

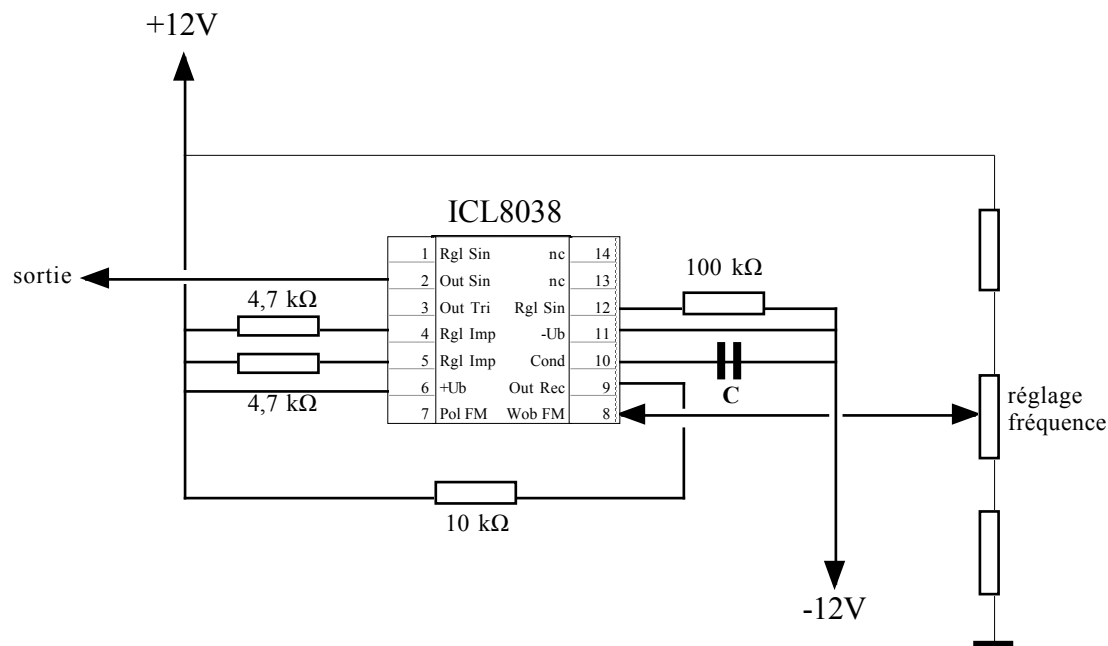
MODULATION ET DÉMODULATION DE FRÉQUENCE

Objectifs

Réaliser une modulation de fréquence
 Analyser le spectre d'un signal modulé FM
 Démoduler un signal modulé FM

1 Réaliser une modulation de fréquence

Nous utiliserons le circuit ICL8038 qui est un VCO (Voltage Controlled Oscillator) universel pour réaliser la modulation. D'autres circuits tels que le XR2206 peuvent également être utilisés.



Caractéristique du VCO

Le condensateur C permet de choisir la plage de fréquence de l'oscillateur. Un condensateur $C = 2,2\text{nF}$ permettra d'obtenir une plage de variation d'environ 1 à 12 kHz

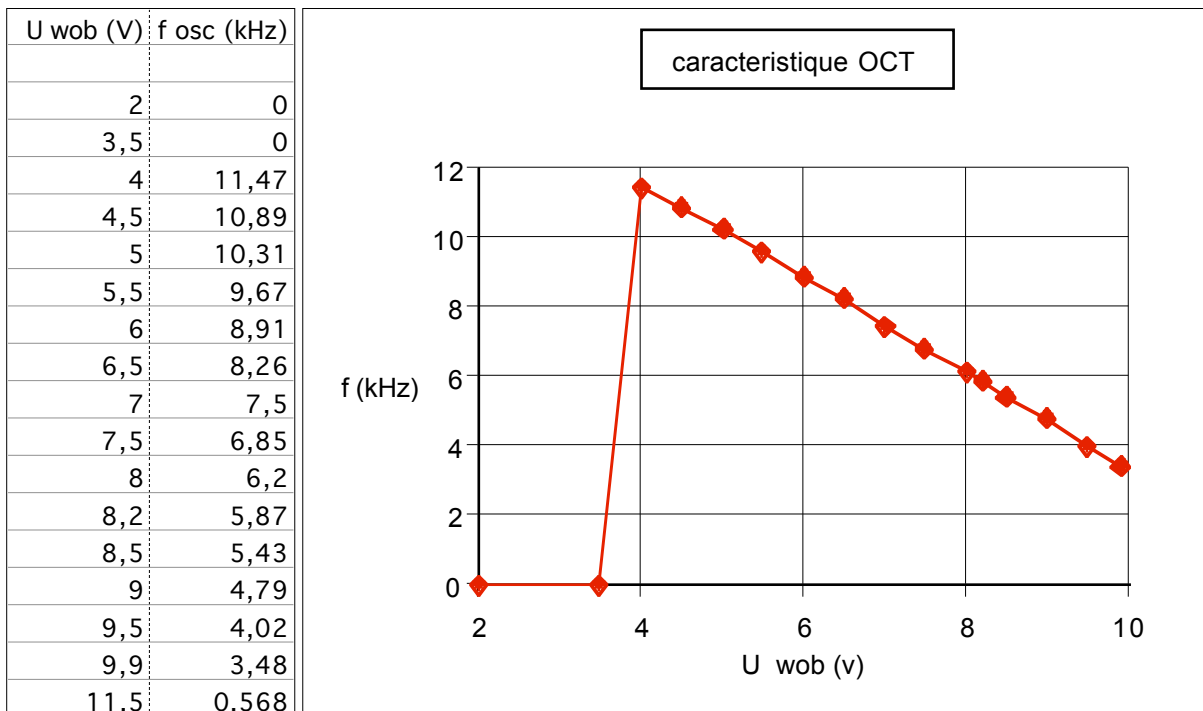
Nous allons relever la caractéristique $f(U_{\text{WOB}})$ qui nous sera utile pour déterminer par la suite l'indice de modulation M.

Modulation du VCO

On remplace le potentiomètre par un GBF délivrant un signal de fréquence au moins 10 fois inférieure à celle de l'oscillation centrale du VCO. Le signal modulant du GBF se superpose à un offset de valeur adéquate réglé par le potentiomètre.

Pour travailler au milieu de la caractéristique du VCO, on prendra $U_{wob} = 8V \Rightarrow f_p = 6 \text{ kHz}$
On choisira pour le signal de wobulation les caractéristiques suivantes: $f_m = 600 \text{ Hz} = f_p / 10$

le relevé ci-dessous est donné à titre d'illustration; il n'est pas contractuel !!!



- offset réglé par le potentiomètre: $8,2 \text{ V} \Rightarrow f_p = 6 \text{ kHz}$

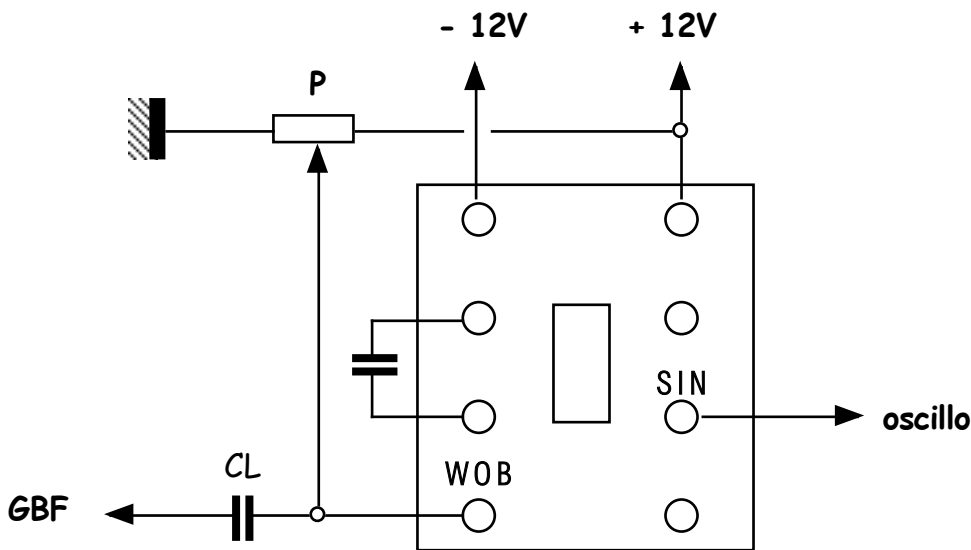
- la fréquence f_M du signal modulant est réglée par la fréquence du GBF

- l'excursion de fréquence δf est réglée par amplitude du signal modulant (GBF):

amplitude (V)	0,138	0,275	0,689	1,1
indice M	0,5	1	2,5	4

rappelons que l'indice de modulation M vaut: $M = \delta f / f_M$

où δf représente l'excursion de fréquence du signal modulé autour de la porteuse.



Maquette ICL 8038

2 Analyser le spectre du signal modulé

Le spectre du signal modulé en angle (fréquence ou phase) est donné par l'amplitude des fonctions de Bessel J_N en fonction de l'indice de modulation M , N représentant le rang de l'harmonique compté à partir de la porteuse ($N=0 \Rightarrow f=f_p$; $N=1 \Rightarrow f=f_p+f_M$)

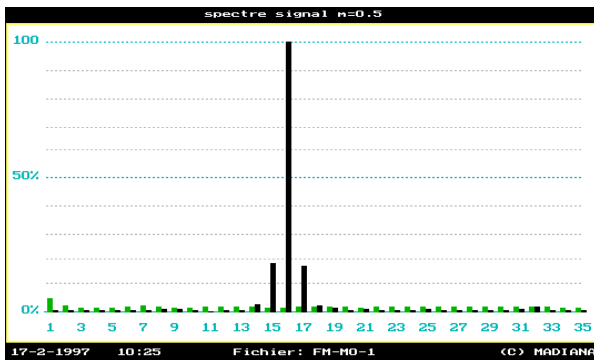
Remarquons que pour $M < 0,5$ le spectre est semblable à celui d'un signal modulé en amplitude.

Pour les différentes valeurs d'amplitude du signal modulant correspondant aux indices de modulation 0,5 - 1 - 2,5 - 4, on relèvera le signal modulé à la sortie deu VCO et on procèdera à l'analyse de son spectre.

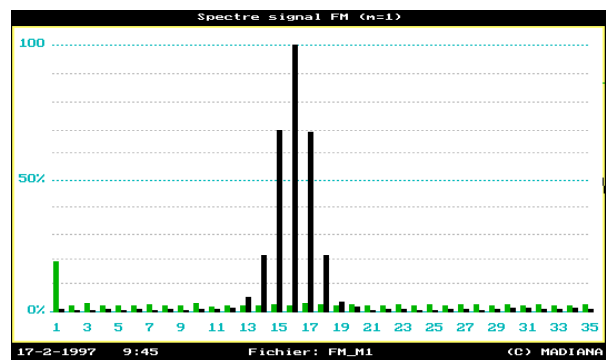
Table des fonctions de Bessel:

M	J 0	J 1	J 2	J 3	J 4	J 5	J 6	J 7	J 8	J 9	J 10	J 11	J 12	J 13
0,0	1,00													
0,2	0,98	0,12												
0,5	0,94	0,24	0,03											
1,0	0,77	0,44	0,11	0,02										
1,5	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01									
2,0	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03									
2,5	-0,05	0,50	0,45	0,22	0,07	0,02								
3,0	-0,25	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01							
4,0	-0,40	-0,07	0,36	0,43	0,28	0,13	0,05	0,02						
5,0	-0,18	-0,33	0,05	0,36	0,39	0,26	0,13	0,05	0,02					
6,0	0,15	-0,28	-0,24	0,11	0,36	0,36	0,25	0,13	0,06	0,02				
7,0	0,30	0,00	-0,30	-0,17	0,16	0,35	0,34	0,23	0,13	0,06	0,03			
8,0	0,17	0,23	-0,11	-0,29	-0,10	0,19	0,34	0,32	0,22	0,13	0,06	0,03		
9,0	-0,09	0,24	0,14	-0,18	-0,27	-0,06	0,20	0,33	0,30	0,21	0,12	0,06	0,03	0,01
10,0	-0,25	0,04	0,25	0,06	-0,22	-0,23	-0,01	0,22	0,31	0,29	0,20	0,12	0,06	0,03
12,0	0,05	-0,22	-0,08	0,20	0,18	-0,07	-0,24	-0,17	0,05	0,23	0,30	0,27	0,20	0,12
15,0	-0,01	0,21	0,04	-0,19	-0,12	0,13	0,21	0,03	-0,17	-0,22	-0,09	0,10	0,24	0,28

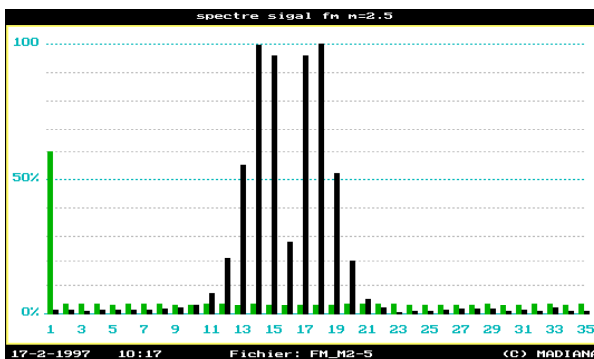
Quelques relevés de spectres à titre documentaire



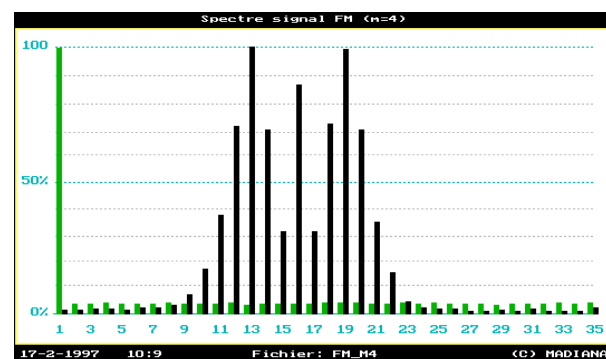
$M = 0,5$



$M = 1$



$M = 2,5$



$M = 4$

3 Démoduler le signal modulé FM

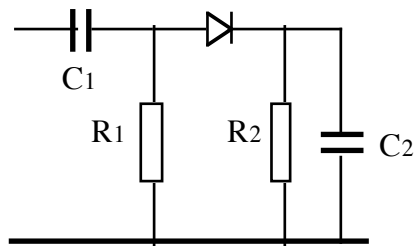
Il existe 2 grandes familles de démodulateurs de fréquence:

- les démodulateurs non cohérents ou discriminateurs dont le principe est de transformer la modulation de fréquence ou de phase en modulation d'amplitude et d'effectuer une détection d'enveloppe;
- les démodulateurs cohérents ou synchrones parmi lesquels on peut distinguer le démodulateur à coïncidence et le démodulateur à PLL.

3.1 discriminateur de fréquence (montage de principe)

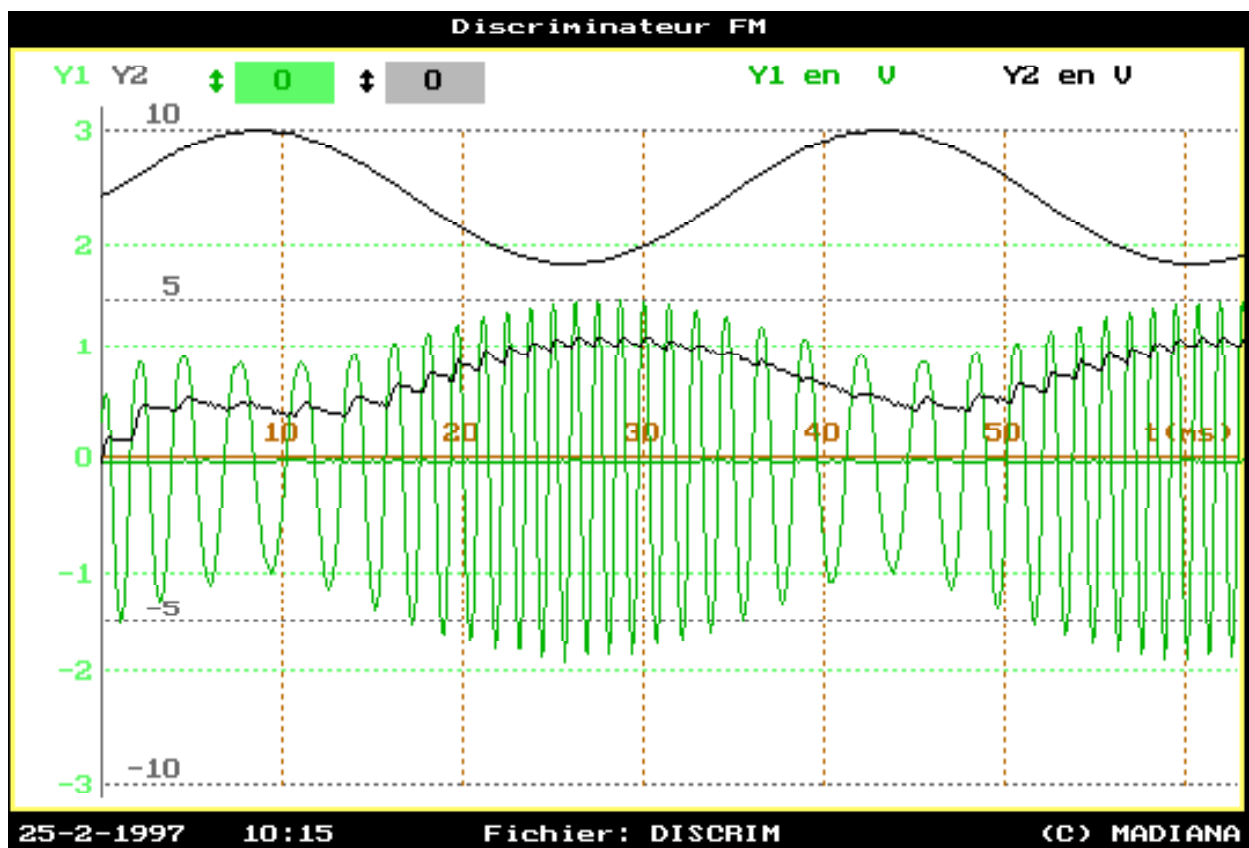
Pour transformer une modulation de fréquence en modulation d'amplitude qui sera ensuite démodulée par un détecteur d'enveloppe, on utilise un dispositif ayant une courbe de réponse en fréquence aussi linéaire que possible, par exemple le montage dérivateur du premier ordre dont la fonction de transfert $T(j\omega) = j\omega/\omega_0$.

Ce montage étant souvent problématique à mettre en œuvre, on lui préférera le filtre passe-haut du premier ordre fonctionnant en dessous de sa fréquence de coupure.



$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$;
 $C_1 = 2,2 \text{ nF}$;
 $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$;
 $C_2 = 4,7 \text{ nF}$
 pour $f_p \approx 6 \text{ kHz}$
 et $f_m \approx 600 \text{ Hz}$

Cependant, si ce montage est très facile à mettre en œuvre il n'offre pas une très bonne discrimination car sa pente n'est que de 20 dB/dec et pour un faible indice de modulation, la modulation d'amplitude obtenue est faible ce qui présente un signal de sortie assez faible noyé dans beaucoup de bruit; les courbes ci-dessous ont été obtenues pour un indice M élevé.

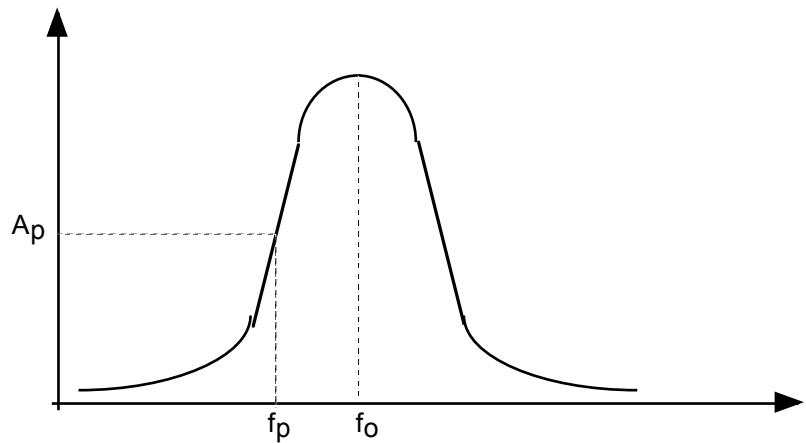
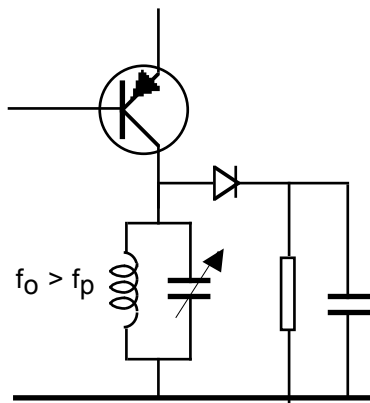


3.2 discriminateur de fréquence (montage pratique)

Dans la pratique (en HF) on préfère utiliser le flanc de la caractéristique d'un circuit oscillant déaccordé par rapport à la fréquence de la porteuse; on se placera au voisinage du point d'inflexion qui présente la plus grande pente et la meilleure linéarité.

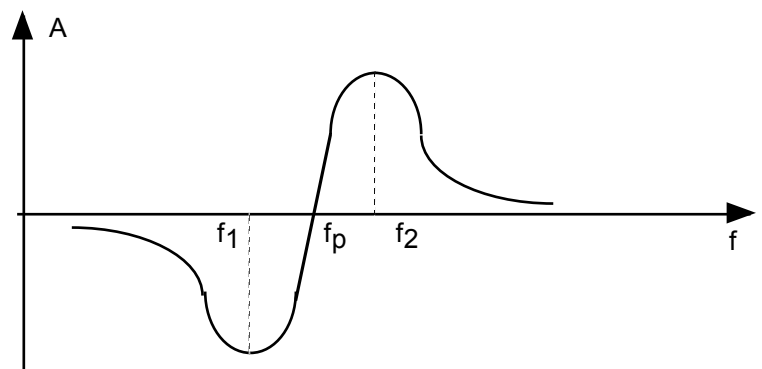
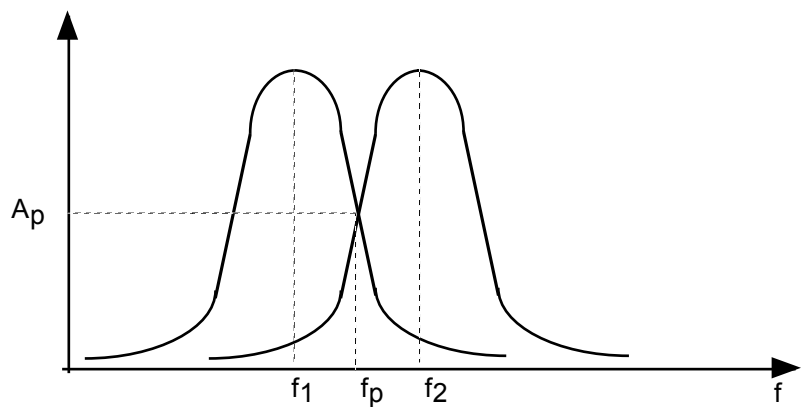
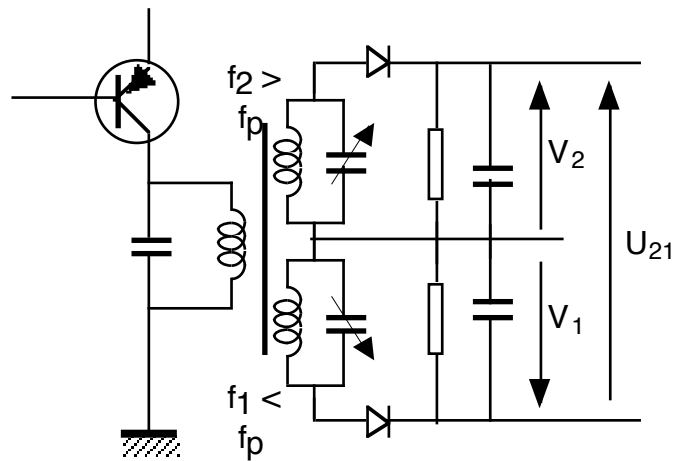
A moins de disposer le jour de l'examen d'une maquette toute prête (et déjà réglée) du montage suivant, il est déconseillé de tenter de le réaliser; on pourra toutefois y faire allusion pour montrer au jury l'étendue de ses connaissances.

discriminateur simple :

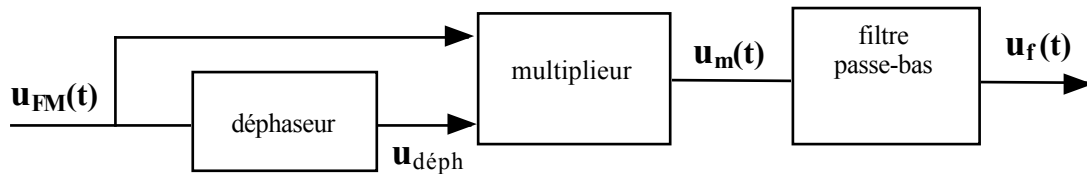


discriminateur à circuits décalés :

la solution la plus performante consiste à utiliser 2 circuits oscillants ayant des fréquences d'accord décalées de part et d'autre de la fréquence de la porteuse et de soustraire les signaux issus de la détection d'enveloppe de manière à obtenir une courbe de réponse $A(f)$ linéaire sur une plage de fréquence assez importante autour de la porteuse.



3.2 démodulateur à coïncidence ou à quadrature



$$u_{FM} = Ap [\cos [\omega_p t + k\Psi(t)]] \qquad u_{déphasé} = Ap [\sin [\omega_p t + k\Psi(t) + d\Psi(t)]]$$

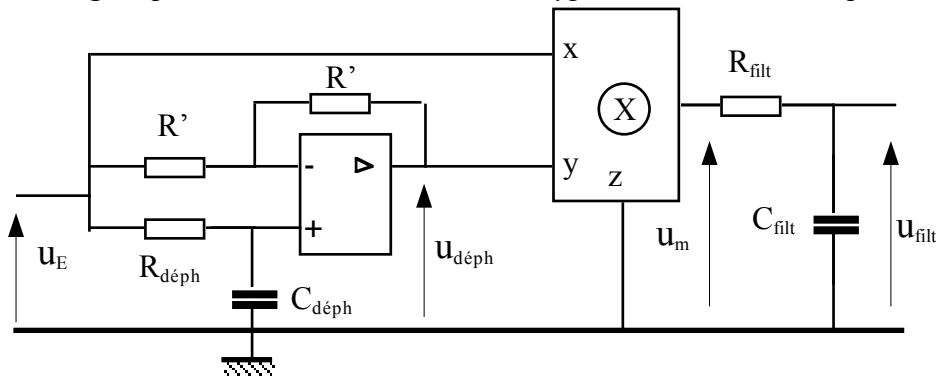
$$u_m = K.Ap^2 [\sin [2\omega_p t + 2k\Psi(t) + d\Psi(t)] + \sin [d\Psi(t)]]$$

A la sortie du filtre passe-bas, on obtient: $u_f = K.Ap^2 \sin [d\Psi(t)] \cong C.Ap^2 d\Psi(t)$

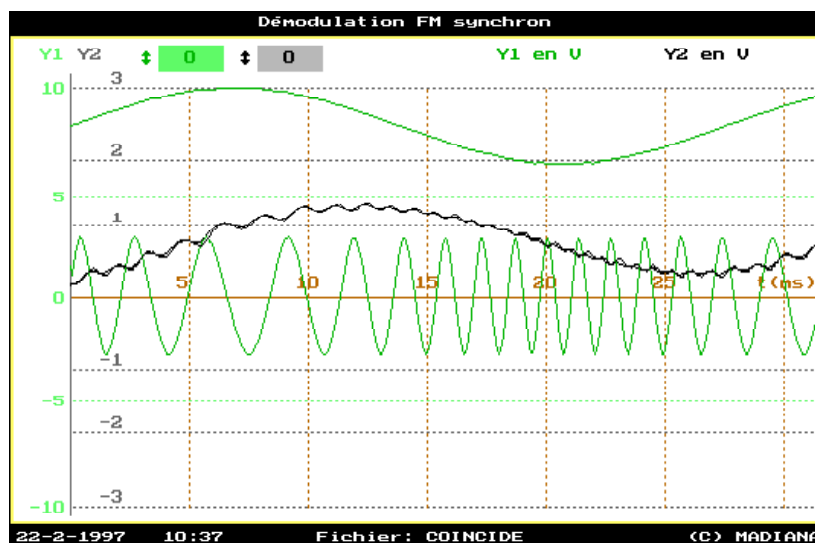
Si le déphaseur a une caractéristique $d\Psi (df)$ linéaire, la tension u_f sera une image de la fréquence instantanée du signal modulé FM, c'est à dire une **image** du message **m(t)**.

Au repos, c'est à dire pour une fréquence égale à celle de la porteuse, le déphaseur introduit un déphasage fixe de $\pi/2$ en retard, d'où le nom de "démodulateur à quadrature".

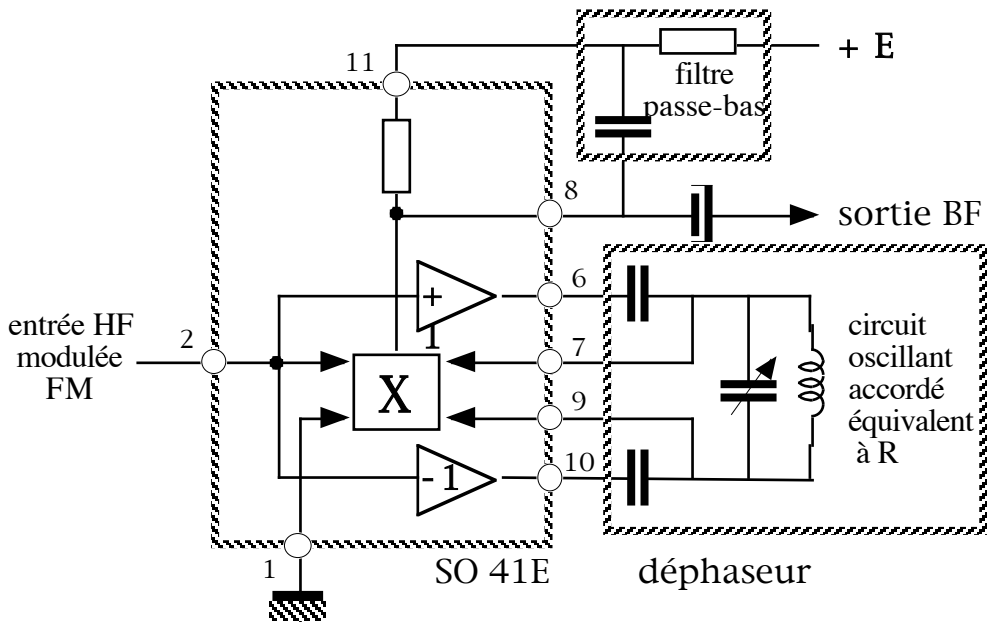
montage expérimental utilisant un AOI du type TLO 81 et un multiplieur du type AD 633



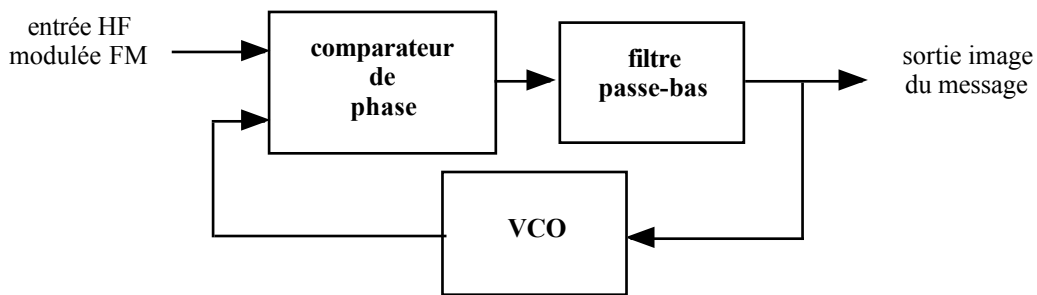
Sur le relevé ci-dessous, on observe le signal modulant (en haut), le signal modulé (au milieu) et au-dessous le signal démodulé et filtré; la composante continue observée peut être ajustée en réglant le déphaseur (prendre $R_{déphasé}$ variable) à la fréquence de la porteuse.



Démodulateur à coïncidence intégrée SO41E (donné à titre documentaire):



3.3 démodulateur à PLL



Exemple de montage démodulateur utilisant la PLL intégrée 4046 :

Block and Connection Diagrams

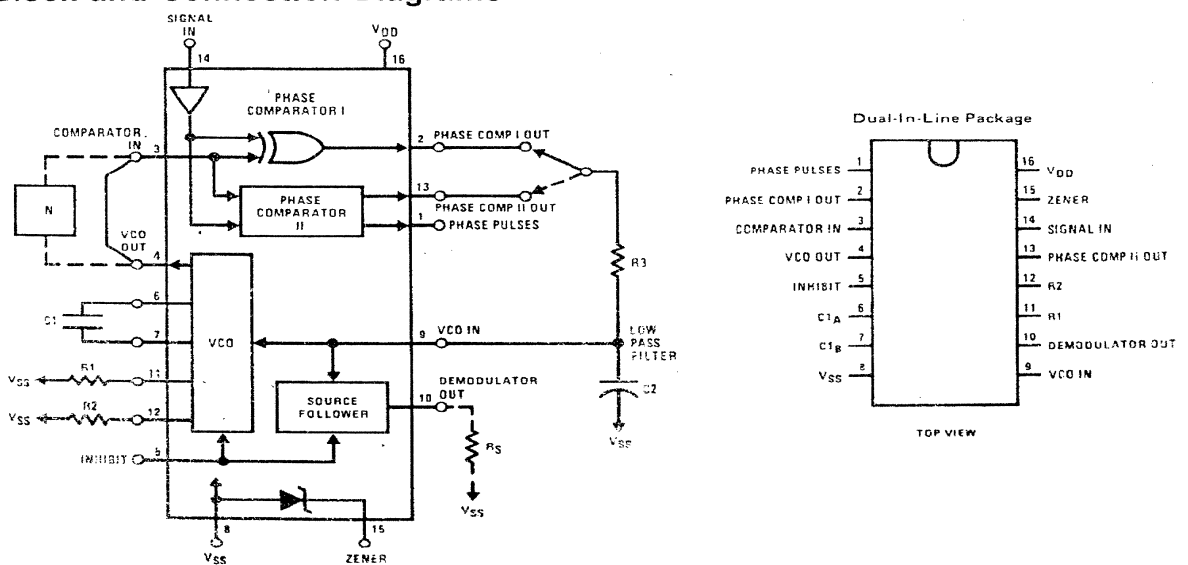


FIGURE 1

$R1 = 100 \text{ k}\Omega;$

$C1 = 10 \text{ nF};$

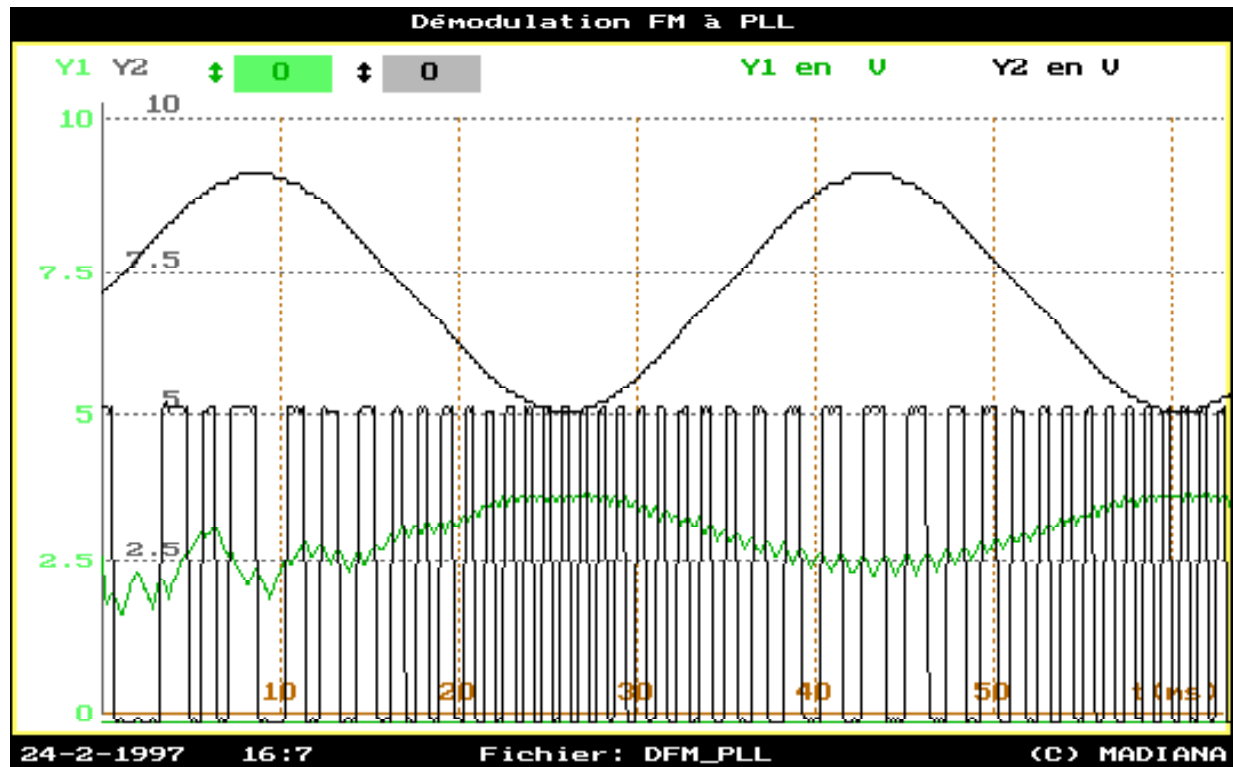
$R3 = 33 \text{ k}\Omega;$

$C2 = 100 \text{ nF}$

Lorsque la boucle est verrouillée, la fréquence délivrée par le VCO tend à suivre celle du signal modulé appliqué à l'entrée du comparateur; cette fréquence est commandée par la tension appliquée à l'entrée de l'OCT et issue du comparateur.

Cette tension est donc une image fidèle de la fréquence instantanée de l'OCT, donc de l'onde modulée en fréquence.

On observe sur l'écran suivant une phase transitoire qui correspond au verrouillage de la PLL qui peut prendre assez souvent une dizaine de périodes.



4 Bibliographie

Guide du technicien en électronique
 CMOS Databook
 Modulation d'amplitude et angulaire
 Boucles à verrouillage de phase
 Précis d'électronique
 Electronique Tome2
 Systèmes bouclés, de communication...

C.Cimelli - R.Bourgeron
 A. Pelat
 M. Girard
 J.L. Azan
 H. Dornier
 F. Manneville - J. Esquieu

Hachette Technique
 National Semiconductor
 Masson Technologies
 Ediscience International
 Bréal
 Vuibert Technique
 Dunod