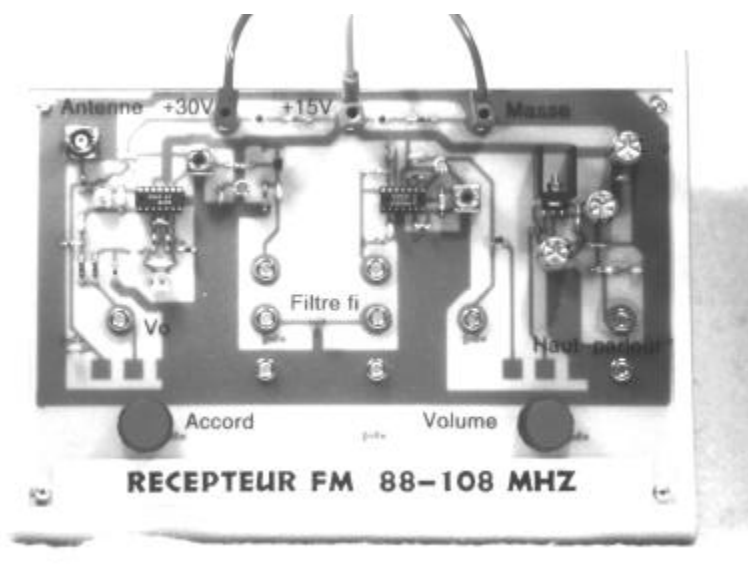


RECEPTEUR EN MODULATION DE FREQUENCE



Jean-Philippe MULLER

TECHNO-ASSISTANCE 1, rue du Capitaine PILLEUX 68720 ZILLISHEIM France

Tel : 06 08 92 21 01 Fax : 03 89 06 42 84
Site Internet : <http://pro.wanadoo.fr/jean-philippe.muller/>

Sommaire**page**

I) Présentation	3
II) Le spectre de la bande FM	3
III) Principe de la sélection d'un émetteur	5
IV) Le problème de la fréquence image	7
V) Réalisation pratique de l'étage changeur de fréquence	8
VI) Démodulation de fréquence	8
VII) Réalisation pratique du démodulateur	10
 Annexes :	
1 - schéma du récepteur FM	13
2 - typon du récepteur	14
3 - plan d'implantation	15
4 - documentation technique du SO42P	16
5 - documentation technique du SO41P	18

I) Présentation

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 Electronique.

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

II) Le spectre de la bande FM

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 .

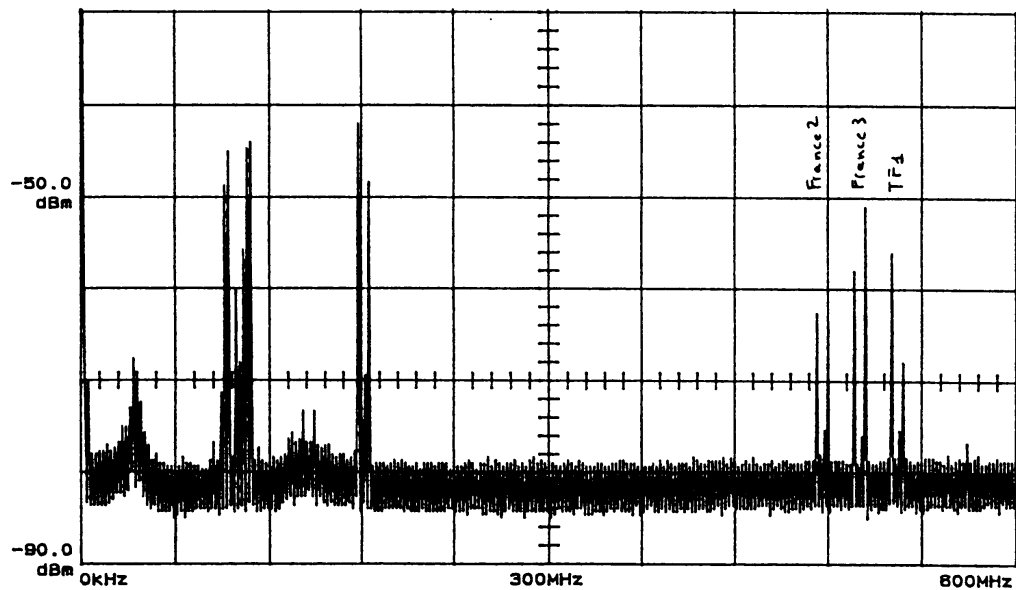


Figure 1 : spectre de la bande 0-600 MHz

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

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

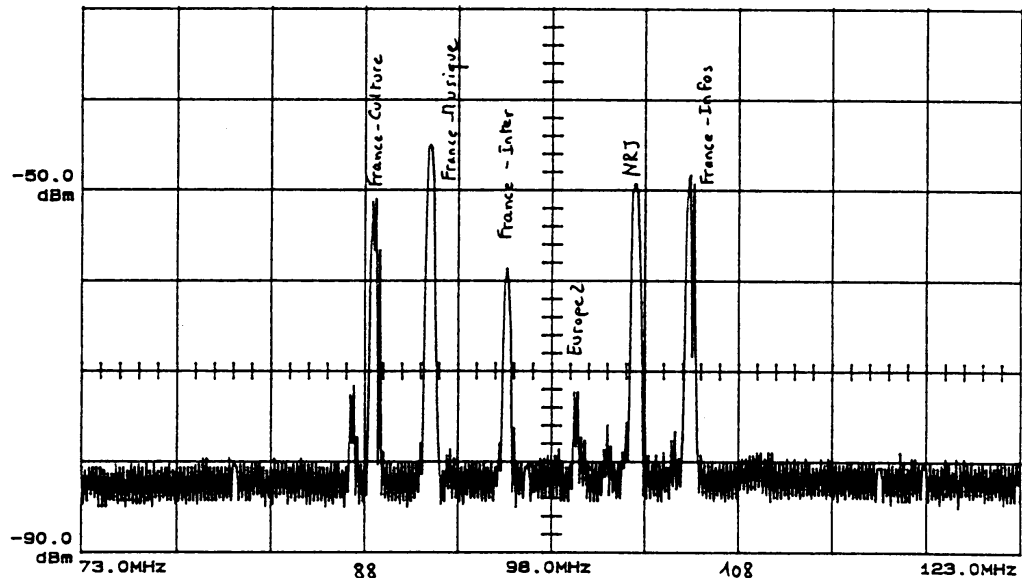


Figure 2 : spectre de la bande FM

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 a 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 :

$$\begin{aligned} V \text{ en dBm} &= 10 \cdot \log \left(\frac{\text{puissance}}{50 \text{ ohms} / 1 \text{ milliwatt}} \right) \\ &= 10 \cdot \log \left(\frac{V^2}{50 \cdot 10^{-3}} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{V^2}{0,05} \right) = 20 \log(V) + 13 \end{aligned}$$

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 :

$$f(t) = f_1 + k \cdot s(t) \quad \text{où } s(t) \text{ est le signal basse-fréquence}$$

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

III) Principe de la sélection d'un émetteur

Pour capter un émetteur donné , deux solutions existent :

- déplacer le filtre pour capter l'émetteur qu'on veut
- faire venir l'émetteur qui nous intéresse dans le filtre 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 dans la pratique .

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 :

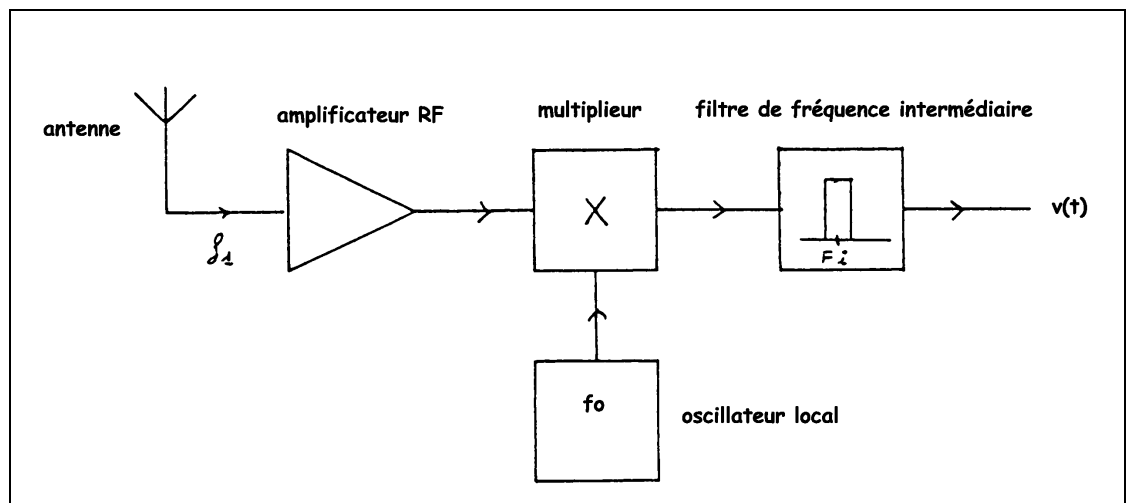


Figure 3 : étage changeur de fréquence

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 :

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

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

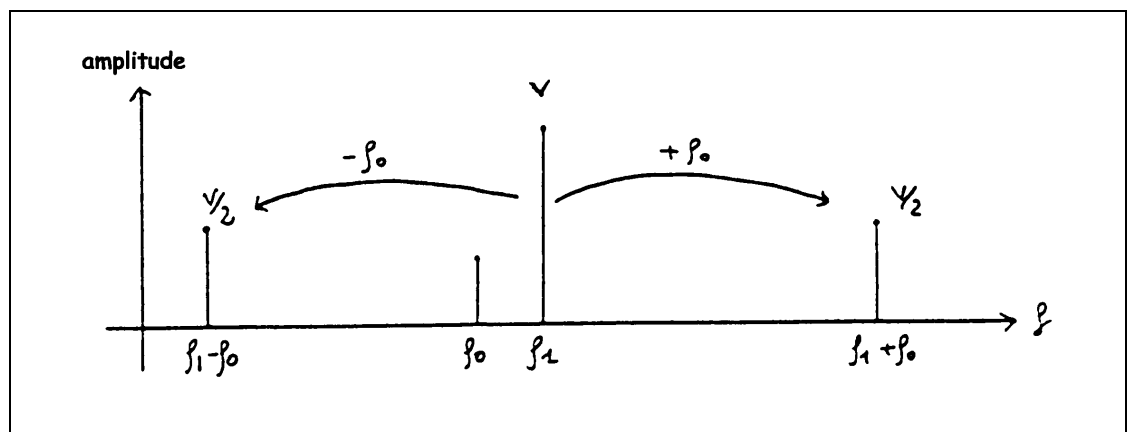


Figure 4 : opération de multiplication

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.

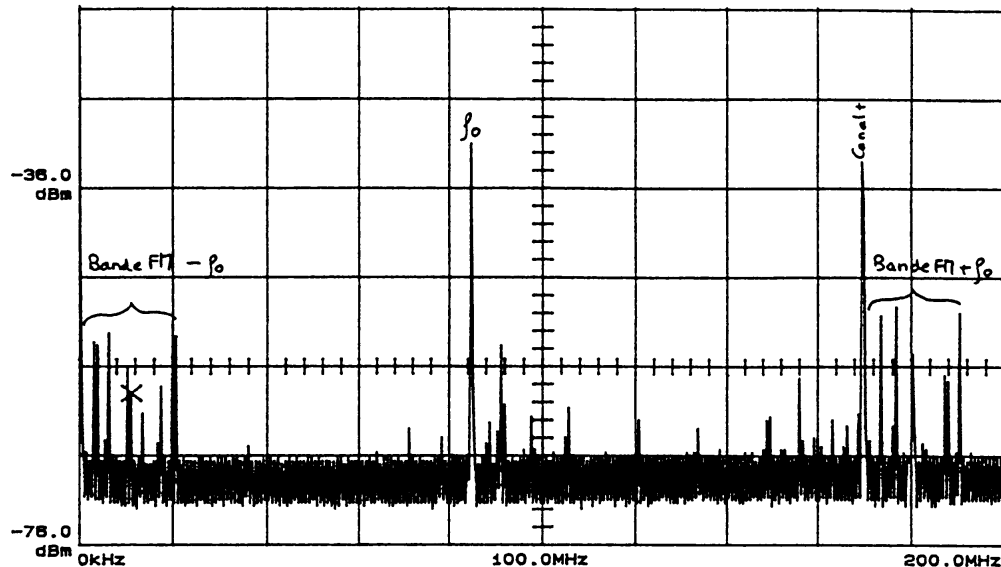


Figure 5 : spectre du signal FM multiplié par $f_0 = 85$ MHz

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 $F_i = 10,7$ 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 :

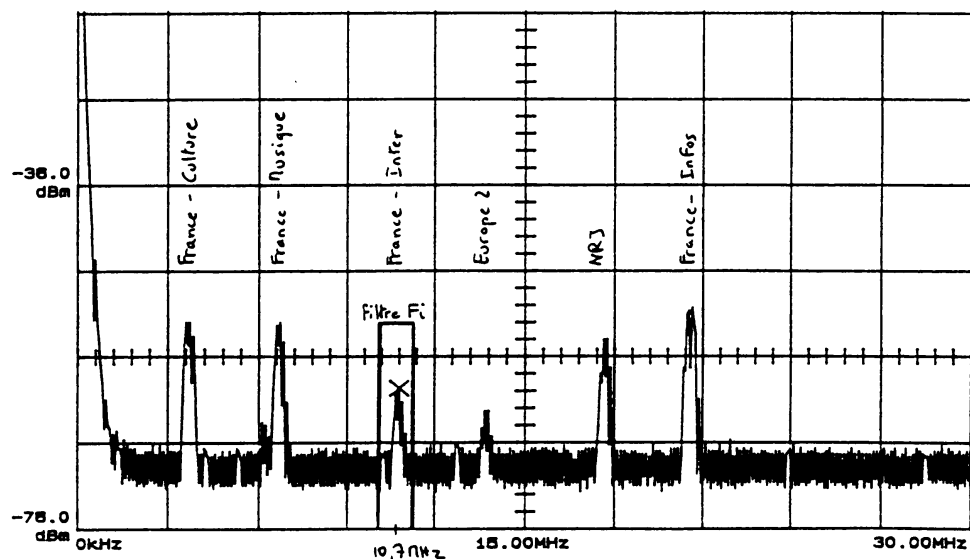


Figure 6 : partie basse-fréquence après changement de fréquence

IV) Le problème de la fréquence image

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 tel que :

$$f_2 = 85 - 10,7 = 74,3 \text{ MHz tombera aussi dans la bande passante du filtre } F_i , \text{ car}$$

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

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 .

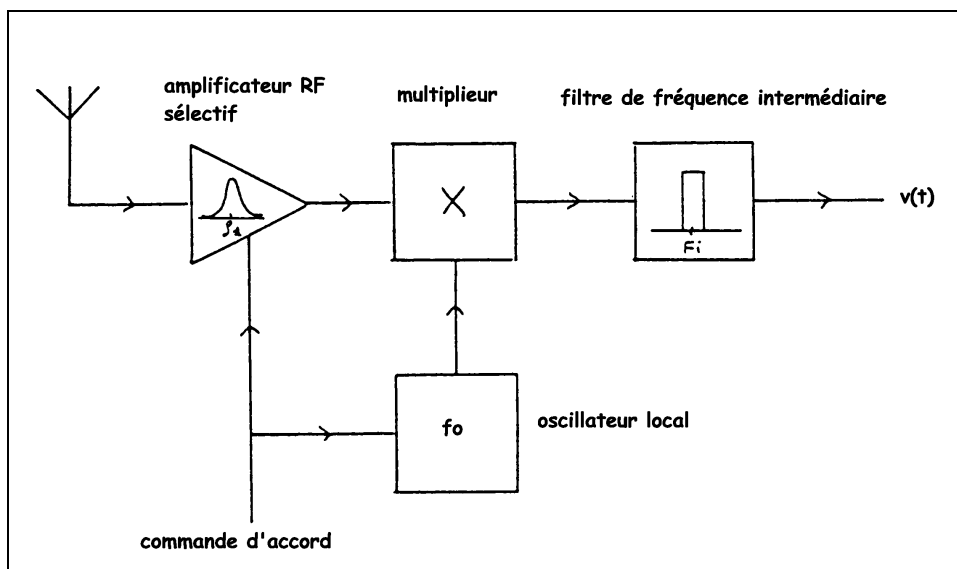


Figure 7 : changeur de fréquence avec suppression de la fréquence image

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 :

$$f_{0\min} = f_{1\min} - 10,7 = 77,3 \text{ MHz} \quad \text{et} \quad f_{0\max} = f_{1\max} - 10,7 = 97,3 \text{ MHz}$$

V) 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 :

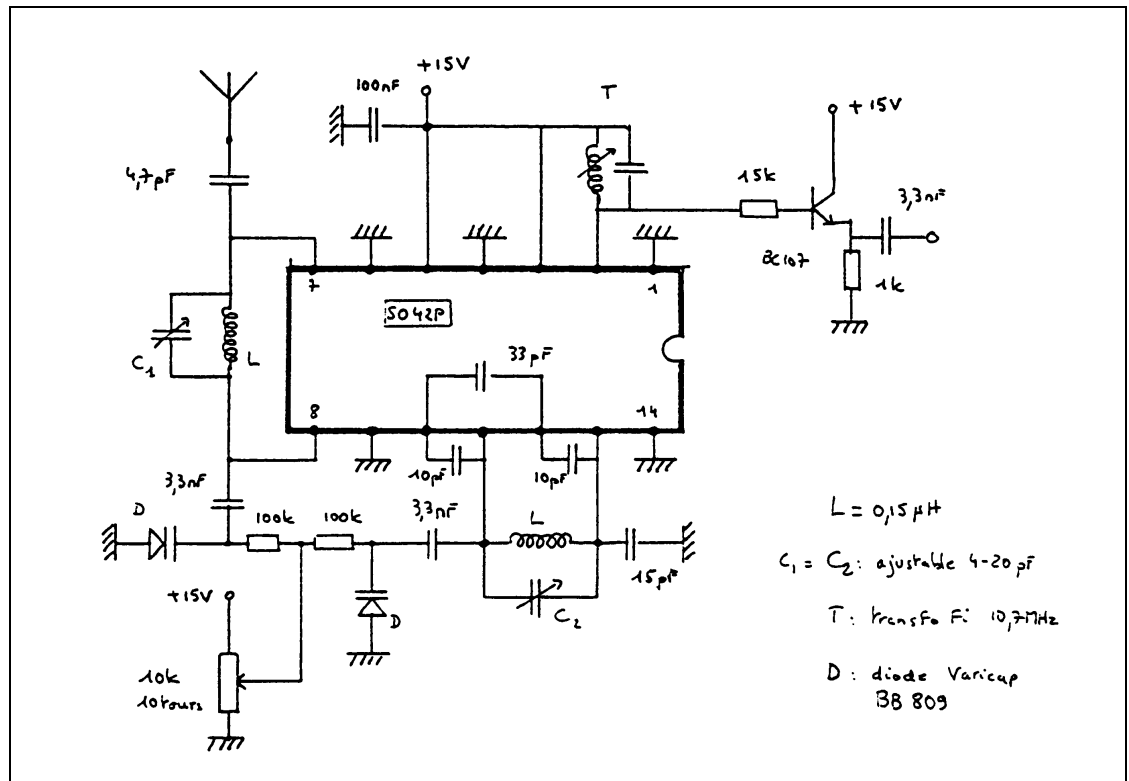


Figure 8 : schéma de l'étage changeur de fréquence

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.

VI) La 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 :

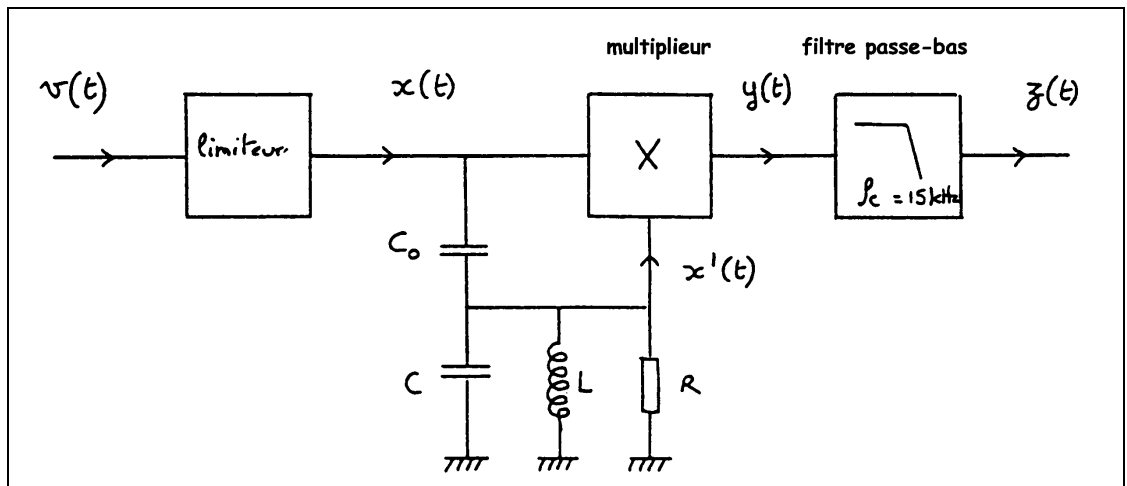


Figure 9 : principe du démodulateur à quadrature

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 :

$$f(t) = F_i + k \cdot s(t) \quad \text{et s'écrit donc :}$$

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

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

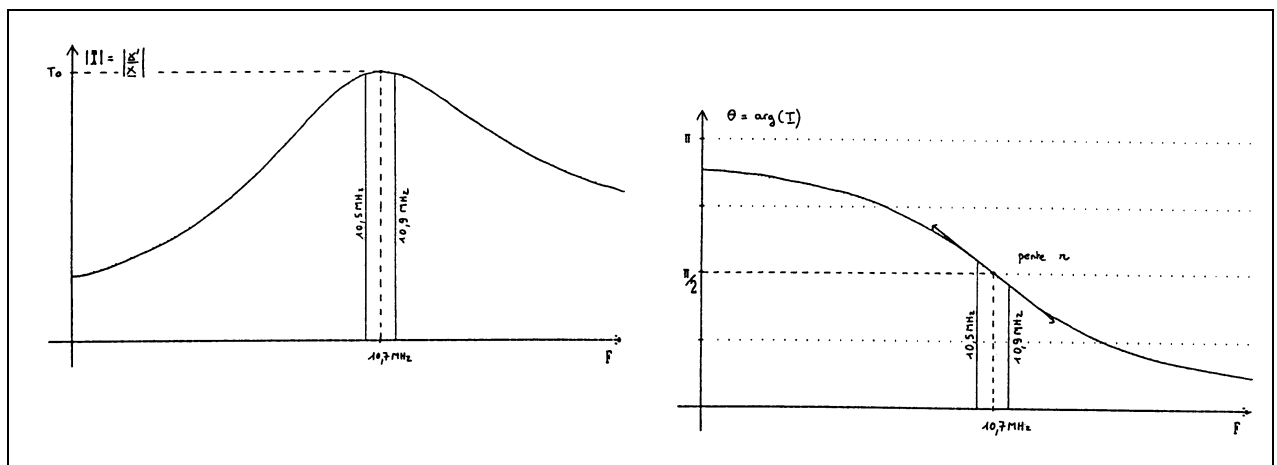


Figure 10 : Diagramme de Bode du filtre déphaseur

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 :

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

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

Le signal en sortie du filtre s'écrit donc :

$$x'(t) = T_o.X.\sin(\Phi(t) + \pi/2 + rks(t))$$

On peut donc aisément calculer $y(t)$ en sortie du multiplieur et $z(t)$ après filtrage passe-bas :

$$y(t) = x(t).x'(t) = X^2.T_o/2.(\cos(\pi/2 + rks(t)) + \cos(2\Phi(t) + \pi/2 + rks(t)))$$

Le deuxième terme a une fréquence instantanée qui varie autour de $2F_i$ et est donc éliminé par le filtre passe-bas qui ne laisse passer que la basse-fréquence (limitée à 15 kHz en radiodiffusion FM). Nous en déduisons l'expression du signal en sortie du démodulateur :

$$z(t) = X^2.T_o/2.\cos(\pi/2 + rks(t)) = - X^2.T_o/2. \sin(rks(t))$$

et , puisque l'angle $rks(t)$ est très petit :

$$z(t) = - X^2.T_o/2. rks(t) = A.s(t) \text{ signal basse-fréquence}$$

VI) La réalisation pratique du démodulateur

Les fonctions d'amplificateur-limiteur et démodulateur à quadrature sont réalisées par le circuit SO41P (voir fiche technique en annexe) selon le schéma très simple suivant :

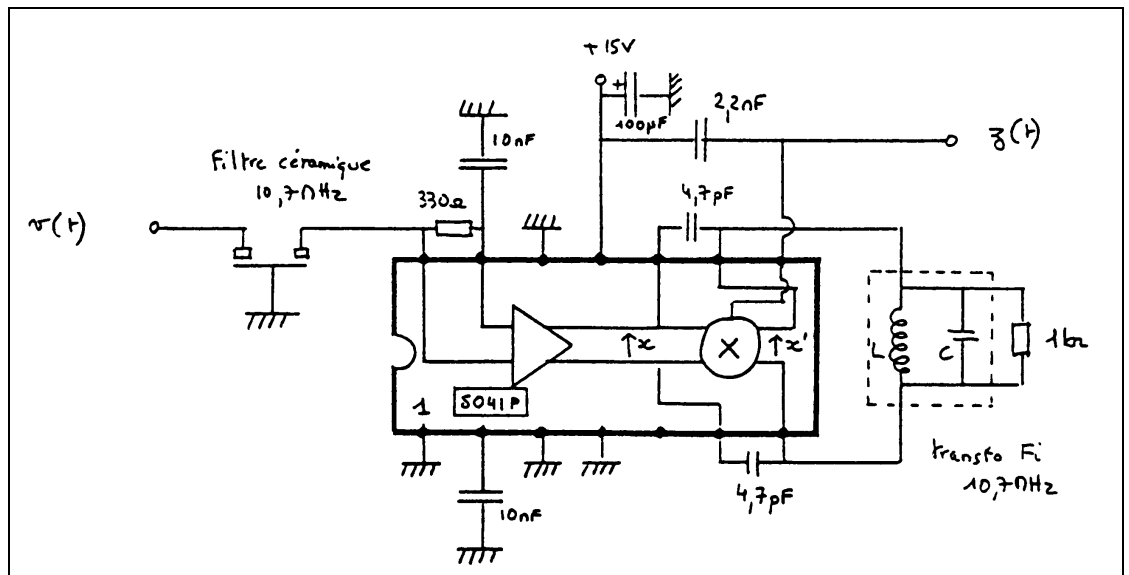


Figure 11 : schéma de l'étage limiteur-démodulateur FM

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 2 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 kohms 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 :

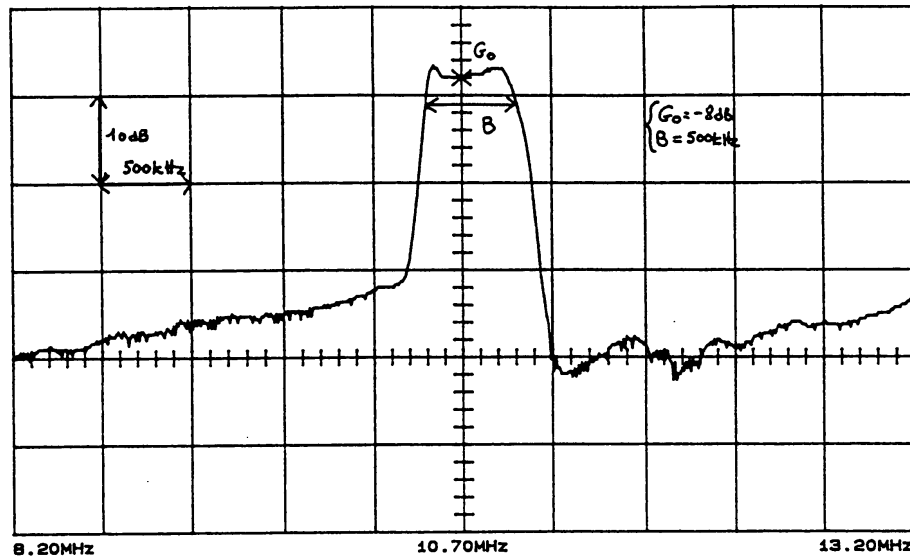


Figure 12 : courbe de réponse du filtre céramique

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

Un 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 :

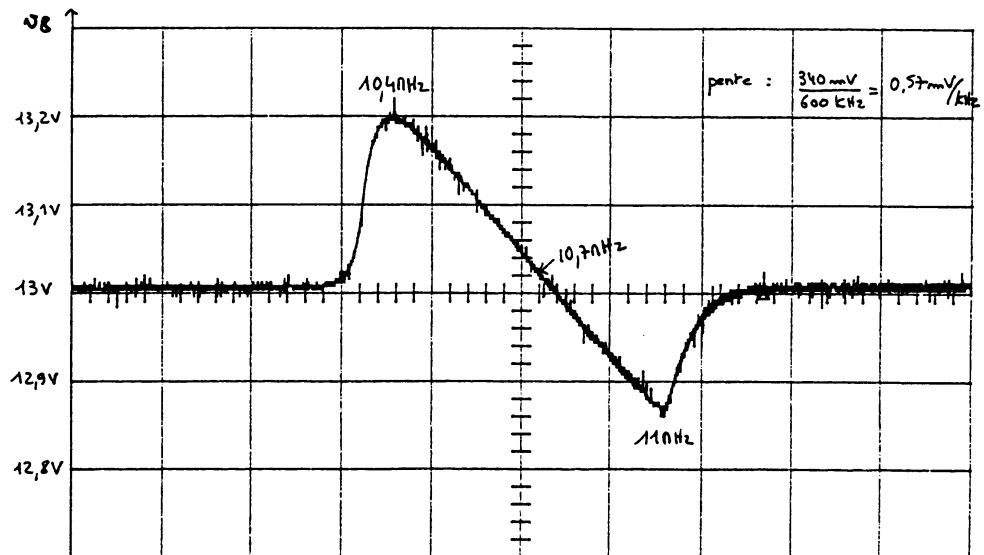


Figure 13 : caractéristique du démodulateur

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.

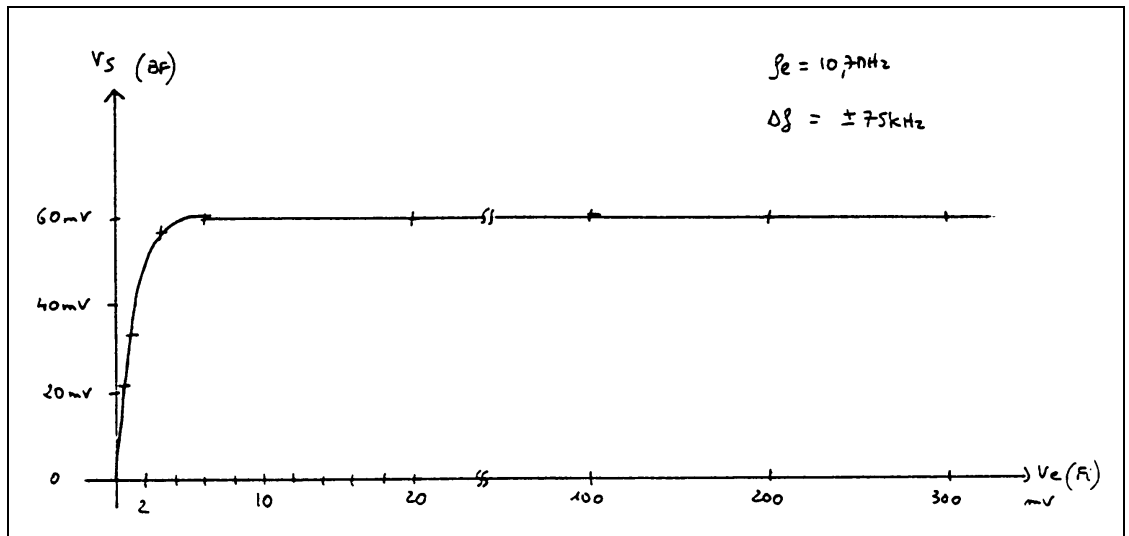


Figure 14 : caractéristique de limitation

Pour avoir un récepteur FM complet, il suffit de compléter les 2 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.

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

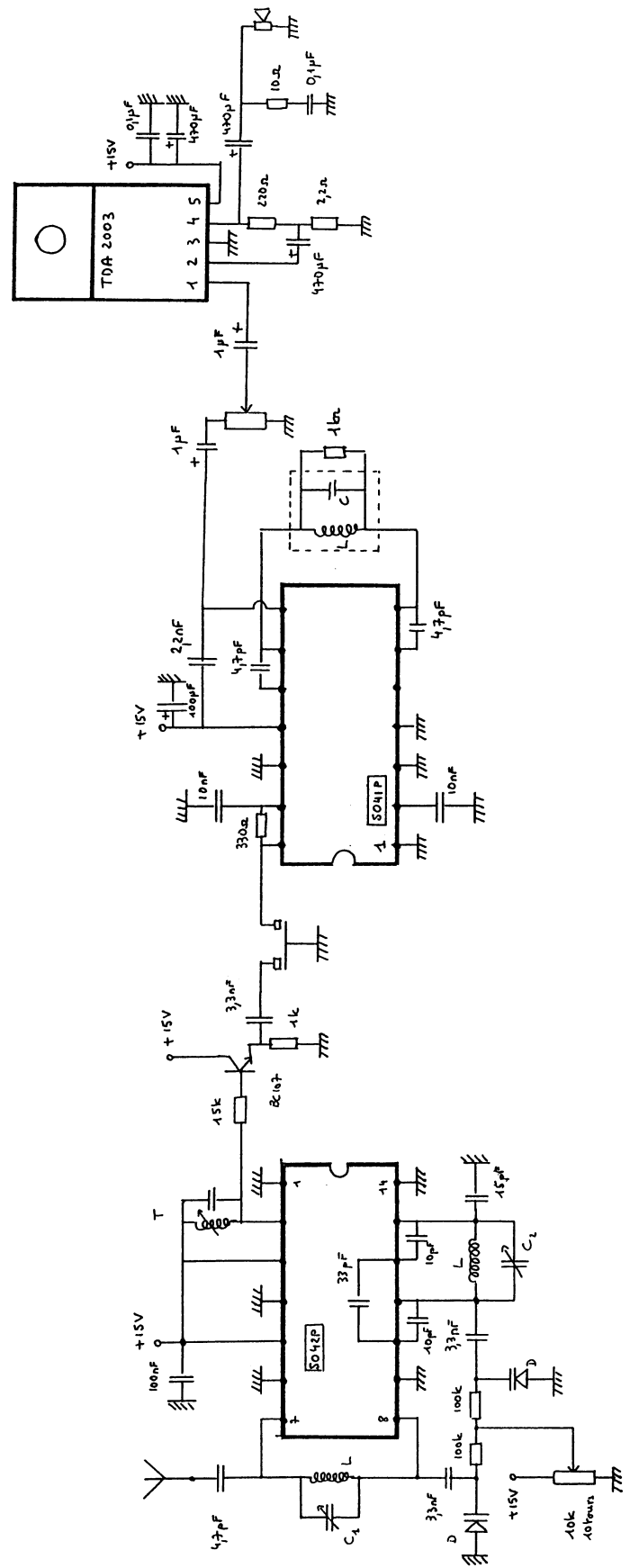
- rajoutant un amplificateur radiofréquence pour augmenter la sensibilité du récepteur
- ----- F_i -----
- remplaçant l'oscillateur local LC par un synthétiseur à quartz pour une meilleure stabilité
- rajoutant un décodeur stéréophonique

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.

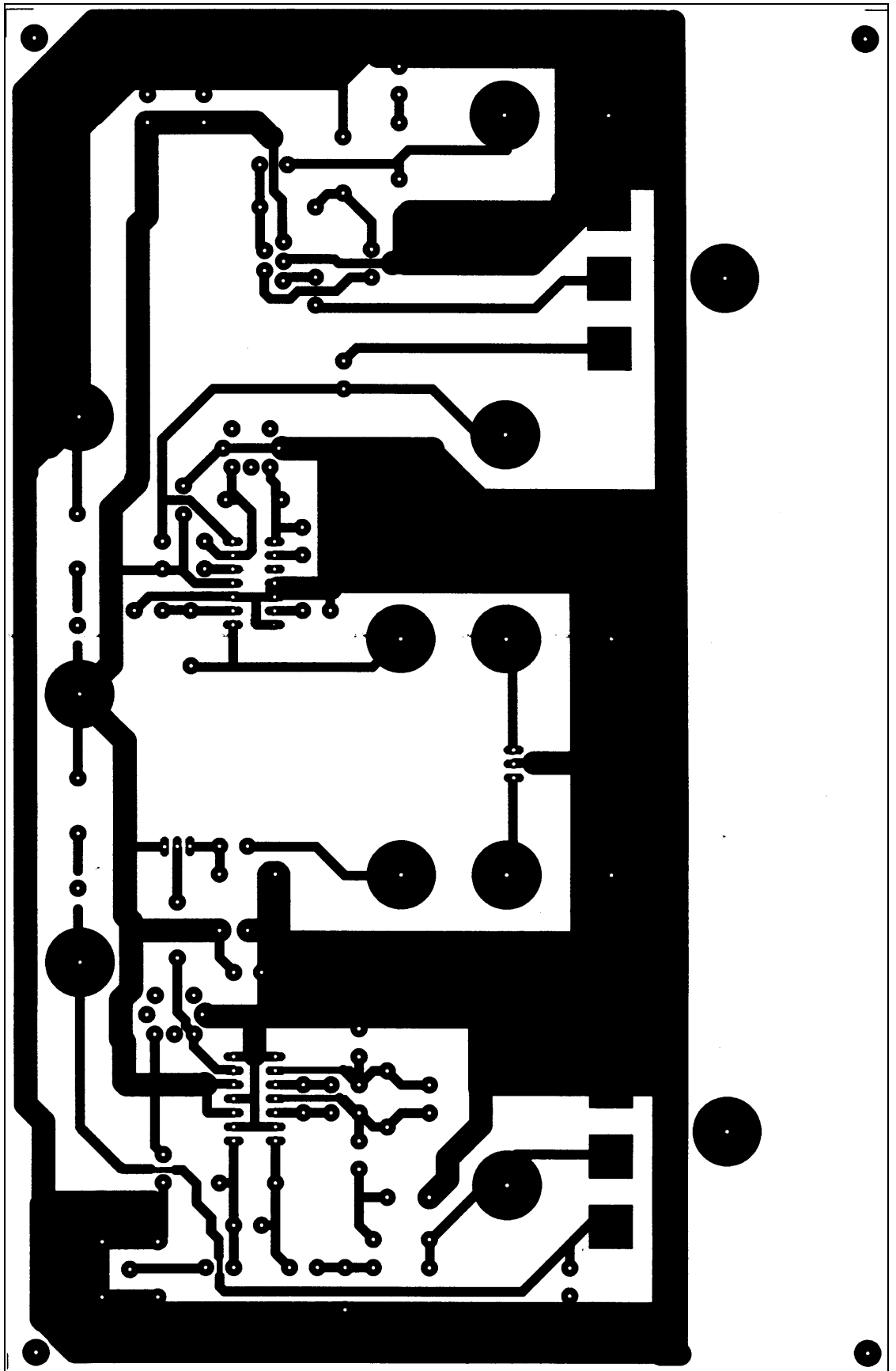
Bibliographie : on pourra se reporter utilement aux ouvrages suivants

- **Emetteurs et récepteurs** par D. BENSOUSSAN
collection Modules Teccard chez DUNOD
- **Réalisez vos récepteurs en circuits intégrés** par P. GUEULLE
aux éditions ETSF

Annexe 1 : schéma du récepteur FM



Annexe 2 : typon du récepteur FM



Annexe 4 : documentation du SO42P

Généralités

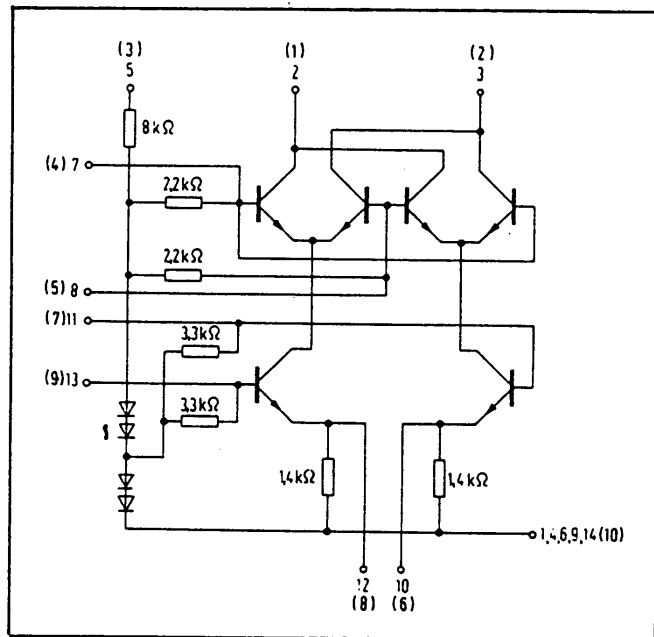
Le SO 42 P est un modulateur en anneau d'application universelle pour tous usages jusqu'à 200 MHz. Il peut ou non faire appel à son oscillateur incorporé. Le signal de sortie est débarrassé des signaux d'entrée. Parallèlement à ses utilisations de base en mélangeur, convertisseur de fréquence et démodulateur dans les récepteurs FM/AM, le SO 42 P 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 14 broches, le SO42 P est complété par le SO42 E livré en boîtier métallique rond.

Schéma interne et brochage



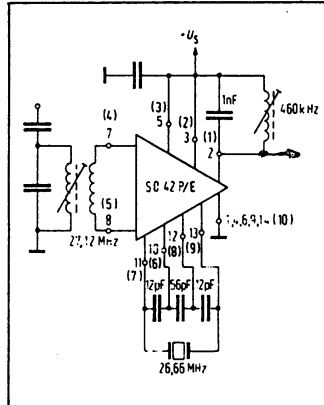
Les indications entre parenthèses se rapportent au SO 42 E.

Valeurs limites absolues

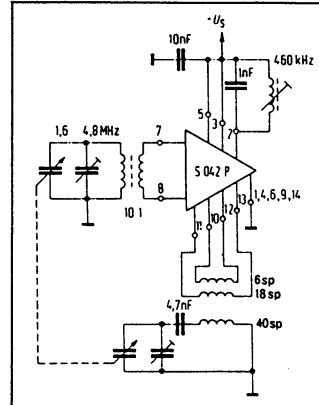
Tension d'alimentation	V_{cc}	15	V
Température de fonctionnement	T_{amb}	- 15 à + 70	°C
Température de stockage	T_s	- 40 à + 125	°C
Résistance thermique SO 42 P	R_{thSA}	110	K/W
SO 42 E	R_{thSA}	190	K/W
Domaine de fonctionnement	V_{cc}	4 à 15	V

Annexe 4 (suite)

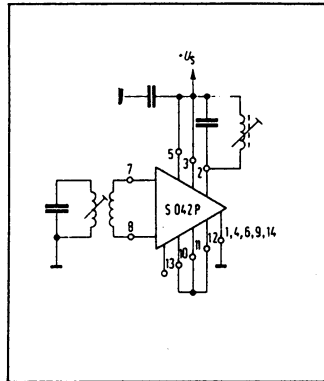
Schémas d'application



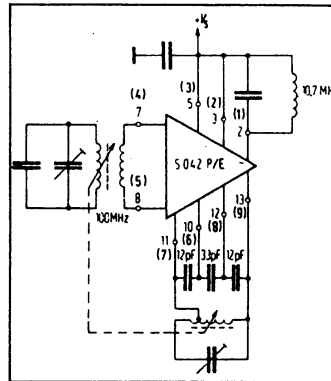
Oscillateur-mélangeur à quartz pour radiocommande 27 MHz.



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



Amplificateur-limiteur 50 MHz.



Oscillateur-mélangeur pour réception FM.

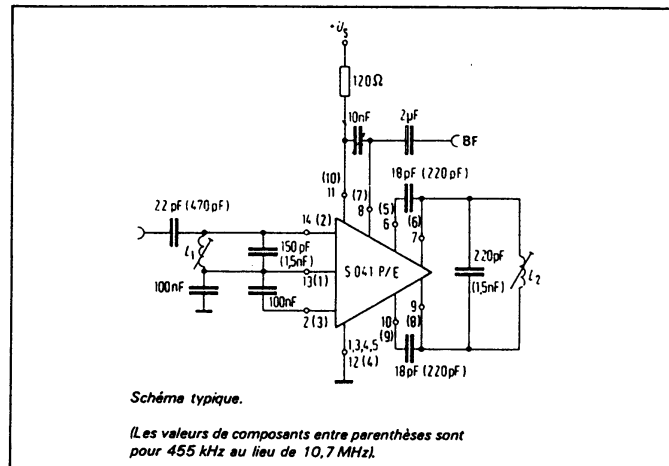
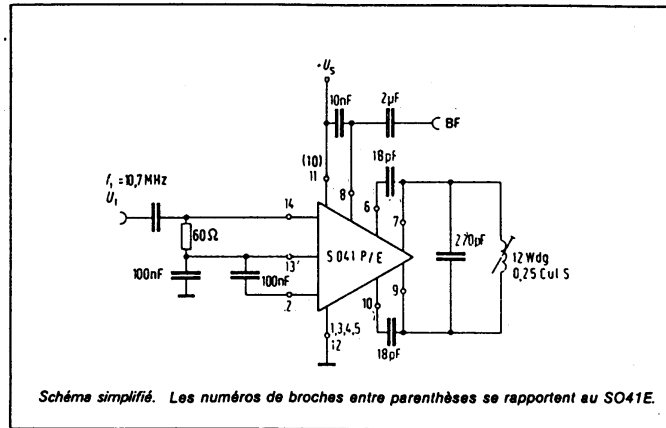
Caractéristiques générales

(V_{cc} = 12 V Tamb = 25 °C)

		Min.	Typ.	Max.	Unité
Consommation totale	$I_{cc} = I_2 + I_3 + I_6$	1.4	2.15	2.9	mA
Courant de sortie	$I_2 = I_3$.36	.52	.68	mA
Courant de sortie différentiel	$I_3 - I_2$	- 60		+ 60	mA
Courant de polarisation	I_5	.7	1.1	1.6	mA
Gain en puissance ($f_g = 100$ MHz, $f_{osc} = 110.7$ MHz)	G_p	14	16.5		dB
Tension de claquage ($I_{2,3} = 10$ mA, $V_{7,8} = 0$ 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 5 (suite)

Schémas d'application



Caractéristiques générales

		Min.	Typ.	Max.	Unité
Courant d'alimentation	I_s	4,0	5,4	6,8	mA
Tension de sortie BF (10,7 MHz $\Delta f = \pm 50$ kHz 10 mV)	$U_{q \text{ eff}}$	100	170		mV
Distorsion harmonique	k		0,55	1,0	%
Variation du niveau de sortie (alim. 15 V — 4 V)	ΔU_q		1,5		dB
Seuil de limitation à l'entrée	$U_{I \text{ Bogr}}$		30	60	μ V
Gain en tension à 10,7 MHz	V_U		68		dB
Seuil de limitation à la sortie	V_{qss}		130		mV
Impédance d'entrée 10,7 MHz	Z_i		20/2		$k\Omega / \text{pF}$
455 kHz	Z_i		50/4		$k\Omega / \text{pF}$
Impédance de sortie (broche 8)	R_q	3,5	5	8,5	$k\Omega$
Chute de tension dans R_{30}	U_{11-8}		1,5		V
Réjection AM ($m = 30$ % $\Delta f = \pm 50$ kHz 10 mV)	a_{AM}		60		dB