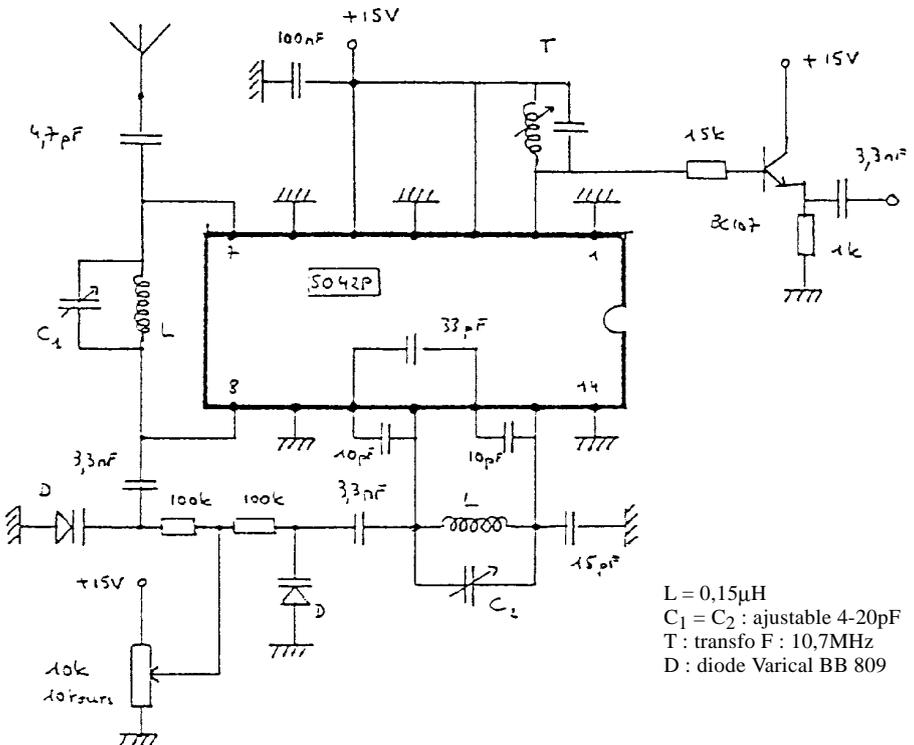


Figure 8 : Schéma de l'étage changeur de fréquence.

Le circuit accordé L, C_1 est calé sur la fréquence à recevoir f_1 . Son accord est variable grâce à la diode varicap D_1 commandée par la tension V_{accord} . Une diode de ce type est toujours polarisée en inverse et voit sa capacité de jonction varier en fonction de la tension inverse qui lui est appliquée. La diode varicap joue donc le même rôle qu'un condensateur variable.

Le circuit accordé L, C_2 fixe la fréquence d'accord f_0 de l'oscillateur local. Cet oscillateur est accordé par la diode D_2 , commandée par la même tension V_{accord} .

La fréquence centrale de ces deux circuits accordés est donc réglée par V_{accord} , le premier circuit L, C_1, D_1 étant accordé sur la fréquence à recevoir f_1 et le deuxième formé par L, C_2, D_2 accordé sur la fréquence f_0 de l'oscillateur local à 10,7 MHz en-dessous de f_1 .

Le transformateur F_i de sortie, dont on n'utilise que le primaire accordé sur 10,7 MHz, charge le transistor de sortie (patte 2).

Pour éviter un amortissement excessif de ce circuit accordé par la résistance d'entrée de l'étage suivant, le transistor monté en collecteur commun sert d'adaptateur d'impédance.

5. DÉMODULATION DE FRÉQUENCE

La situation est maintenant beaucoup plus simple. L'émetteur sélectionné grâce à l'oscillateur local se retrouve maintenant à $F_i = 10,7$ MHz.

Nous disposons donc d'un signal $v(t)$ de niveau variable suivant la puissance et l'éloignement de l'émetteur, modulé en fréquence autour de 10,7 MHz par le signal basse-fréquence $s(t)$.

L'information audiofréquence étant inscrite dans la fréquence instantanée, nous pouvons amplifier et écrêter le signal F_i , ce qui permettra de supprimer une grande partie des parasites qui se seront ajoutés au signal au cours de la transmission : c'est le rôle de l'amplificateur-limiteur.

Pour tous les émetteurs dont le niveau n'est pas trop faible, le signal $x(t)$ est maintenant propre et d'amplitude constante. Il peut être démodulé par un démodulateur de fréquence à quadrature dont le principe est donné figure 9.

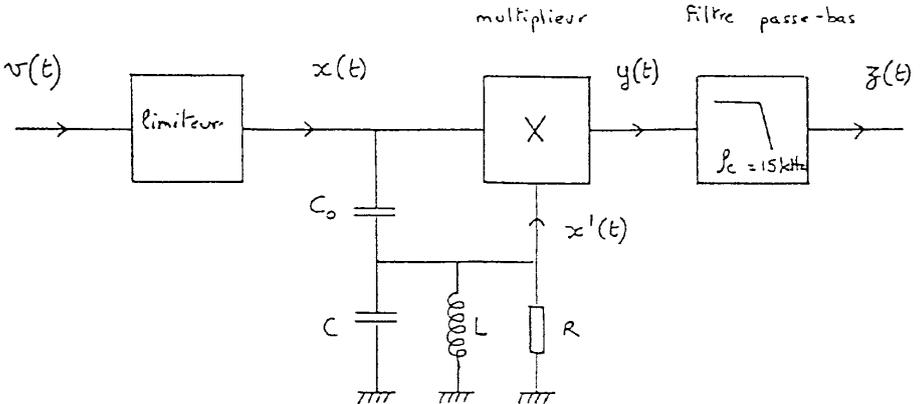


Figure 9 : Principe du démodulateur à quadrature.

Le signal de fréquence intermédiaire $x(t)$ sortant du limiteur est multiplié par le signal $x'(t)$ obtenu à partir de $x(t)$ à l'aide du filtre déphaseur R, L, C, C_0 .

Le signal $x(t)$ a une amplitude constante X et une fréquence $f(t)$ variant autour de F_i :

$$f(t) = F_i + k.s(t)$$

et s'écrit donc :

$$x(t) = X \cdot \sin(\Phi(t)) \quad \text{avec} \quad \omega(t) = \Phi'(t) = 2\pi f(t)$$

Le filtre déphaseur, accordé sur la fréquence F_i , a des courbes de gain et de phase suivantes (page suivante) :

Le filtre sélectif est suffisamment amorti pour travailler au voisinage du gain maximum lorsque la fréquence instantanée varie, ce qui revient à dire que son gain sera supposé constant et égal à T_0 , alors que le déphasage introduit vaudra :

$$\theta(t) = \pi/2 + r(f(t) - F_i) = \pi/2 + rks(t)$$

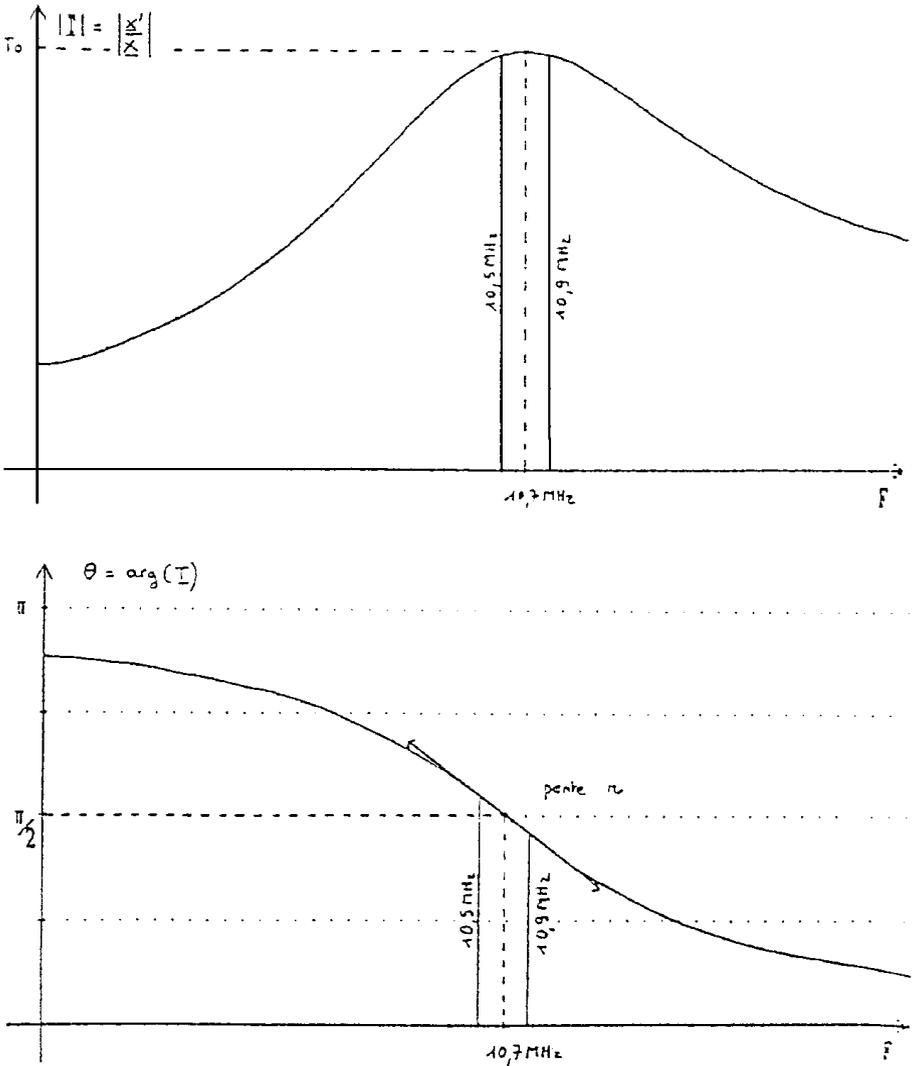


Figure 10 : Diagramme de Bode du filtre déphaseur.

Ce filtre introduit donc entre $x(t)$ et $x'(t)$ un déphasage proportionnel au signal basse-fréquence.

Le filtrage F_i assuré par le transformateur F_i en sortie de l'étage précédent est complété par un filtre céramique centré lui aussi sur 10,7 MHz.

Le condensateur C_o du démodulateur à quadrature est remplacé ici par les deux condensateurs de 4,7 pF pour conserver une structure symétrique par rapport à la masse.

Le filtre passe-bas de sortie est constitué par le condensateur de 2,2 nF en parallèle avec la résistance de 5 k/ohms interne au CI.

Les caractéristiques de cet étage peuvent être aisément vérifiées si on dispose d'un générateur montant jusqu'à 11 MHz au moins.

Voici le relevé des variations du gain du filtre céramique 10,7 MHz :

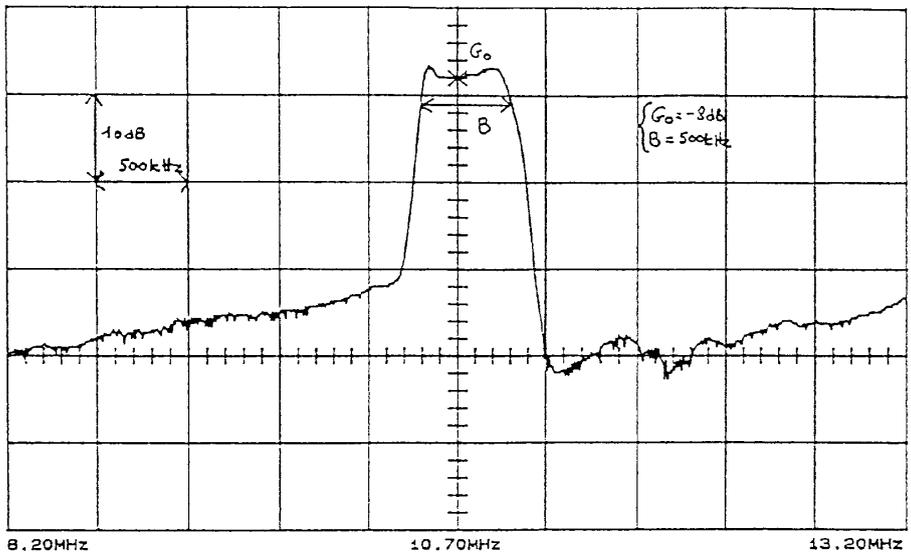


Figure 12 : Courbe de réponse du filtre céramique.

On peut remarquer que ce filtre introduit une légère atténuation dans la bande passante d'environ 8 dB et que sa bande passante à - 3 dB est de 500 kHz.

Une autre courbe très instructive est la représentation de la tension de sortie audiofréquence (patte 8) en fonction de la fréquence du signal d'entrée qu'on fait varier de 10 MHz à 11,5 MHz :

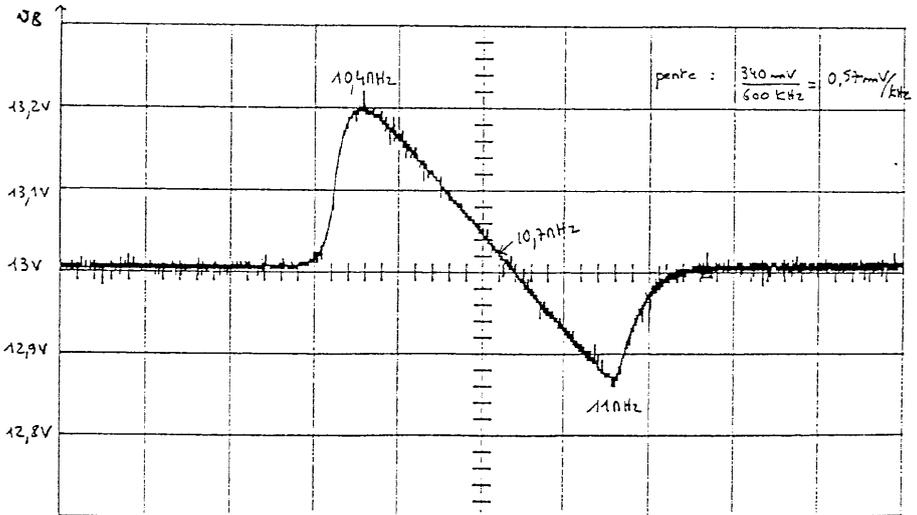


Figure 13 : Caractéristique du démodulateur.

On note une belle plage quasiment linéaire entre 10,4 MHz et 11 MHz, ce qui montre bien que le démodulateur FM n'est rien d'autre qu'un convertisseur fréquence-tension fonctionnant autour de $F_i = 10,7$ MHz sur une plage au moins égale à l'excursion totale en fréquence, soit 150 kHz.

On peut également mettre en évidence l'efficacité du limiteur en faisant varier le niveau F_i . Pour cela, on applique à l'entrée de l'étage un signal $x(t)$ modulé en fréquence dont on fait varier l'amplitude.

On constate que l'amplitude du signal audiofréquence démodulé ne change pas si le niveau F_i change, à condition que le signal d'entrée dépasse le seuil de limitation qui est ici de -40 dBm.

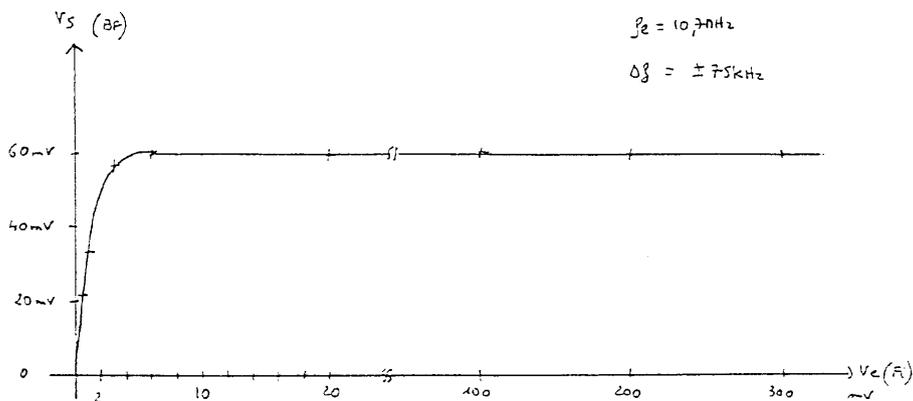


Figure 14 : Caractéristique de limitation.

Pour avoir un récepteur FM complet, il suffit de compléter les deux étages précédents par un amplificateur basse-fréquence précédé par un potentiomètre de réglage du volume (figure 15).

On pourra avec cette maquette didactique capter les stations les plus puissantes de la bande FM.

Évidemment, on peut améliorer les performances de ce montage en :

- rajoutant un amplificateur radiofréquence pour augmenter la sensibilité du récepteur,
- ----- Fi ----- ,
- remplaçant l'oscillateur local LC par un synthétiseur à quartz pour une meilleure stabilité,
- rajoutant un décodeur stéréophonique.

C'est sur ces points que se différencie notre maquette des réalisations commerciales actuellement disponibles. Mais nous avons tenu à mettre à la disposition de nos élèves une maquette fonctionnelle la plus simple possible.

Nous restons évidemment à la disposition des collègues pour tout renseignement sur ce montage au 89.42.67.88 poste 377 (Lycée Louis Armand). Pour le moment, je dispose d'un typon fait à la main qui fonctionne bien mais qui n'est pas d'une qualité professionnelle mais dont je peux envoyer une copie aux collègues intéressés.

La maquette peut aussi être fournie montée et réglée pour un montant de l'ordre de 1 500 F. par notre société-fille Techno-Assistance (Fax : 89.06.42.84) pour ceux qui n'ont pas le temps ou l'envie de «bidouiller».

BIBLIOGRAPHIE

On pourra se reporter utilement aux ouvrages suivants :

- D. BENSOUSSAN : «*Émetteurs et récepteurs*» - Collection Modules Teccard chez DUNOD.
- P. GUEULLE : «*Réalisez vos récepteurs en circuits intégrés*» - Éditions ETSF.

Annexe 1

Les analyseurs de spectre haute-fréquence

Pour observer les différents spectres relevés dans cet article, il faut disposer d'un analyseur de spectre haute-fréquence.

Nous avons la chance, au laboratoire d'électronique du Lycée Louis Armand, de posséder un analyseur Tektronix 2111 couvrant de 10 kHz à 1,8 GHz, mais qui a le seul défaut de valoir environ 70 000 F. en version de base.

D'autres marques comme Hewlett-Packard commercialisent des appareils du même genre dans une gamme de prix voisine.

Heureusement, on trouve actuellement sur le marché des appareils beaucoup moins coûteux, moins performants sans doute mais tout à fait suffisants pour une utilisation pédagogique.

Sans avoir la prétention d'être exhaustifs, nous pouvons citer les appareils suivants :

– **adaptateur d'analyseur de spectre TSA 250** vendu par : *RADIOSPARES* - rue Norman King - 60031 BEAUVAIS - Tél. : 44.10.15.15.

C'est un boîtier transformant un oscilloscope ordinaire en analyseur de spectre couvrant la gamme de 400 kHz à 250 MHz pour un prix de 3 612 F. T.T.C. ;

– **analyseur de spectre HAMEG HM 5005** commercialisé en particulier par : *HFTS* - 25, rue Carnot - 94370 SUCY-EN-BRIE - Tél. : 45.90.40.48.

Il couvre la gamme de 100 kHz à 500 MHz pour un prix de 8 321 F. T.T.C. ;

– **analyseur de spectre PROMAX AE 476** vendu par : *MANUDAX* - 60, rue de Wattignies - 75580 PARIS Cedex 12 - Tél. : 43.42.20.50.

Il couvre de 1 à 1000 MHz pour un prix de l'ordre de 30 150 F. T.T.C.

Annexe 2

Documentation technique du SO42P

GÉNÉRALITÉS

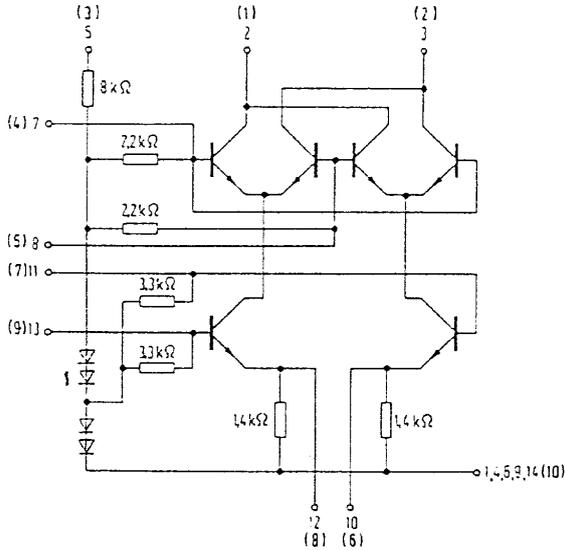
Le SO42P est un modulateur en anneau d'application universelle pour tous usages jusqu'à 200 MHz. Il peut ou non faire appel à son oscillateur incorporé. Le signal de sortie est débarrassé des signaux d'entrée. Parallèlement à ses utilisations de base en mélangeur, convertisseur de fréquence et démodulateur dans les récepteurs FM/AM, le SO42P peut être utilisé en tant qu'inverseur de polarité, multiplicateur, etc.

Il se caractérise par les points suivants :

- large gamme de tensions d'alimentation,
- nombreuses applications,
- peu de composants externes,
- gain de conversion élevé,
- faible bruit.

Présenté en boîtier plastique à quatorze broches, le SO42P est complété par le SO42E livré en boîtier métallique rond.

SCHÉMA INTERNE ET BROCHAGE

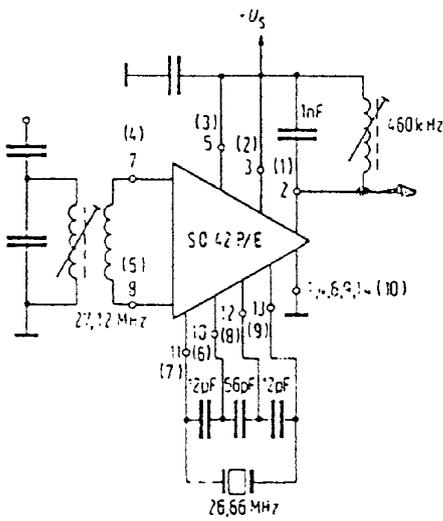


Les indications entre parenthèses se rapportent au SO42E.

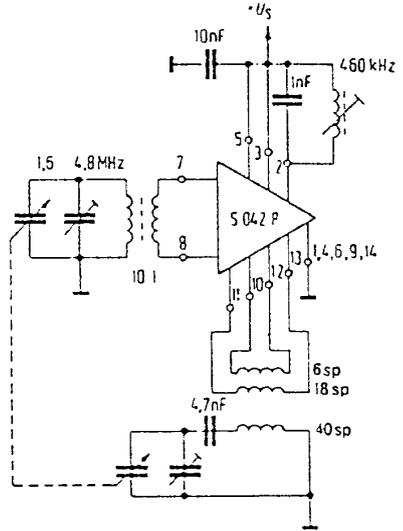
VALEURS LIMITES ABSOLUES

Tension d'alimentation	V_{cc}	15	V
Température de fonctionnement	T_{amb}	- 15 à + 70	°C
Température de stockage	T_s	- 40 à + 125	°C
Résistance thermique SO42P	R_{thSA}	110	K/W
Résistance thermique SO42E	R_{thSA}	190	K/W
Domaine de fonctionnement	V_{cc}	4 à 15	V

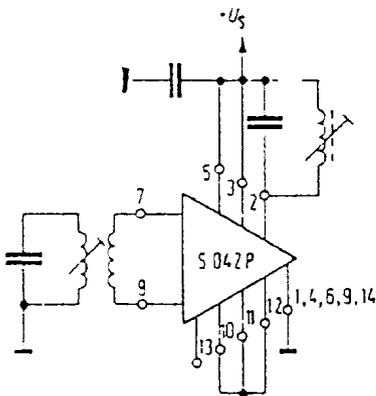
SCHÉMAS D'APPLICATION



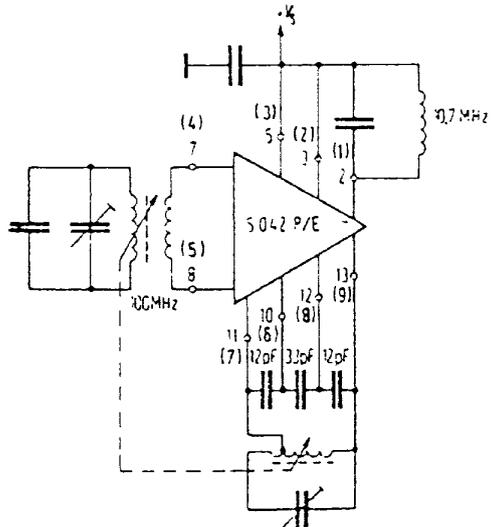
Oscillateur-mélangeur à quartz pour radiocommande 27 MHz.



Oscillateur-mélangeur à accord par CV pour réception des ondes courtes.



Amplificateur-limiteur 50 MHz.



Oscillateur-mélangeur pour réception FM.

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES $(V_{cc} = 12 \text{ V} ; T_{amb} = 25^\circ\text{C})$

		Min.	Typ.	Max.	Unité
Consommation totale	$I_{cc} = I_2 + I_3 + I_5$	1,4	2,15	2,9	mA
Courant de sortie	$I_2 = I_3$	0,36	0,52	0,68	mA
Courant de sortie différentiel	$I_3 - I_2$	- 60		+ 60	mA
Courant de polarisation	I_5	0,7	1,1	1,6	mA
Gain en puissance ($f_g = 100 \text{ MHz}$, $f_{osc} = 110,7 \text{ MHz}$)	G_p	14	16,5		dB
Tension de claquage ($I_{2,3} = 10 \text{ mA}$, $V_{7,8} = 0 \text{ V}$)	V_2, V_3	25			V
Capacité de sortie	C_{2-M}, C_{3-M}		6		pF
Gain de conversion	$S = \frac{I_2}{V_1 - V_8} = \frac{I_3}{V_7 - V_8}$		5		mS
Facteur de bruit	F		7		dB

Annexe 3

Documentation technique du SO41P

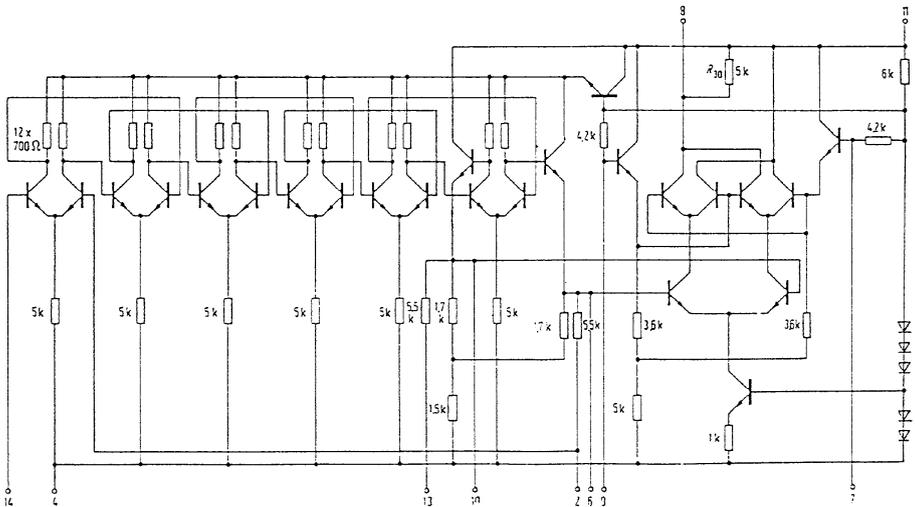
GÉNÉRALITÉS

Le SO41P est un amplificateur symétrique à six étages associé à un démodulateur à coïncidence symétrique, prévu pour l'amplification, la limitation et la démodulation de signaux modulés en fréquence. Le SO41P est particulièrement adapté aux cas où un très faible consommation est de rigueur, ou bien lorsque d'importantes fluctuations de la tension d'alimentation sont à craindre.

Ce circuit intégré convient aussi bien aux applications en bande étroite (FI de 455 kHz) qu'en large bande (FI de 10,7 MHz).

Présenté en boîtier plastique à quatorze broches, le SO41P est complété par le SO41E livré en boîtier métallique rond.

SCHÉMA INTERNE ET BROCHAGE



VALEURS LIMITES ABSOLUES

Tension d'alimentation	V_{cc}	15	V
Température de fonctionnement	T_{amb}	- 25 à + 85	°C
Température de stockage	T_s	- 40 à + 125	°C
Domaine de fonctionnement	V_{cc}	4 à 5	V
	f	0 à 35	MHz

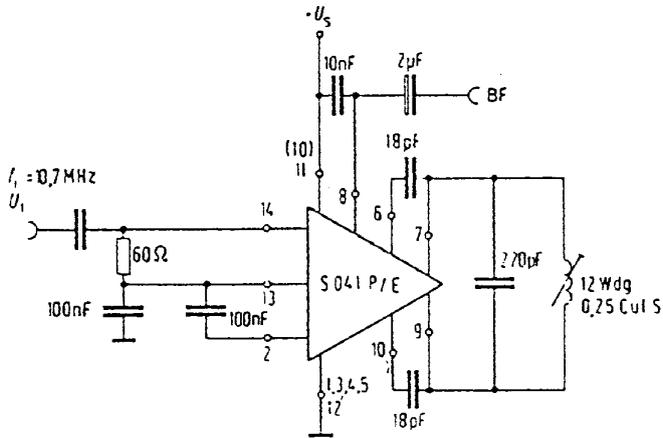
SCHÉMAS D'APPLICATION

Schéma simplifié - Les numéros de broches entre parenthèses se rapportent au SO41E.

