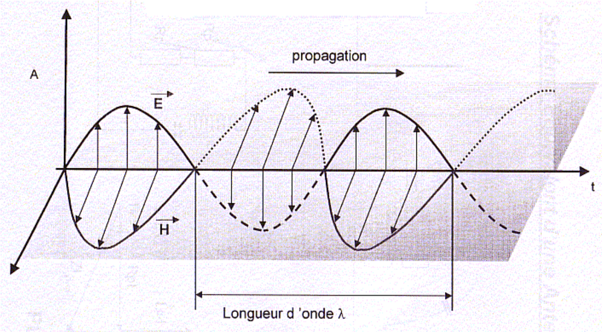
Chapitre 1 : modulations analogiques AM et FM.

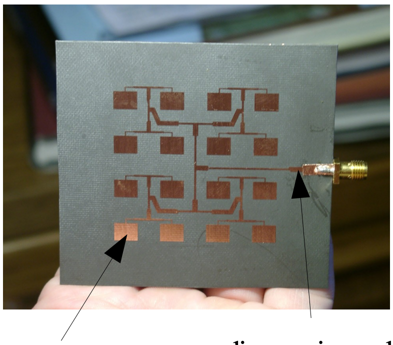
1) rappels généraux sur la modulation.

- Les signaux sont véhiculés dans l'air par une onde électromagnétique à la vitesse de la lumière c = 3.10^8 m/s :



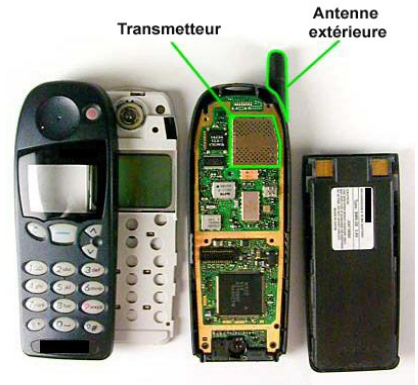
- Relation essentielle pour une onde électromagnétique : $\boxed{\lambda = \frac{c}{f}}$

- Pour émettre les ondes électromagnétiques, on utilise des antennes :



antenne patch

ligne microruban (ou microstrip)



Problème des antennes : pour pouvoir transmettre une onde de fréquence f, il faut une antenne de longueur L telle que …

Exemple : si on veut transmettre directement un signal de fréquence f = 1 kHz de la bande audible (voix, musique) où 20 Hz < f < 20 kHz, il faut une antenne de dimension L = …

Solution : **MODULATION**.

Chaîne d'émission de l'onde :

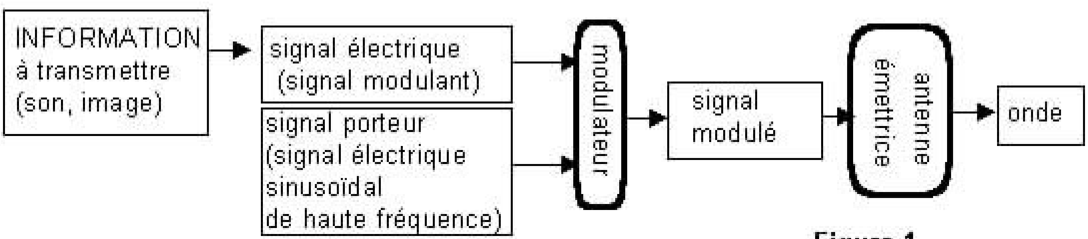
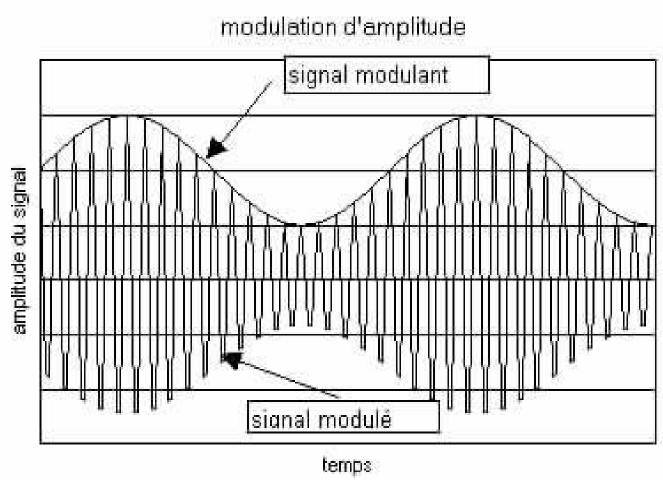
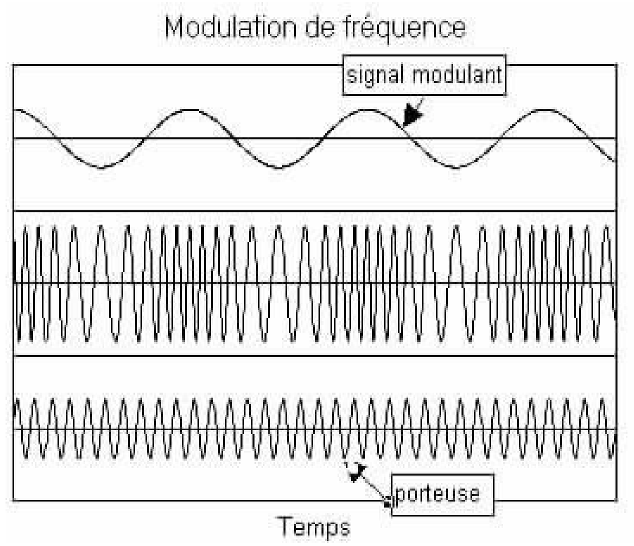


Figure 1

Le signal H.F est appelé PORTEUSE . Le signal B.F est appelé **SIGNAL MODULATEUR ou modulant** . Le signal envoyé est le signal modulé.

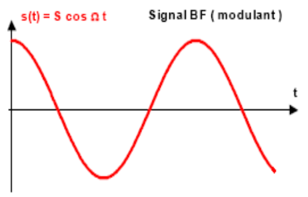
deux grands types de modulation analogique :

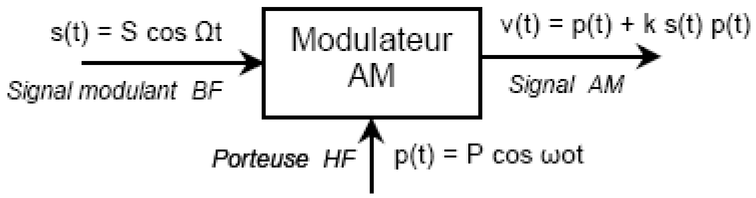


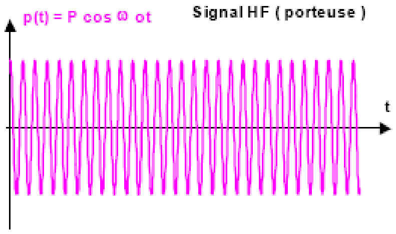


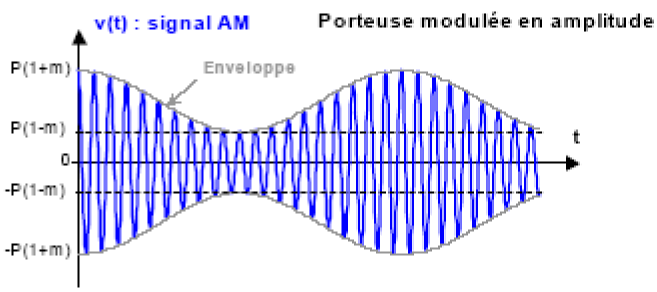
2) <u>rappels sur la modulation d'amplitude.</u>

- modulation d'amplitude avec transmission de la porteuse (MAPC) :









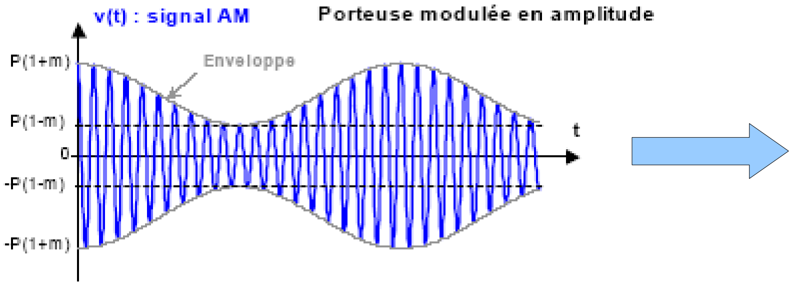
$v(t) = P. \cos(2\pi.f_0.t). (1 + k.S. \cos(2\pi.f.t))$

$v(t) = P. \cos(2\pi.f_0.t). (1 + \mathbf{m}. \cos(2\pi.f.t))$

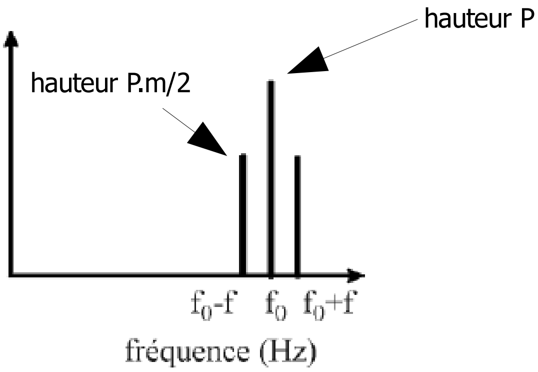
m : indice de modulation.

équation de l'enveloppe de v(t) :

- spectre du signal modulé en amplitude :



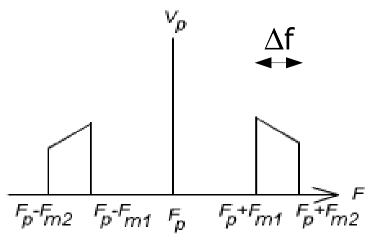
SIGNAL



SPECTRE

$$v(t) = \hat{P} \,.\, \cos(2\pi.f_0.t).\,(1 + \mathbf{m}.\,\cos(2\pi.f.t))$$

Spectre du signal AM si le signal modulant n'est pas sinusoïdal :

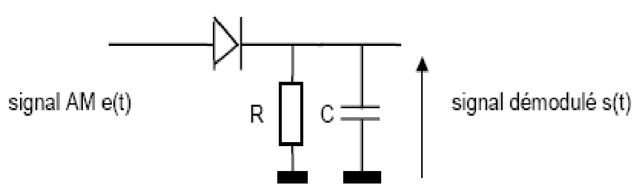


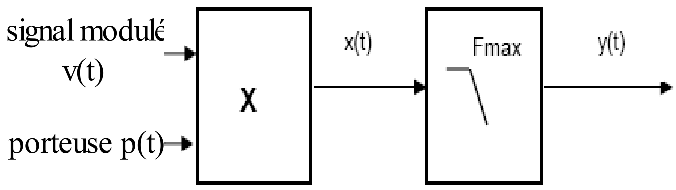
Remarques :

- la largeur de bande utilisée pour la modulation en amplitude à porteuse conservée est de B = 2.Δf où Δf est la largeur de bande du signal modulant. Par exemple, en radiodiffusion PO ou GO, chaque émetteur ne dispose légalement que de B = 9 kHz. On limite donc le signal modulant à Δf = 4 kHz, ce qui oblige à filtrer les aigus.
- Souvent, on ne transmet qu'une seule bande de fréquence sans transmettre la porteuse (MAPS ou BLU). La largeur de bande utilisée est de B =Δf.

- démodulation du signal modulé en amplitude :

On trouve deux montages types :





démodulation par détection synchrone :

démodulation par …

Ce montage ne fonctionne pas pour m > 1

principe de fonctionnement : voir exercice

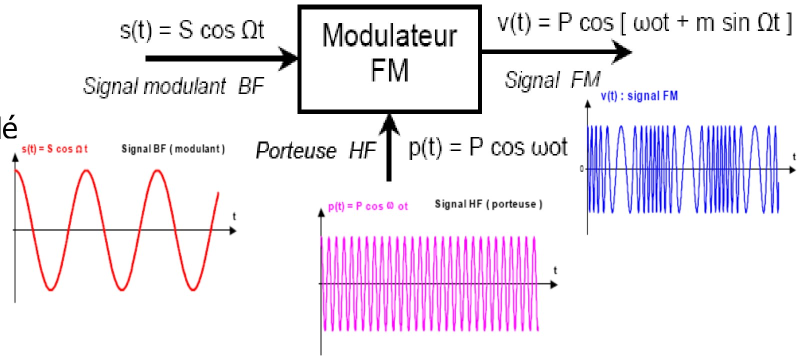
http://ebrois.free.fr/cours/electronique/am/am.htm

3) modulation de fréquence.

● signal dans le domaine temporel :

Dans le cas d'une modulation de fréquence, c'est la fréquence instantanée du signal modulé qui varie en fonction du signal modulant :

$f(t) = f_0 + k_f.s(t)$.



Dans le cas d'une modulation de phase, c'est la phase instantanée du signal modulé qui varie en fonction du signal modulant : $\theta(t) = \theta_0 + k_\theta.s(t)$.

rappels des définitions de la pulsation, de la phase et de la fréquence :

Phase instantanée d'un signal : $\theta(t)$ = tout ce qu'il y a à l'intérieur du cosinus (ou du sinus)

Pulsation instantanée d'un signal : $\omega(t) = \frac{d\,\theta(t)}{dt}$ Fréquence instantanée : $f(t) = \frac{\omega(t)}{2.\pi}$

Application au signal sinusoïdal : $s(t) = \hat{S}\ .\cos(\Omega.t + 1{,}3)$

$\theta(t) =$ $\omega(t) =$ $f(t) =$

Application au signal modulé FM : $v(t) = \hat{P}\ .\cos(\omega_0.t + m.\sin(\Omega.t))$

$\theta(t) =$ $\omega(t) =$

La fréquence instantanée du signal modulé est donc : f =

Cette fréquence varie entre :

On appelle **excursion en fréquence** du signal FM la grandeur $\Delta f = m\ .\ F$

Si le signal modulant n'est pas sinusoïdal, alors, la fréquence instantanée du signal modulé vaut :

$$f(t) = f_0 + k_f\ .\ s(t)$$

Cette fréquence varie entre $f_0 - k_f\ .\ \hat{S}$ et $f_0 + k_f\ .\ \hat{S}$. On a donc $\Delta f = k_f.\hat{S}$ et $m = \Delta f / F$ est **l'indice de modulation**.

En radiodiffusion FM, la valeur de Δf est fixée à $\Delta f = 75$ kHz.

Exemples de Δf :

① Emission dans la bande CB : $f_0 = 27$ MHz ; $F \approx 4$ kHz et $B = 10$ kHz ($m \approx 0{,}25$).
⇒ Emission à faible excursion de fréquence ($\Delta f \approx$ +/- 1kHz).

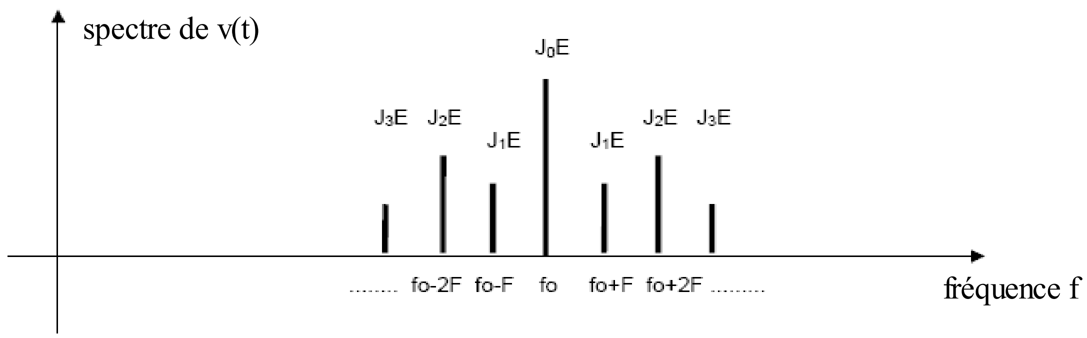
② Emission dans la bande FM : $f_0 = 100$ MHz ; $F \approx 20$ kHz et $B \approx 200$ kHz ($m \approx 4$).
⇒ Emission à excursion de fréquence moyenne ($\Delta f \approx$ +/- 75 kHz).

③ Emission satellite : $f_0 = 10$ GHz ; $F \approx 8$ MHz et $B \approx 30$ MHz ($m \approx 1$).
⇒ Emission à excursion de fréquence élevée ($\Delta f \approx$ +/- 8 MHz).

spectre du signal FM : $v(t) = \hat{P} \cdot \cos(\omega_0.t + m.\sin(\Omega.t))$

Cette expression se développe à l'aide de fonctions mathématiques appelées fonctions de Bessel, de paramètre m :
$v(t) = \hat{P} \cdot J_0(m).\cos(\omega_0.t + \varphi_0) + \hat{P} \cdot J_1(m).\cos((\omega_0 \pm \Omega).t + \varphi_1) + \hat{P} \cdot J_2(m).\cos((\omega_0 \pm 2.\Omega).t + \varphi_2) + \ldots$

$J_0(m)$, $J_1(m)$ et $J_2(m)$ sont les valeurs des fonctions de Bessel pour le paramètre m (valeurs données le plus souvent dans un tableau)



On constate donc que le spectre du signal modulé, de porteuse de fréquence f_0 et de signal modulant de fréquence F :

-
-
-

La bande de fréquence B occupée par le signal FM est donc :

-
-

Règle de CARSON : on considère que la bande **B = 2.(Δf + F) = 2. (m+1).F** contient 98% au moins de la puissance du signal FM.
Application : si F = 10 kHz et Δf = 75 kHz, B = …
Remarque : si le signal modulant n'est plus sinusoïdal de fréquence F mais a un spectre limité à la fréquence F_{max}, la formule de Carson s'applique avec $F \to F_{max}$.

Tableau des valeurs des fonctions de Bessel pour quelques valeurs de m :

m	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}
0,00	1,00										
0,25	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	-0,26	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	0,02
8,0	0,17	0,23	-0,11	-0,29	-0,10	0,19	0,34	0,32	0,22	0,13	0,06

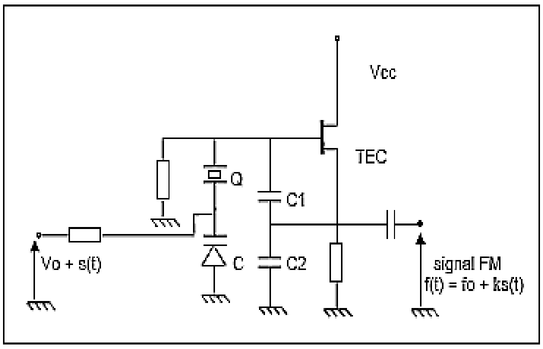
synthèse du signal FM : v(t) de fréquence variable : $f(t) = f_0 + k_f.s(t)$ où s(t) est le signal modulant.

Les exigences d'un émetteur FM sont :

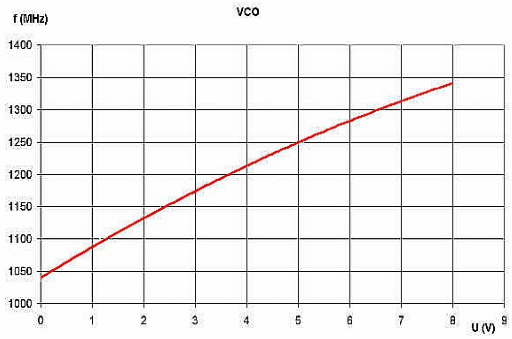
- la porteuse doit être de fréquence f_0 le plus stable possible.
- l'excursion en fréquence kf . $\hat{S}$ doit pouvoir varier entre quelques kHz et plusieurs MHz.

<u>Synthèse directe par VCO</u> : on doit créer un signal v(t) de fréquence variable : $f(t) = f_0 + k_f.s(t)$ avec f_0 constant et k_f constant.
Un Voltage Controlled Oscillator (en français Oscillateur Contrôlé en Tension) est un montage qui donne un signal de sortie … … … … … … … … … … … … … dont la … … … … varie avec le signal d'entrée s(t).

Exemple de montage :



Exemple de caractéristique d'un VCO :



On a vu en première année qu'on pouvait créer un oscillateur sinusoïdal à l'aide d'un quartz, de deux condensateurs et d'un amplificateur TEC. La fréquence de l'oscillateur est réglée par le … …
On fait varier légèrement la fréquence de l'oscillateur à l'aide d'une diode à capacité variable (Varicap) semblable à un condensateur dont la valeur de C dépend de la tension appliquée.

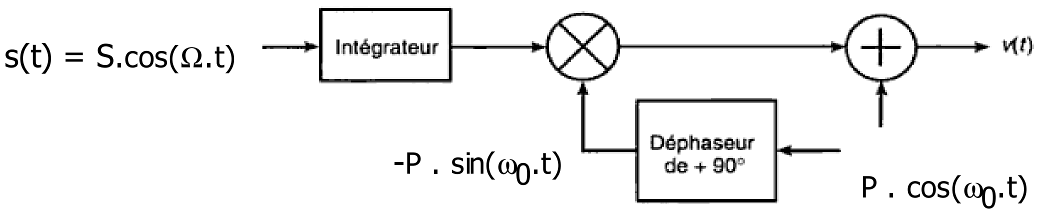
Problèmes de l'utilisation directe du VCO :

-
-

<u>Synthèse indirecte par la méthode d'Armstrong dans le cas où m est faible :</u>
On doit créer un signal de la forme : $v(t) = \hat{P} . \cos(\omega_0.t + m.\sin(\Omega.t))$

Si m<<1, on fait l'approximation au 1er ordre : $\cos(m.\sin(\Omega.t)) \approx 1$ et $\sin(m.\sin(\Omega.t)) \approx m.\sin(\Omega.t)$

d'où : $v(t) \approx \hat{P} . \cos(\omega_0.t) - \hat{P} . \sin(\omega_0.t) . m.\sin(\Omega.t)$ et la méthode de synthèse de v(t) :



Synthèse par boucle à verrouillage de phase (PLL) : voir annexe sur la PLL.

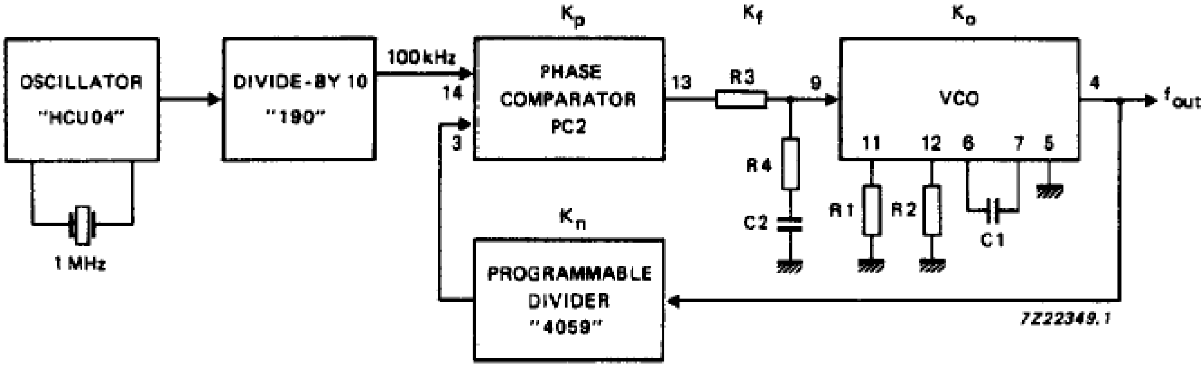
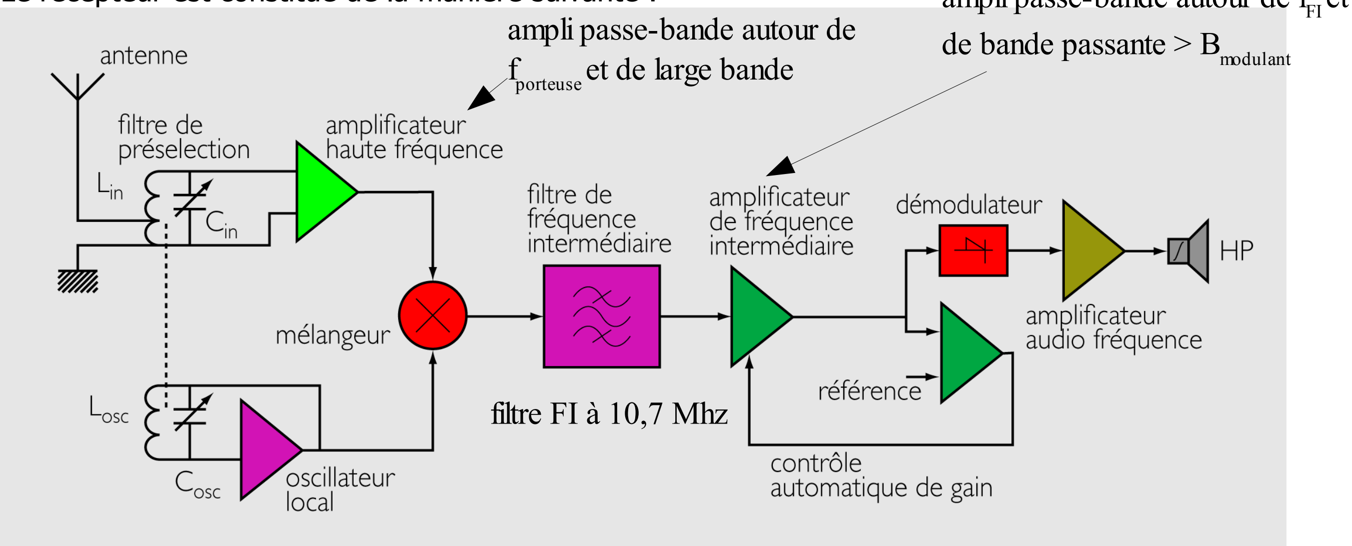


Fig.32 Frequency synthesizer.

démodulations FM :

Le récepteur est constitué de la manière suivante :



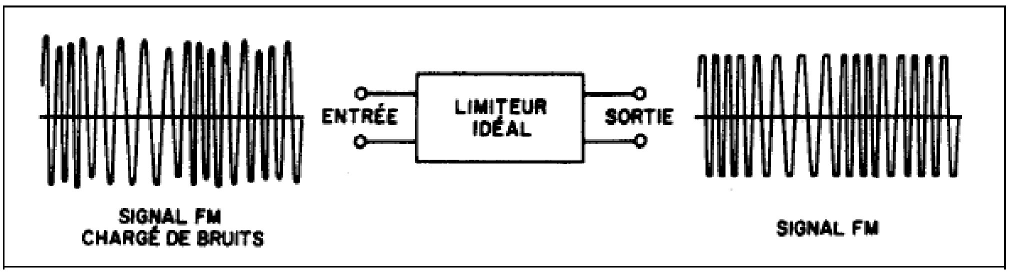
On choisit f_{osc} telle que : $f_{FI} = f_{porteuse} + f_{osc}$ ou $f_{osc} - f_{porteuse}$

Attention à la fréquence image : $f_{image} = f_{porteuse} + 2.f_{FI}$ dans le premier cas car : $f_{image} - f_{porteuse} = f_{FI}$!

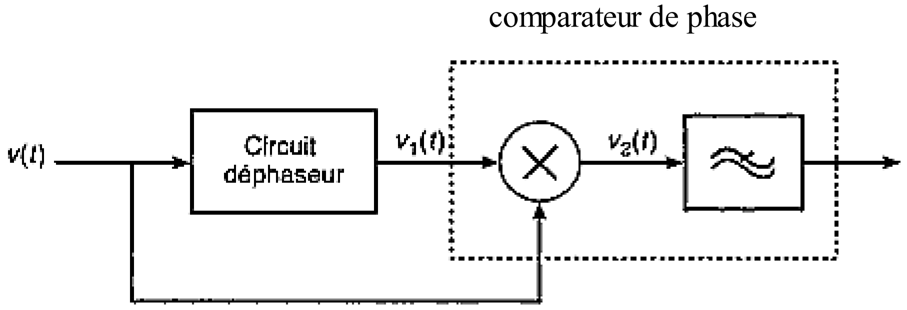
On trouve également quelquefois un limiteur :

Rôles :

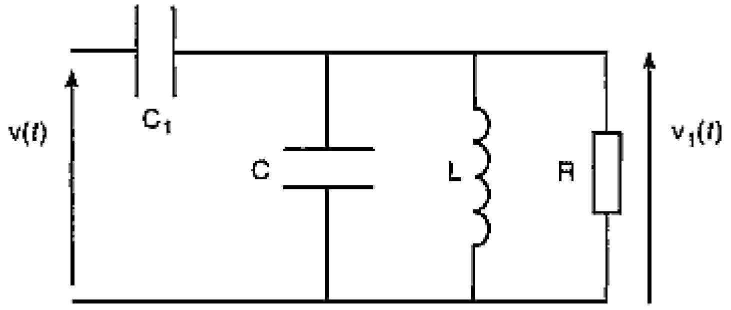
- .
- .



Démodulateur de fréquence à quadrature (ou à coïncidence):



Le circuit déphaseur est constitué de composants RLC :



Ce circuit sélectif passe-bande a une fréquence centrale :

$f_0 = \frac{1}{2.\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L.(C+C1)}}$ et un facteur de qualité souvent très supérieur à un dans la pratique.

De plus, on montre que le déphasage entre v1(t) et v(t) est à peu près linéaire autour de f_0 de telle sorte que : $\phi_{v1/v} = \frac{\pi}{2} - K_{\phi}.(f - f_0)$

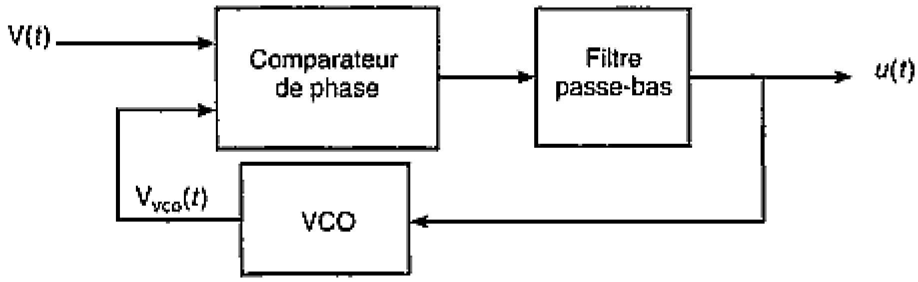
On s'arrange alors pour que la fréquence f_0 « coïncide » avec la fréquence de la porteuse.
On a alors : v(t) = v(t) = $\hat{P}$ .cos(ω_0.t+m.sin(Ω.t)) et v_1(t)=v(t)= $\hat{P}$ .cos(ω_0.t+m.sin(Ω.t)+Φ)

Après le multiplieur : v_2(t) = K.v(t).v1(t) = K. $\hat{P}^2$ .cos(ω_0.t+m.sin(Ω.t)).cos(ω_0.t+m.sin(Ω.t)+Φ)

Après le filtre passe-bas : v_3(t) = = =

Ce type de démodulateur est très utilisé dans les circuits intégrés car le multiplieur est une structure très facile à intégrer.

Démodulateur de fréquence à PLL :



En régime permanent, la tension de commande du VCO n'est pas nulle (sinon, $f_{Vvco}=f_0$) et est proportionnelle à $f - f_0$ c'est-à-dire proportionnelle au signal modulant.
(voir annexe sur la PLL)

puissance contenue dans le signal FM :

On a vu que le signal modulation de fréquence pouvait s'écrire : $v(t) = \hat{P} \,.\, \cos(\omega_0.t + m.\sin(\Omega.t))$ et que l'on peut développer cette expression à l'aide des fonctions de Bessel :
$v(t) = \hat{P} \,.\, J_0(m).\cos(\omega_0.t + \varphi_0) + \hat{P} \,.\, J_1(m).\cos((\omega_0 \pm \Omega).t + \varphi_1) + \hat{P} \,.\, J_2(m).\cos((\omega_0 \pm 2.\Omega).t + \varphi_2) + \ldots$

Aux bornes d'une résistance R, la puissance dissipée par ce signal est :
$\langle p(t)\rangle = \langle v(t)^2\rangle / R$ = somme des puissances apportées par chaque raie. (car le signal v(t) a un spectre de raies).
Comme chaque raie est une sinusoïde et que la valeur moyenne d'une sinusoïde au carré est ½,
$\langle p(t)\rangle = \dfrac{\hat{P}^2}{2.R}.(J_0(m)^2+2.J_1(m)^2+2.J_2(m)^2+\ldots)$ avec $(J_0(m)^2+2.J_1(m)^2+2.J_2(m)^2+\ldots) = 1$

d'où : $\langle p(t)\rangle = \dfrac{\hat{P}^2}{2.R}$ et ne dépend pas du signal modulant : la puissance est celle que dissiperait la porteuse seule sans modulation. La puissance fournie par l'émetteur est constante.

Exemples de modulations FM :

- les modems (**mo**dulateur-**dem**odulateur) bas débit utilisent la modulation de fréquence ;
- les téléphones analogiques utilisent la modulation de fréquence pour composer le numéro : chaque chiffre est codé par une combinaison de deux fréquences pour former un code DTMF. C'est une modulation FSK qui utilise plus de deux fréquences (MFSK, multiple frequency-shift keying) ;
- les radios de la «bande FM» émettent, comme leur nom l'indique, en modulation de fréquence sur la bande VHF II. (88 – 108 Mhz)

http://ebrois.free.fr/cours/electronique/fm/fm.htm