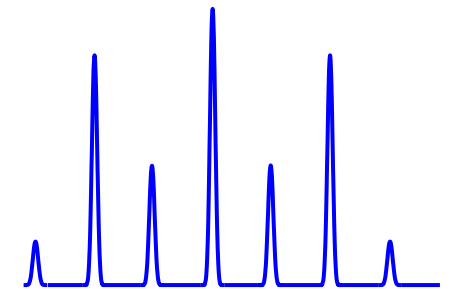
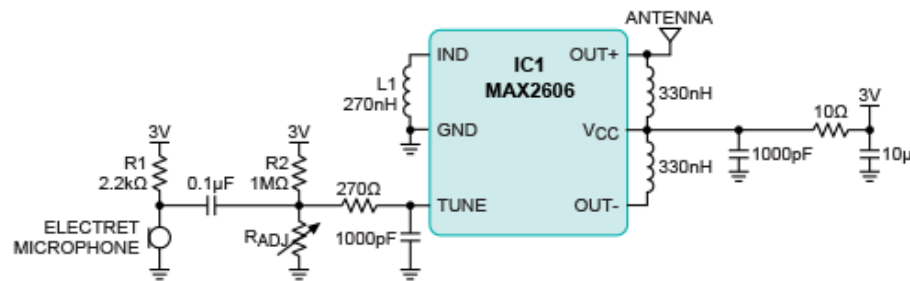
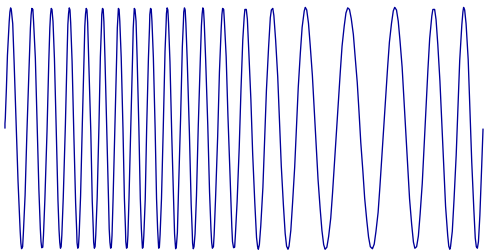


Transmission de l'Information

Transmission en modulation de fréquence

Plan de la présentation

- 1 Présentation des transmissions en modulation de fréquence
- 2 Principe de base en modulation de fréquence
- 3 Spectre d'un signal modulé en fréquence
- 4 Démodulation de fréquence : Principe & mise en œuvre



An FM transmitter circuit with microphone for use as a hands-free cell phone.

1 Ou trouve t'on les modulations de fréquences ?

Radio FM Bande commerciale : 88-108MHz



Transmission Vidéo sans fil : 2,4GHz



**Private
(Personnal)
Mobile Radio
PMR446**

446MHz



Micro sans fil

Nombreuses bandes de fréquences



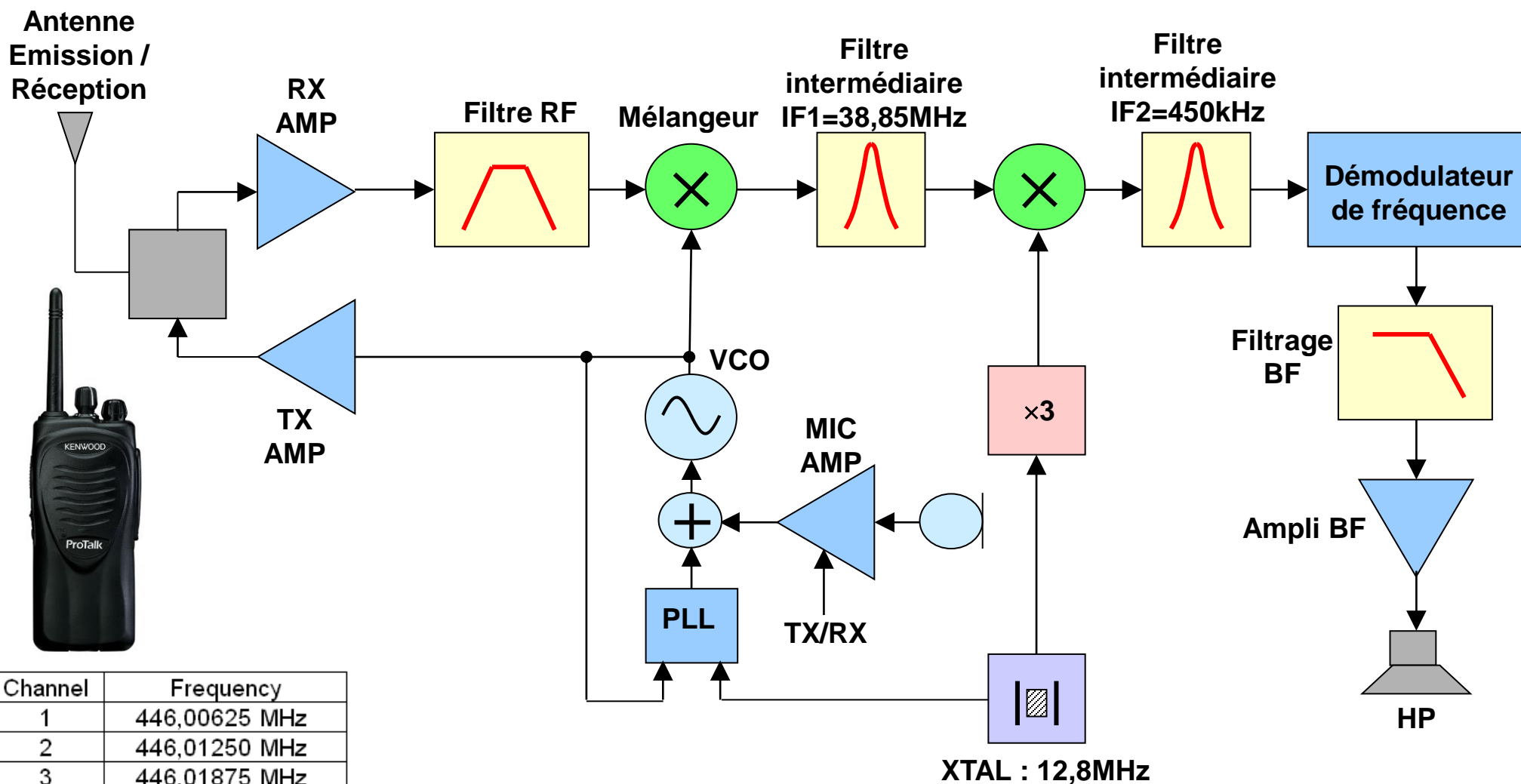
Casque Sans Fil (HF ou IR)

2,3MHz / 2,8MHz

868MHz



1 Une chaîne de transmission en FM

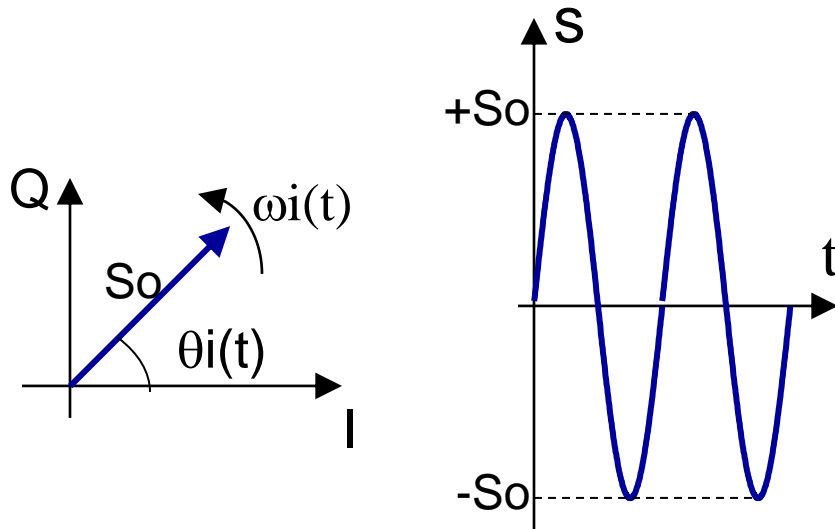


Channel	Frequency
1	446,00625 MHz
2	446,01250 MHz
3	446,01875 MHz
4	446,02500 MHz
5	446,03125 MHz
6	446,03750 MHz
7	446,04375 MHz
8	446,05000 MHz

Synoptique d'un poste PMR 446 (ex TK-3201 KENWOOD)

2 Principe de la modulation de fréquence

Représentation d'un signal porteur sinusoïdal :



Expression :

$$s(t) = S_0 \cdot \cos[\theta_i(t)] \quad \omega_i = \frac{d\theta_i}{dt}$$

$\theta_i(t)$: phase instantanée

$\omega_i(t)$: pulsation instantanée

Modulation de fréquence :

$$f_i(t) = f_0 + K_f \cdot \text{msg}(t)$$

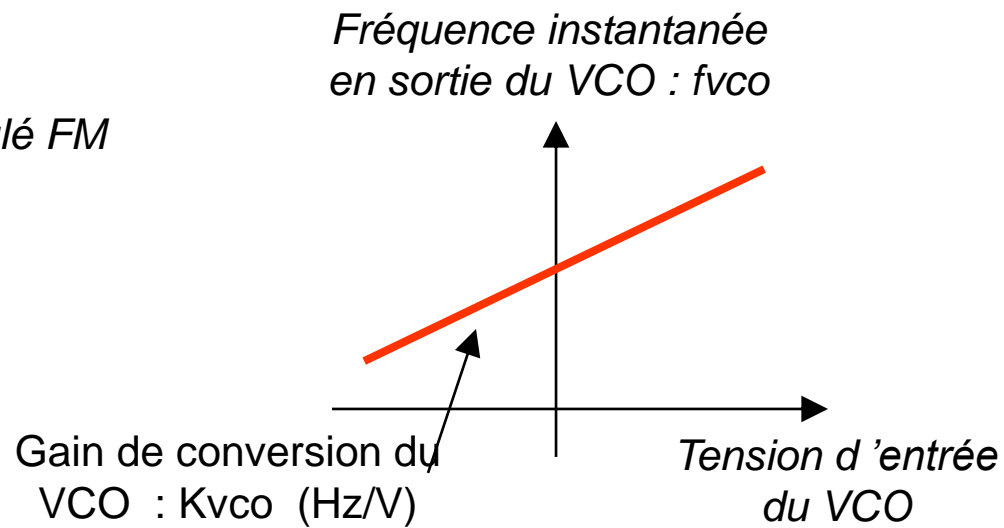
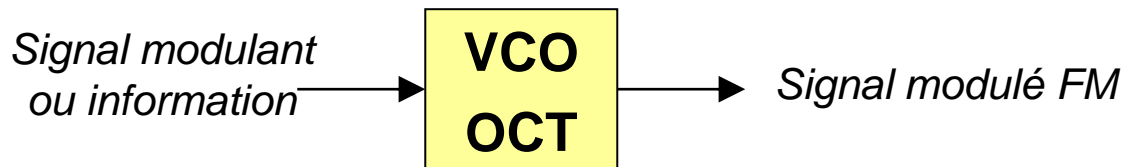
$\text{msg}(t)$: message à transmettre, signal modulant

f_0 : fréquence porteuse (si $\langle \text{msg}(t) \rangle = 0$)

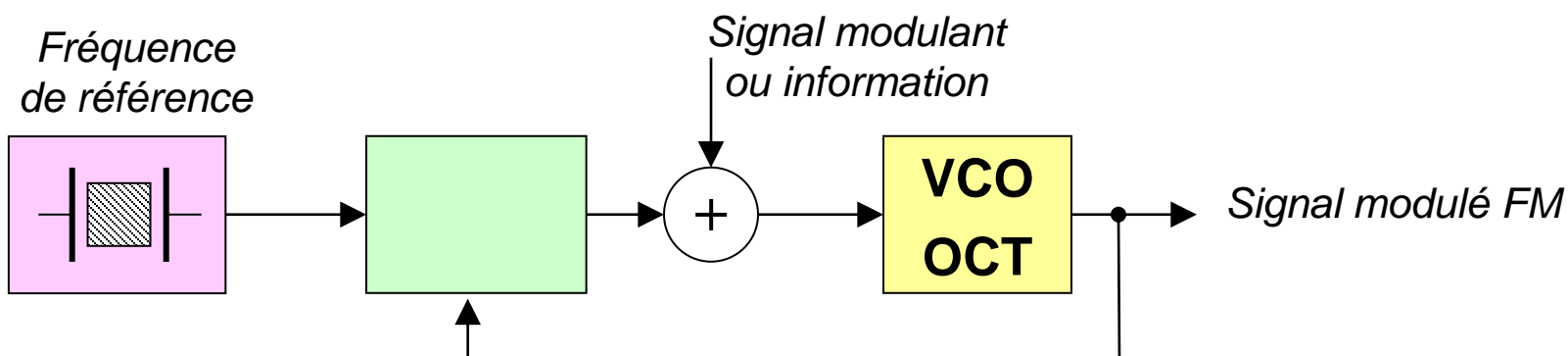
K_f : Gain de conversion du modulateur (Hz/V)

2 Modulateurs de fréquence : principe

- Principe :



- Amélioration classique : Boucle à verrouillage de phase



2 Cas d'un signal modulant sinusoïdal

Comme pour l'étude des modulations d'amplitude on utilise un message de référence pour la transmission en prenant un signal modulant sinusoïdal :

$$\text{msg}(t) = A.\cos(\omega_a.t)$$



$$f_i(t) = f_0 + K_f.A.\cos(\omega_a.t)$$

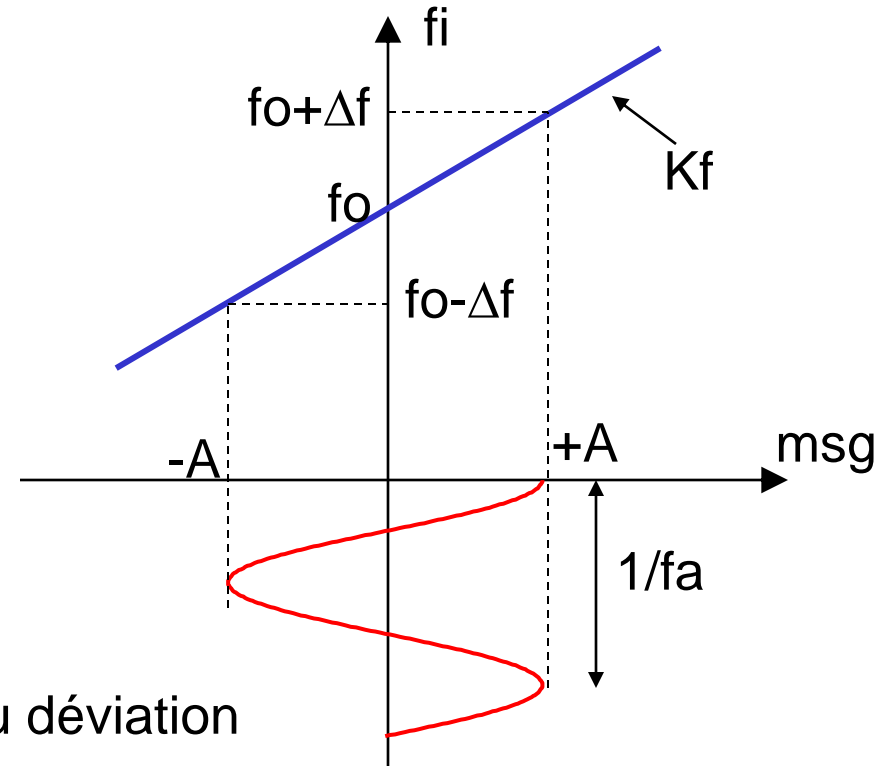


$$\theta_i(t) = \omega_0.t + \left(\frac{K_f.A}{f_a} \right) \sin(\omega_a.t)$$

Indice de modulation

$$m = \frac{K_f.A}{f_a} = \frac{\Delta f}{f_a}$$

Excursion ou déviation en fréquence

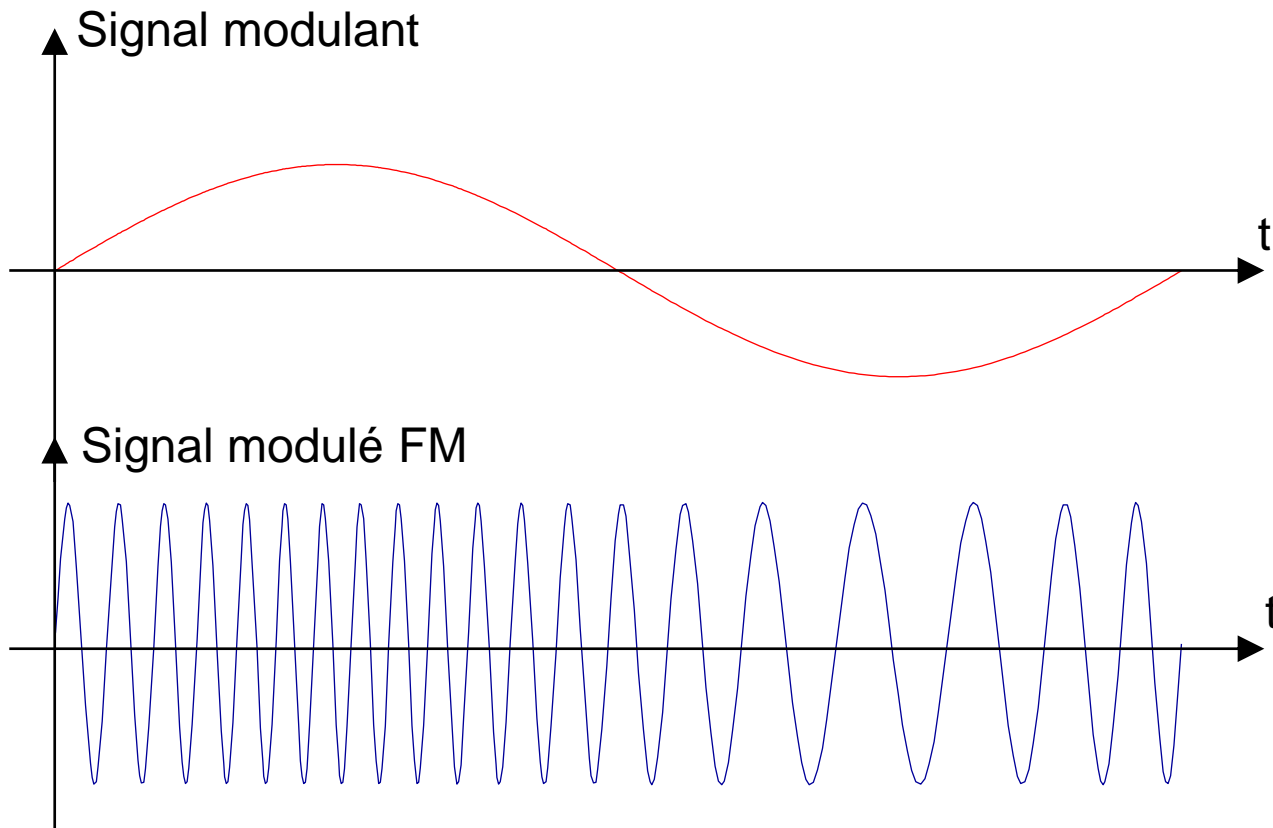


Signal modulé : $s(t) = S_0.\cos[\omega_0.t + m.\sin(\omega_a.t)]$

2 Représentation temporelle

Contrairement aux modulations d'amplitudes le tracé du signal modulé en fonction du temps est beaucoup plus complexe :

On utilise alors des logiciels (ex : LTSpice ou MATLAB)



3 A la recherche du spectre d'un signal modulé FM

Le signal modulé angulairement $S(t) = S_0 \cdot \cos(\omega_0 t + m \cdot \sin(\omega_a t))$

peut s'écrire sous la forme :

$$S(t) = S_0 \cdot \cos(\omega_0 t) \cdot \cos(m \cdot \sin(\omega_a t)) - S_0 \cdot \sin(\omega_0 t) \cdot \sin(m \cdot \sin(\omega_a t))$$

Les fonctions $\sin(m \cdot \sin(\omega_a t))$ et $\cos(m \cdot \sin(\omega_a t))$ sont périodiques

Donc décomposables en série de Fourier avec :

$$\sin(m \cdot \sin(\omega_a t)) = 2J_1(m) \cdot \sin(\omega_a t) + 2J_3(m) \cdot \sin(3\omega_a t) + 2J_5(m) \cdot \sin(5\omega_a t) + \dots$$

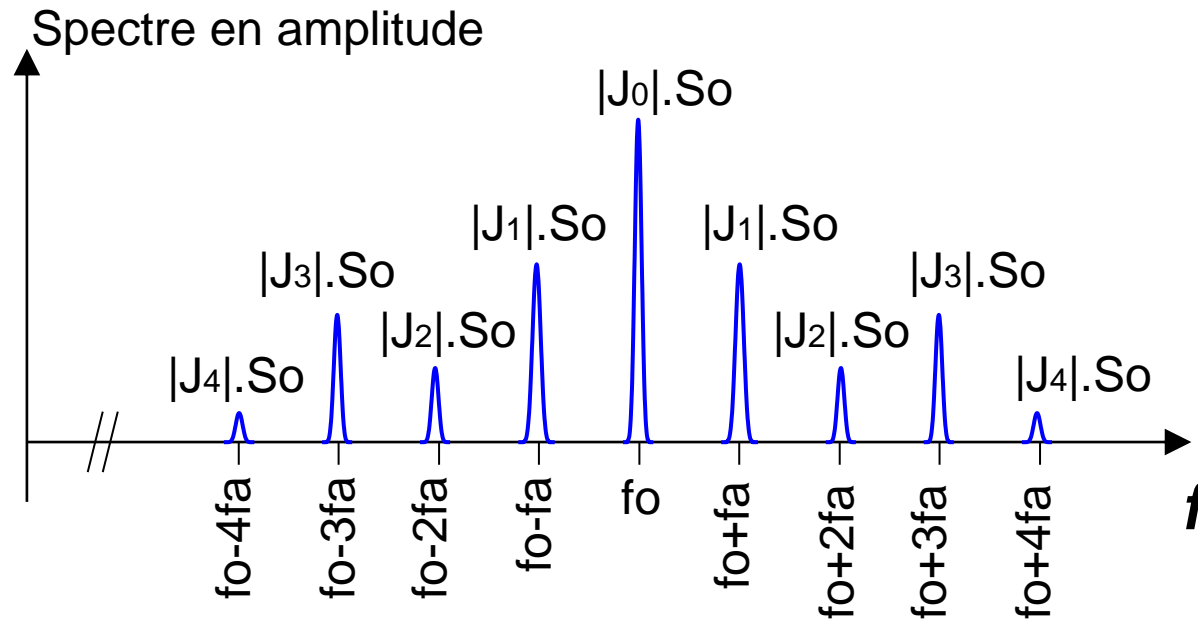
$$\cos(m \cdot \sin(\omega_a t)) = J_0(m) + 2J_2(m) \cdot \cos(2\omega_a t) + 2J_4(m) \cdot \cos(4\omega_a t) + \dots$$

ou $J_n(m)$ sont **les fonctions de Bessel** de première espèce d'ordre n fonction de la variable m

Donc $S(t) = \left\{ \right.$

3 Représentation fréquentielle

Signal modulé : $s(t) = S_0 \cdot \cos[2\pi f_0 t + m \cdot \sin(2\pi f_a t)]$



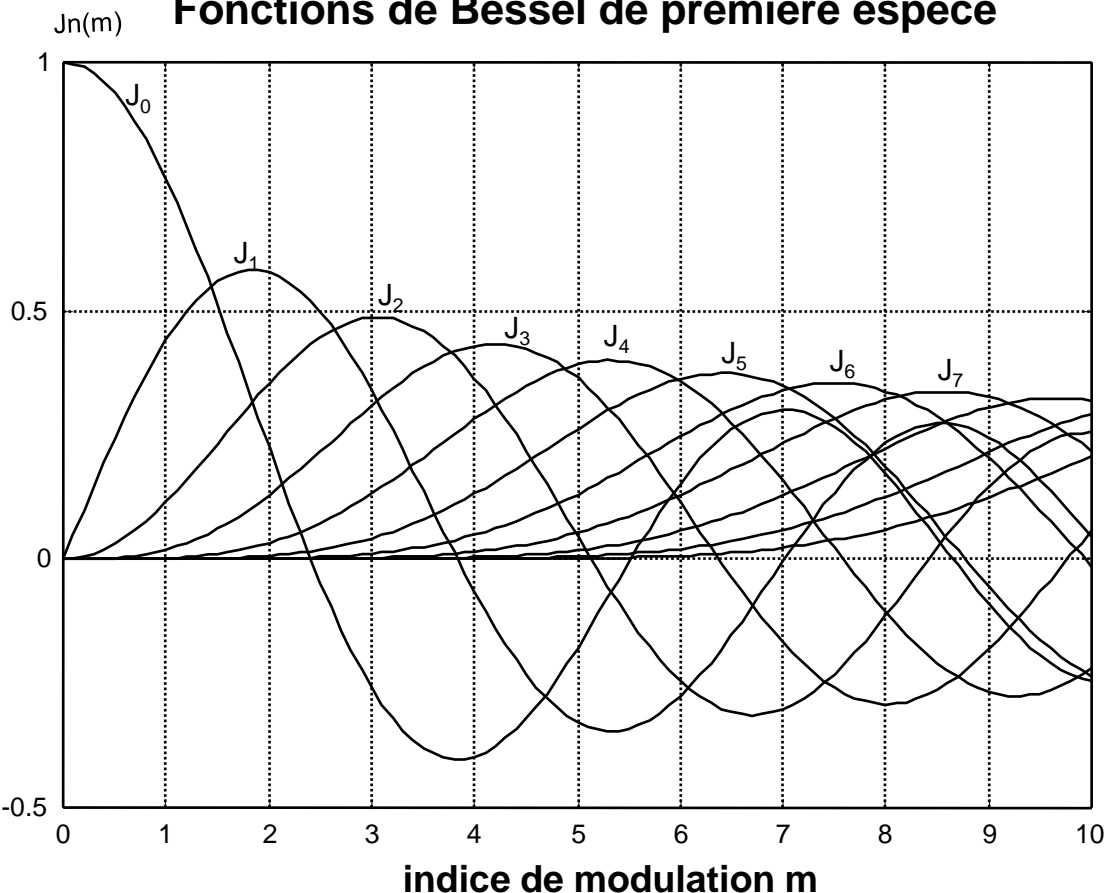
$J_i(m)$: Fonction de Bessel de première espèce d'ordre i et fonction de l'indice de modulation m

Le spectre d'un signal FM est en théorie infini cependant 98% de la puissance du signal est concentré dans une bande B_c (Bande de Carson) autour de f_0 telle que :

$$B_c = 2 \cdot (m + 1) \cdot f_a$$

3 A propos des fonctions de Bessel

Fonctions de Bessel de première espèce

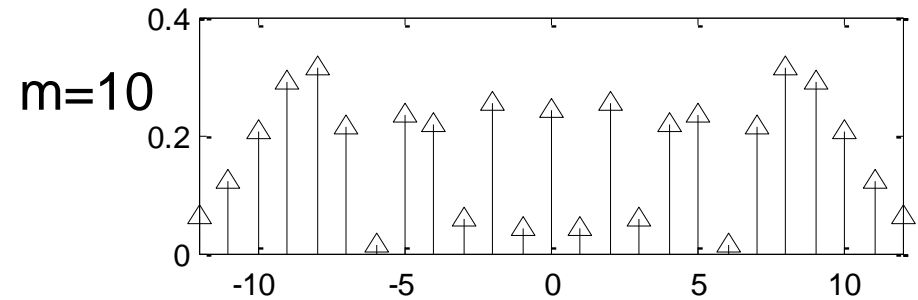
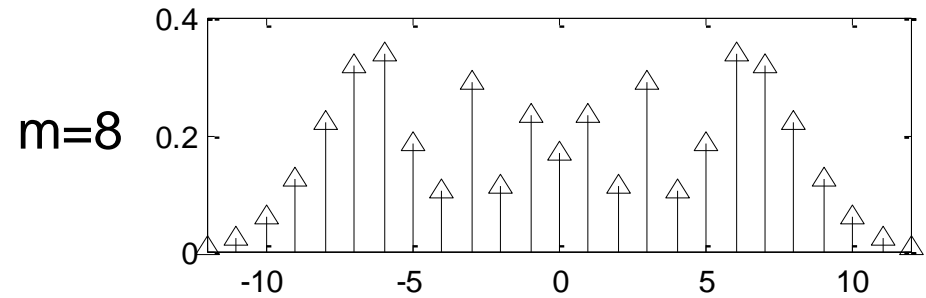
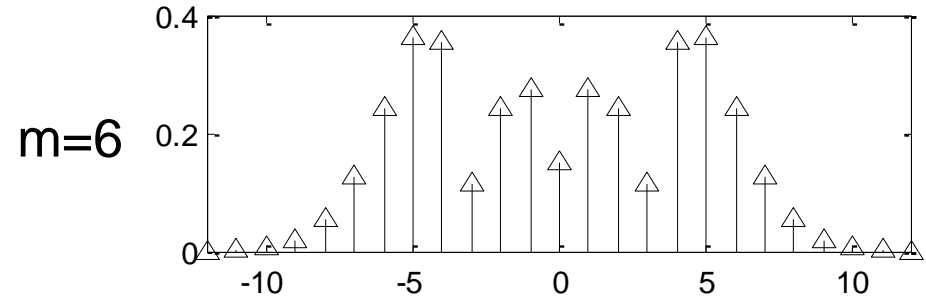
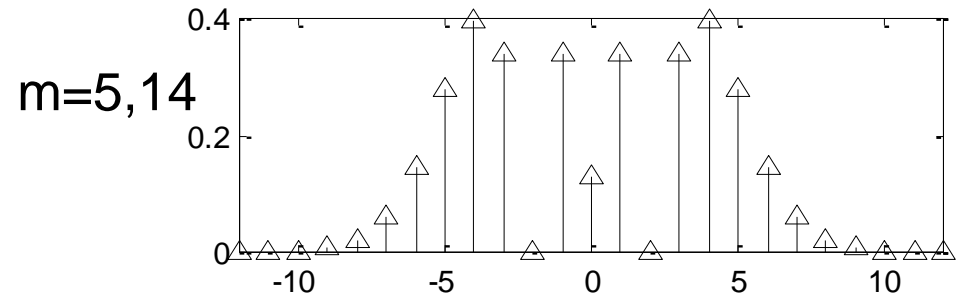
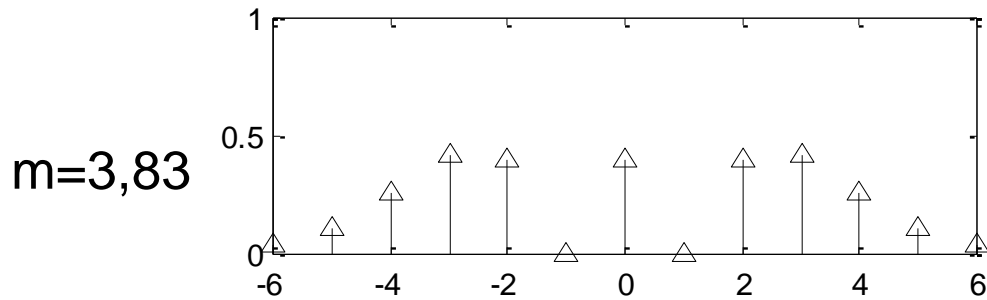
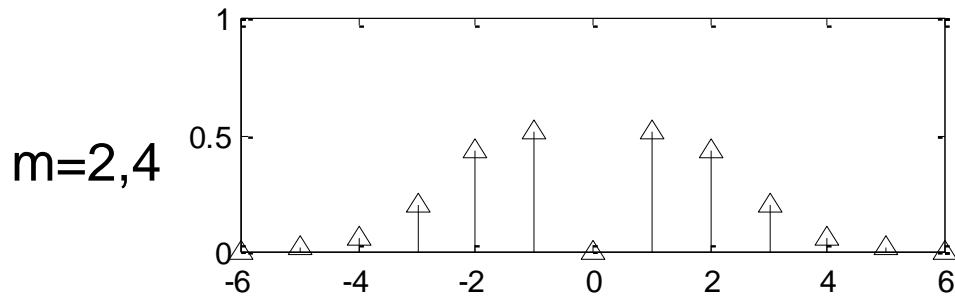
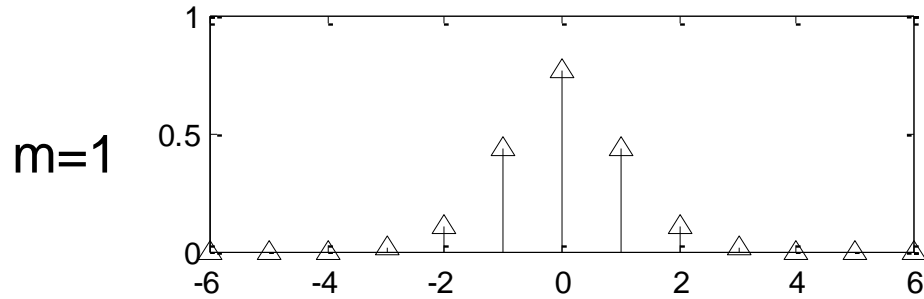
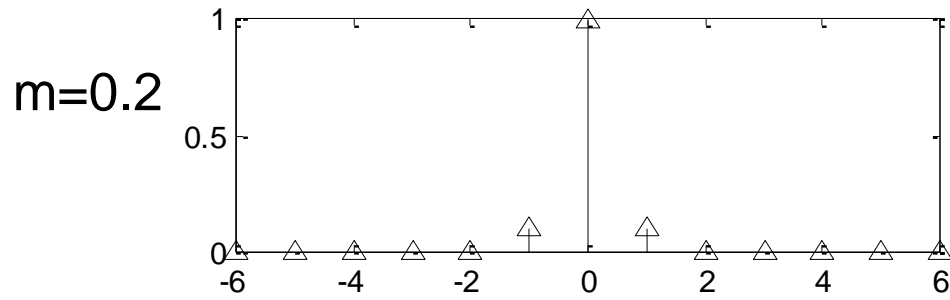


Ordre	Indice de modulation m					
	1	1,5	2	2,4	3	3,83
0	0,765	0,512	0,224	0	-0,26	-0,403
1	0,44	0,558	0,577	0,52	0,339	0
2	0,115	0,232	0,353	0,431	0,486	0,403
3	0,02	0,061	0,129	0,198	0,309	0,420
4	≈0	0,012	0,034	0,064	0,132	0,255
5	≈0	≈0	0,007	0,016	0,043	0,113
6	≈0	≈0	≈0	≈0	0,011	0,04
7	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	0,012
8	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0
9	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0

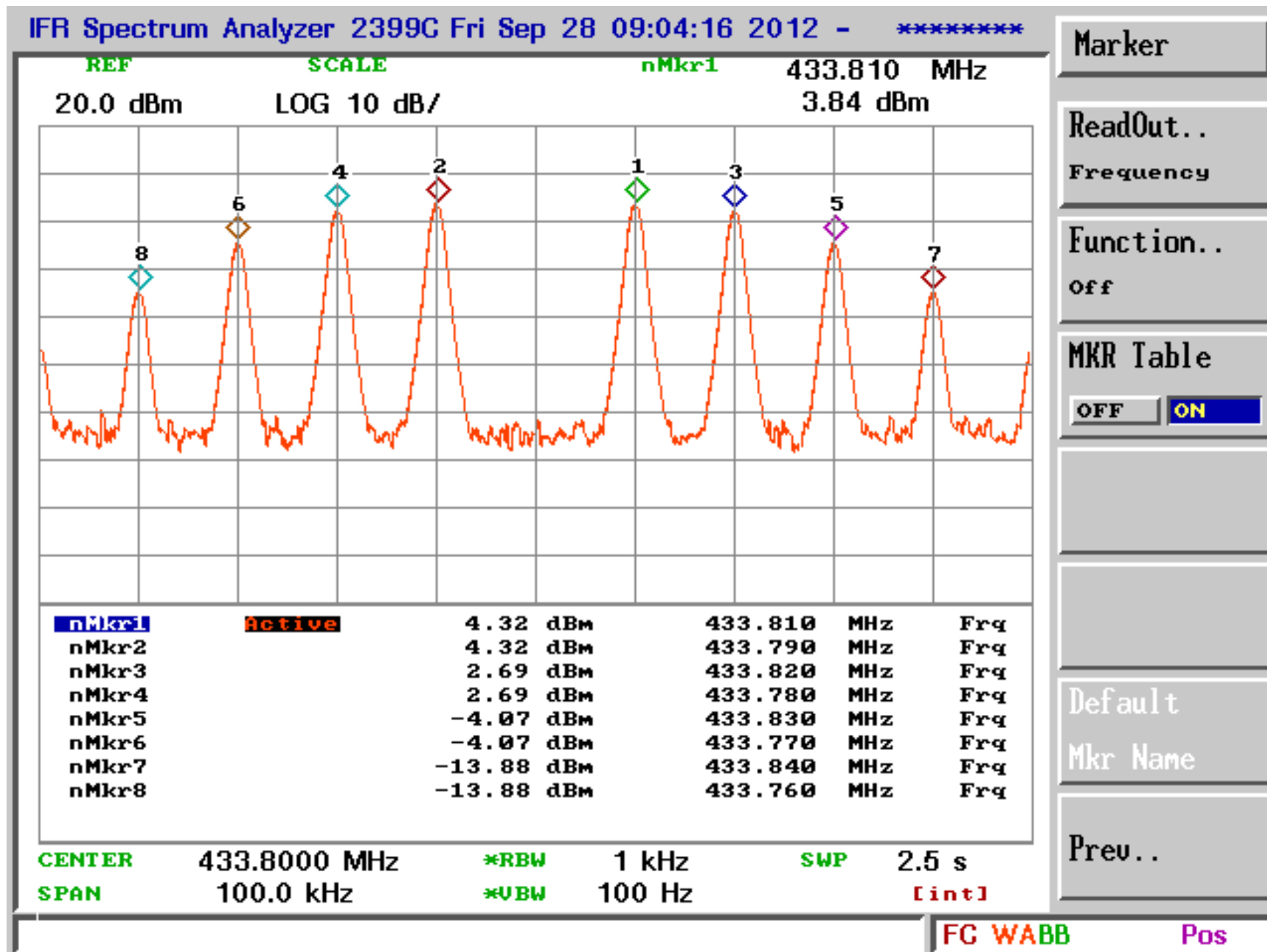
$$J_n(m) = \left(\frac{m}{2}\right)^n \cdot \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(-1)^p \cdot m^{2p}}{2^{2p} \cdot p! \cdot (n+p)!}$$

$$[J_0(m)]^2 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [J_n(m)]^2 = 1$$

3 Tracé des spectres en fonction de m

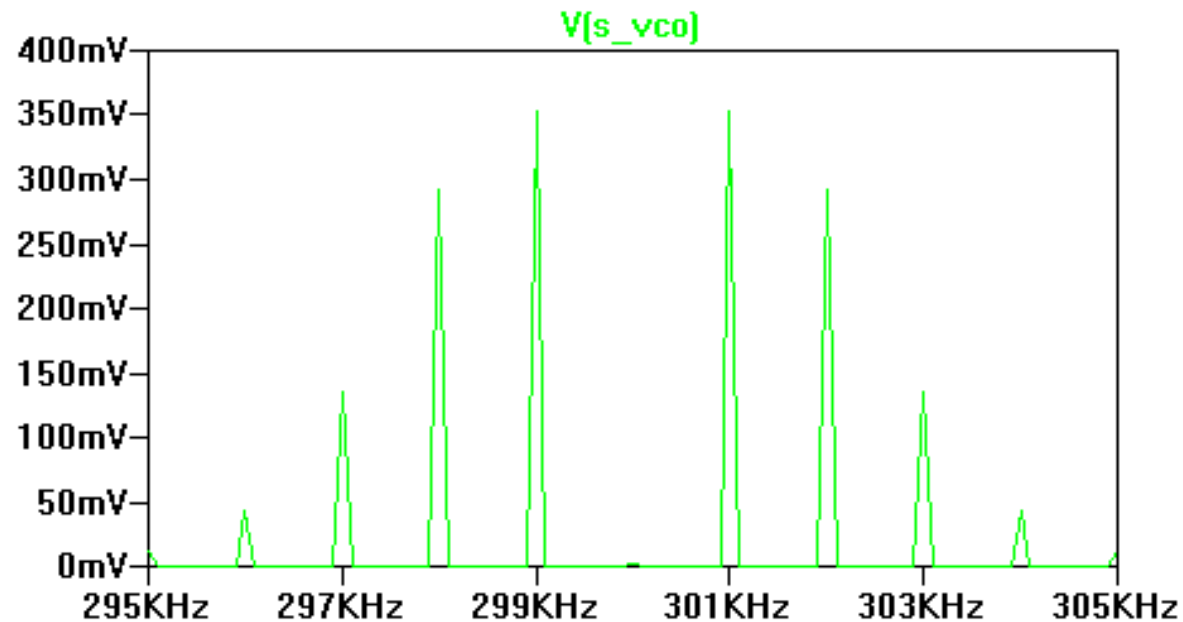
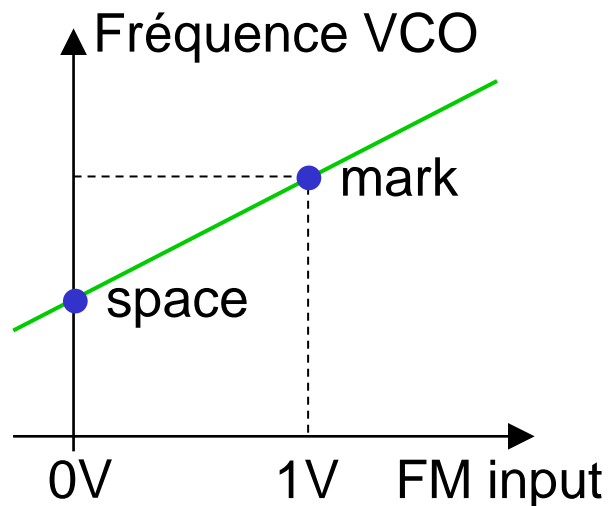
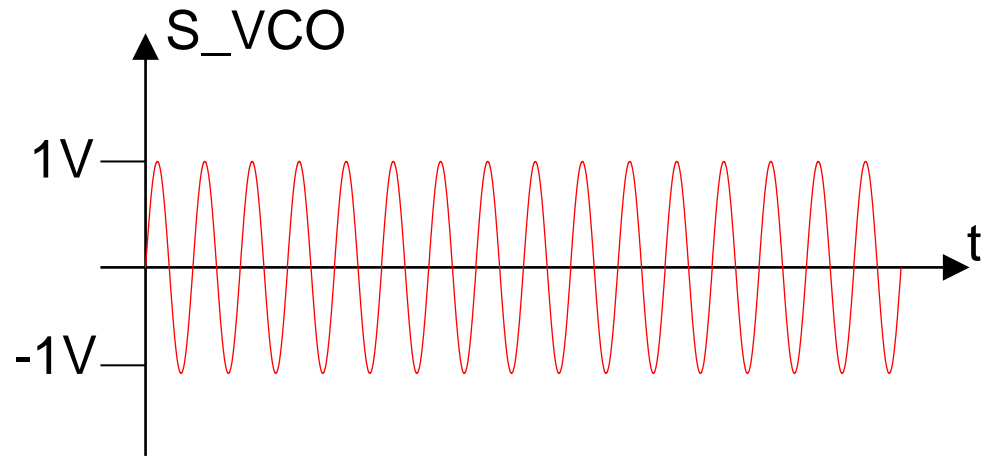
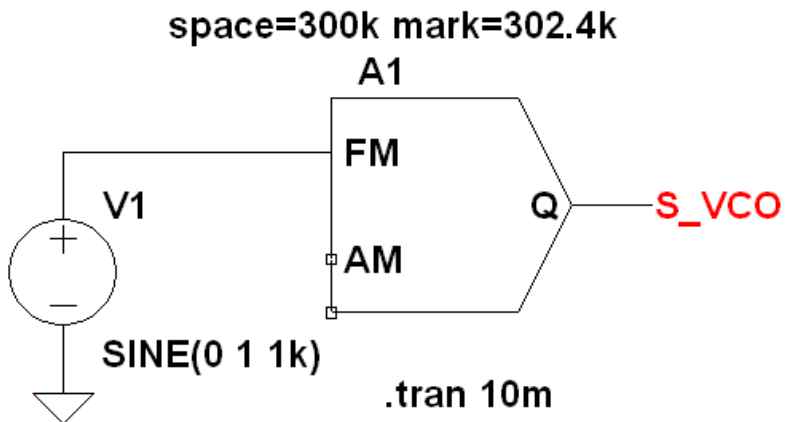


3 Exemple de mesure avec un analyseur de spectre



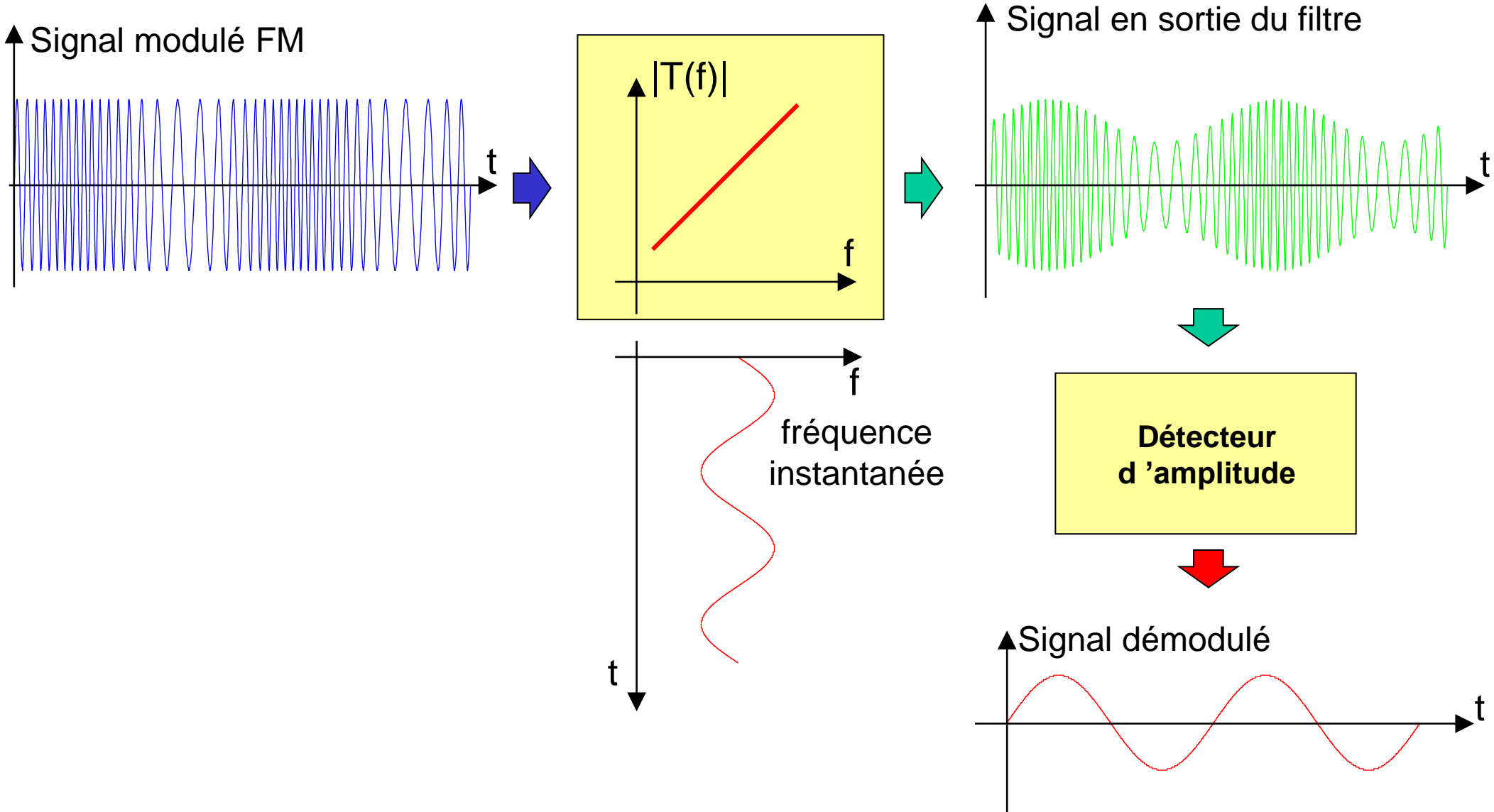
3 Simulation d'une émission FM avec LTSpice

- Un bloc complet : Modulateur



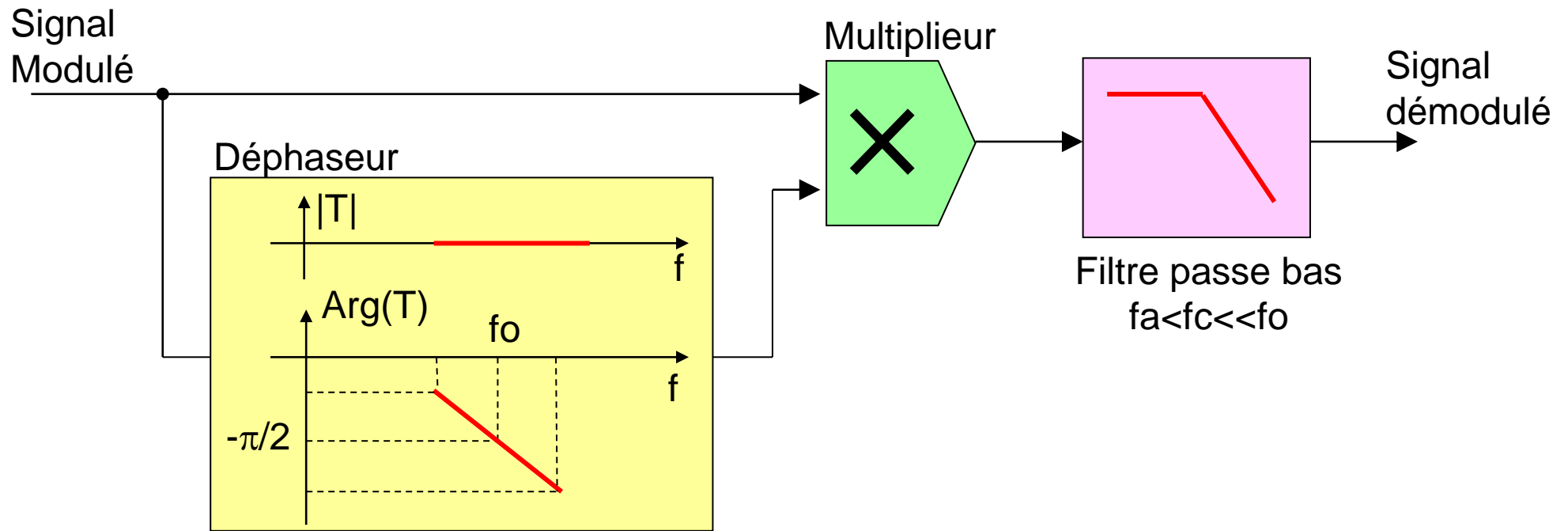
4 Démodulation de fréquence : discriminateur

Principe du discriminateur en fréquence

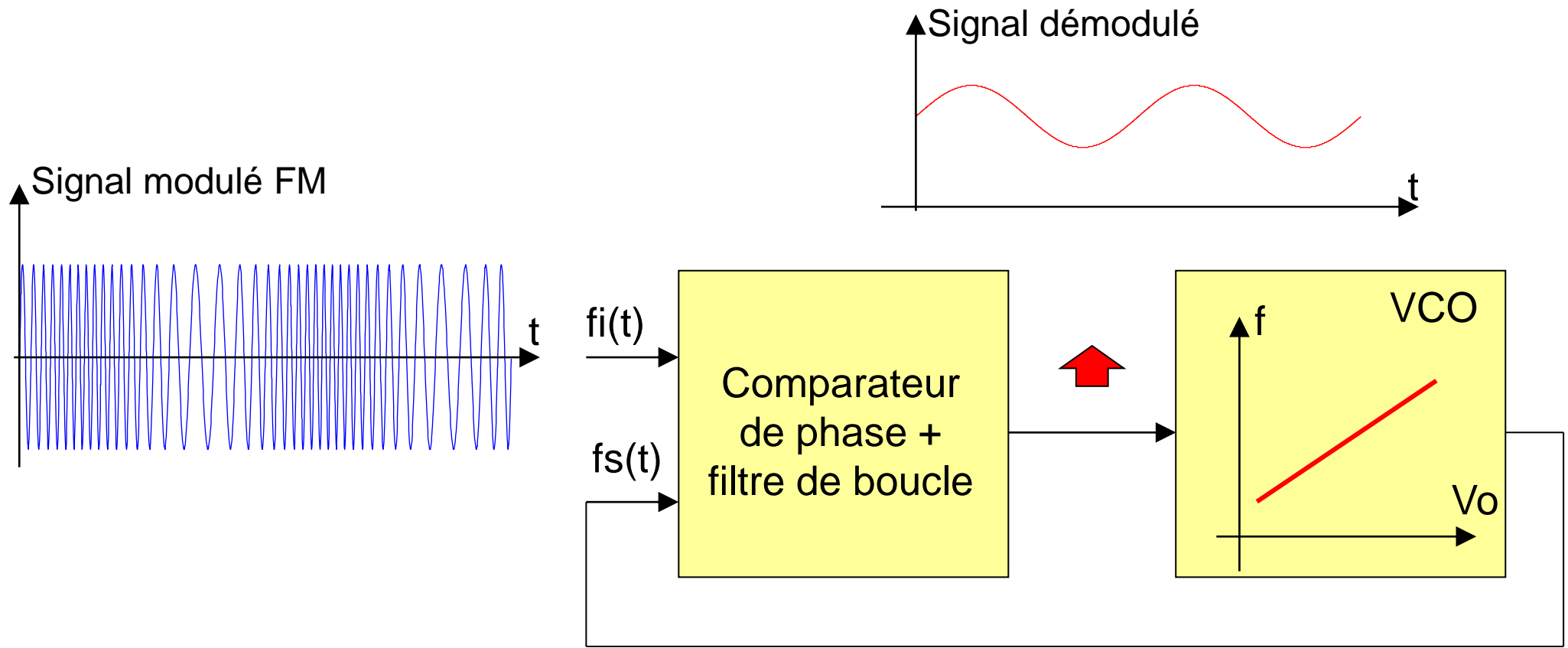


4 Démodulation de fréquence : Phase/Fréquence

Principe du démodulateur phase/fréquence



4 Démodulation de fréquence : PLL



La boucle à verrouillage de phase est un système bouclé qui permet d'asservir la fréquence instantanée d'un VCO à une fréquence d'entrée. Lorsque la boucle est verrouillée on obtient $f_s(t)=f_i(t)$. Dans ces conditions on récupère le signal modulant sur l'entrée de commande du VCO