



## Cours exposé

# TRANSMISSION

email : nasser\_baghdad @ yahoo.fr

# TRANSMISSION

## Sommaire

Chapitre I : Modulation AM

Chapitre II : Démodulation AM

Chapitre III : Modulation FM

Chapitre IV : Démodulation FM

# TRANSMISSION

## Modulation Analogique Continue

### Chapitre. III

## La modulation FM

# Chapitre III : La modulation FM

## Principe de la modulation FM

- Pour produire un signal modulé en fréquence, il faut :

$$e_0(t) = E \cos(\omega_0 t + \phi)$$

- ☐ une porteuse sinusoïdale  $e_0(t)$  :
- ☐ une information basse - fréquence  $s(t)$  qui peut être un signal audiofréquence, vidéo, analogique ou numérique

- La fréquence instantanée de la porteuse modulée varie avec  $s(t)$  :

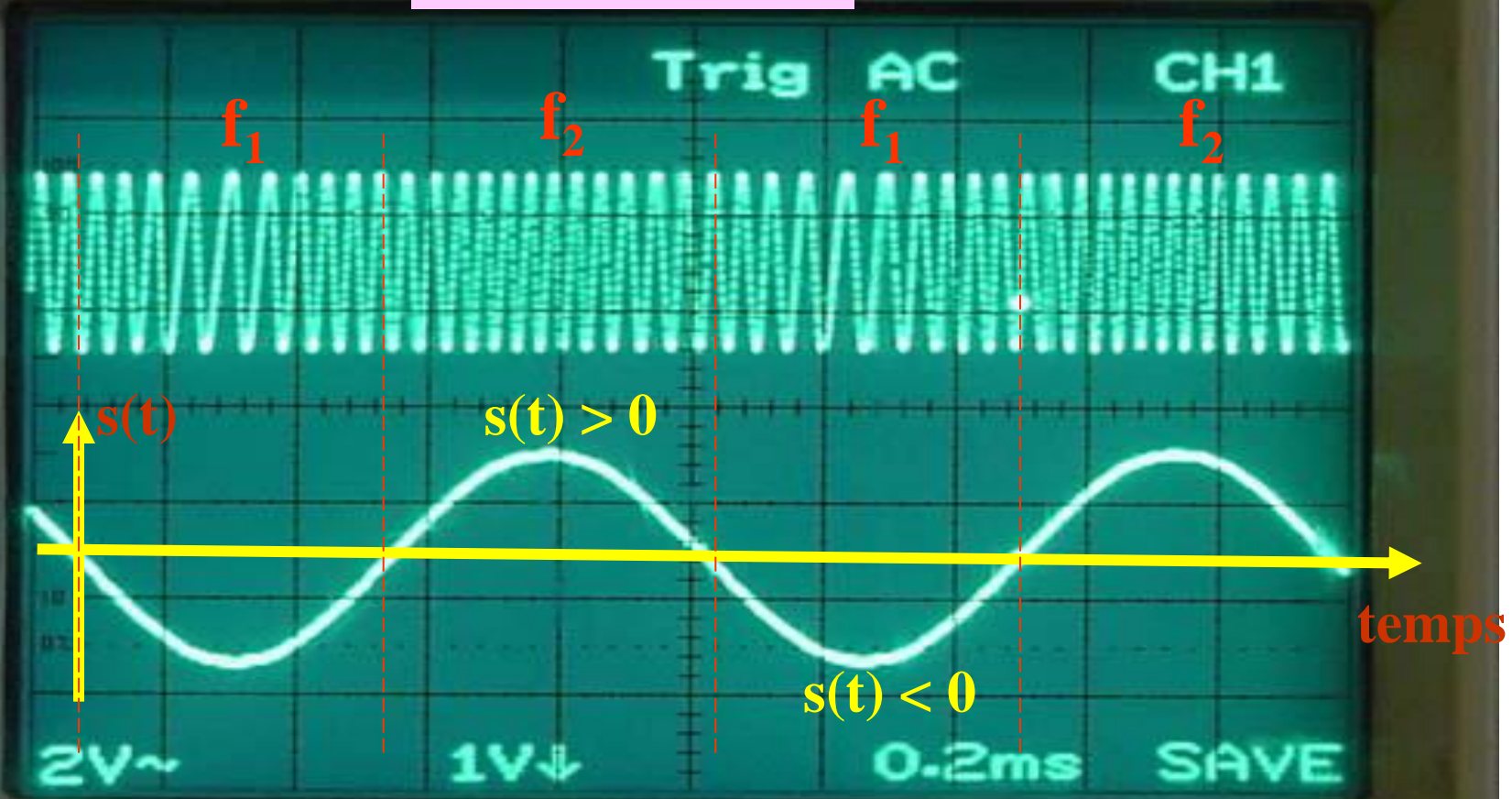
$$f(t) = f_0 + k s(t)$$

- Les principales caractéristiques du signal FM sont :

- ☐ l'amplitude de la porteuse reste constante
- ☐ si  $s(t) = 0$ , la porteuse émise est sinusoïdale de fréquence  $f_0$
- ☐ si  $s(t) < 0$ , la fréquence  $f_1$  de la porteuse est inférieure à  $f_0$
- ☐ si  $s(t) > 0$ , la fréquence  $f_2$  de la porteuse est supérieure à  $f_0$
- ☐ la variation de fréquence par rapport à  $f_0$  s'appelle la déviation

# Chapitre III : La modulation FM

$$f(t) = f_0 + k s(t)$$



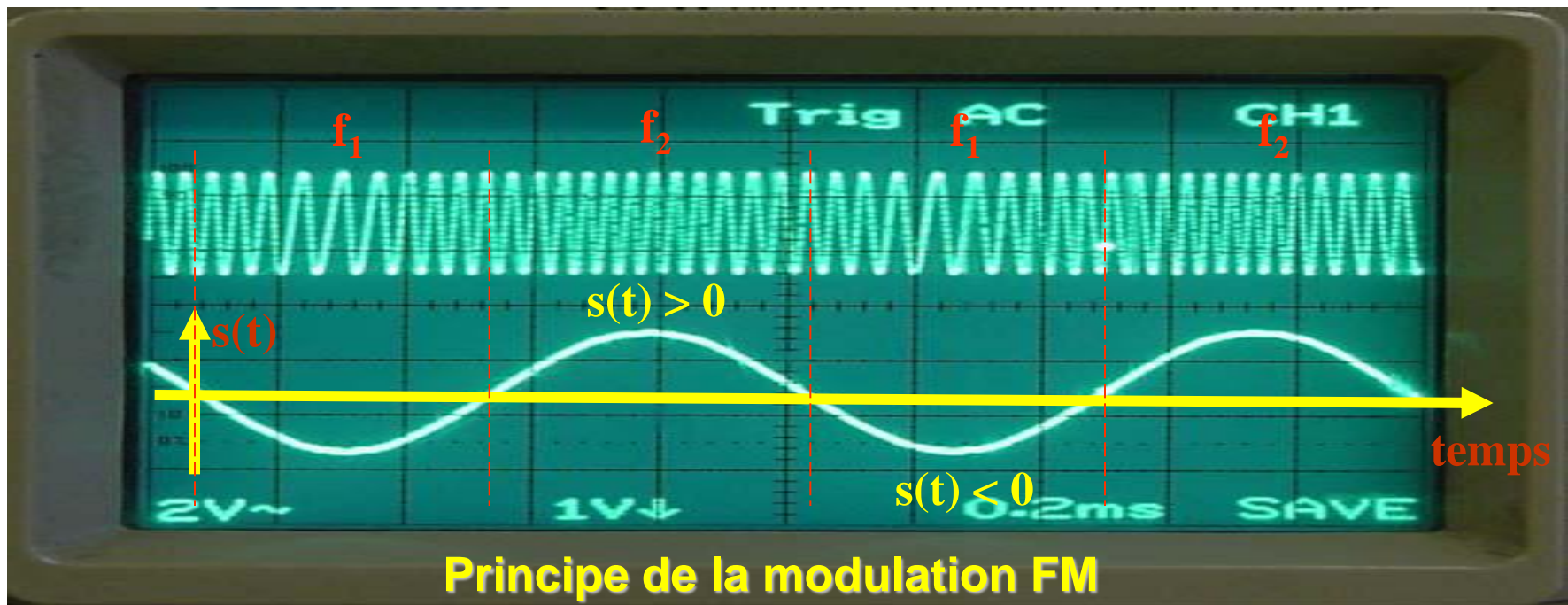
Principe de la modulation FM

# Chapitre III : La modulation FM

## Remarque :

► Quand on parle de la fréquence d'émission d'un émetteur FM, on parle toujours de la fréquence  $f_0$  de la porteuse non modulée :

- l'émetteur d'une maison d'émission radio sur 95,7 MHz
- pendant un silence, il émet une sinusoïde à  $f_0 = 95,7$  MHz
- modulé par la parole ou la musique, il émet une sinusoïde dont la fréquence est légèrement supérieure ou inférieure à  $f_0$





# Chapitre III : La modulation FM

## Les modulations angulaires

- La fréquence instantanée de la porteuse modulée FM s'écrit :

$$f(t) = f_0 + k s(t)$$

- on passe aisément de la fréquence à la pulsation instantanée :

$$\omega(t) = 2\pi f(t) = \omega_0 + 2\pi k s(t)$$

- puis à la phase en intégrant la pulsation :

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = 2\pi \int f(t) dt = \omega_0 t + 2\pi k \int s(t) dt$$

- parce que l'information  $s(t)$  est inscrite dans la phase  $\theta(t)$  (ou angle), on dit que la FM est une modulation angulaire

$$e(t) = E \cos \theta(t) = E \cos \left( \omega_0 t + 2\pi k \int s(t) dt + \phi \right) : FM$$

Remarques :

- la modulation de phase PM utilisée pour les transmissions numériques, est aussi une modulation angulaire

$$e(t) = E \cos (\omega_0 t + k s(t) + \phi) : PM$$

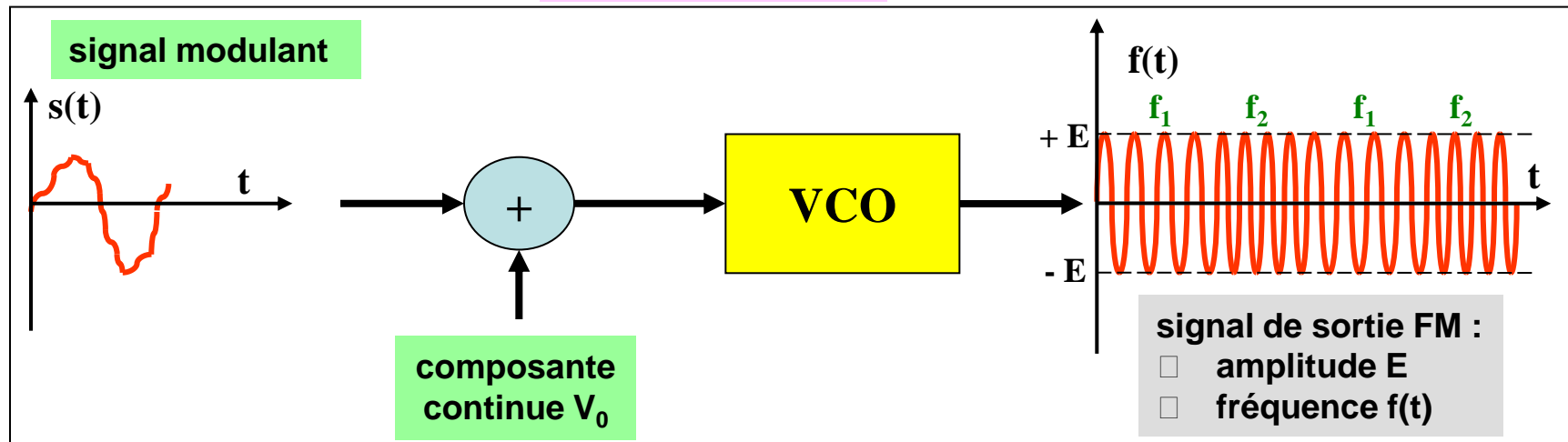
- si on intègre le signal BF avant de moduler l'émetteur PM, la modulation de phase devient une modulation de fréquence FM

# Chapitre III : La modulation FM

## Production d'un signal FM

- Pour émettre en modulation de fréquence il faut produire un signal sinusoïdal d'amplitude constante  $E$  et de fréquence  $f(t)$  variable.
- ce signal est toujours produit par un oscillateur commandé en tension (**V**oltage **C**ommanded **O**scillator : **VCO**)
- une polarisation continue  $V_0$  fixe le point de fonctionnement à  $f(t) = f_0$
- en superposant le signal basse - fréquence  $s(t)$ , on fait varier la fréquence :

$$f(t) = f_0 + k s(t)$$





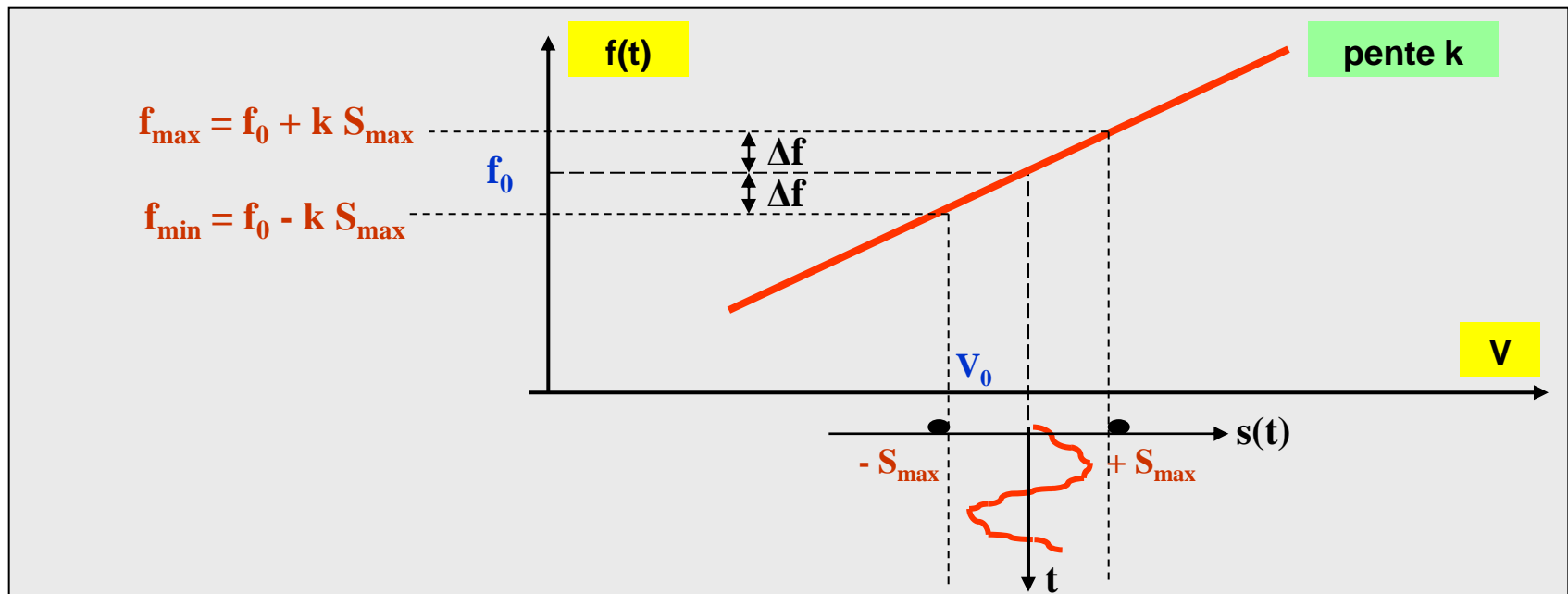
# Chapitre III : La modulation FM

## Excursion en fréquence

► Si on admet que le signal modulant ne dépasse pas  $S_{\max}$  en valeur absolue, alors :

- la fréquence de la porteuse varie entre  $f_{\max} = f_0 + k S_{\max}$  et  $f_{\min} = f_0 - k S_{\max}$
- la quantité  $k S_{\max}$  est appelée excursion en fréquence et est notée  $\Delta f$

$$\Delta f = k S_{\max}$$

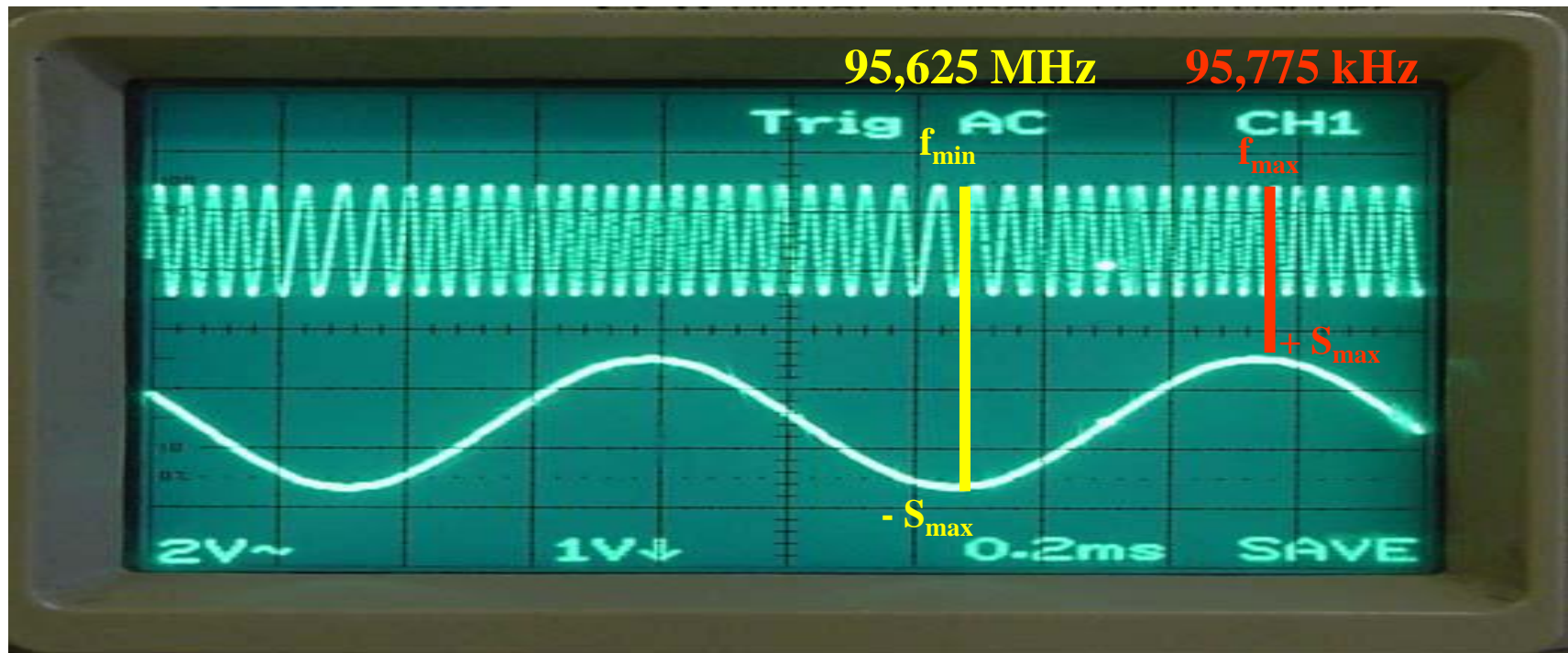


# Chapitre III : La modulation FM

## Excursion en fréquence

### Exemple :

- l'émetteur d'une maison d'émission radio est à  $f_0 = 95,7$  MHz, et l'excursion standard en radiodiffusion est  $\Delta f = +$  ou  $- 75$  kHz
- la fréquence du signal émis varie donc entre  $f_{\max} = 95,775$  MHz et  $f_{\min} = 95,625$  MHz
- la valeur  $S_{\max}$  n'est pas une limite absolue et est dépassée lors des pointes de modulation (musique *fff*, percussions ...)



# Chapitre III : La modulation FM

## Indice de modulation

► Plaçons nous dans le cas particulier où le signal modulant  $s(t)$  est sinusoïdal de fréquence  $F$  :

$$s(t) = S_{\max} \cos(\Omega t)$$

- la fréquence instantanée (d'après le principe de la FM) s'écrit :

$$f(t) = f_0 + k s(t) = f_0 + k S_{\max} \cos(\Omega t) = f_0 + \Delta f \cos(\Omega t) \quad \Delta f = k.S_{\max}$$

- la pulsation instantanée s'en déduit et s'écrit :

$$\omega(t) = 2\pi f(t) = 2\pi f_0 + 2\pi k S_{\max} \cos(\Omega t) = \omega_0 + 2\pi \Delta f \cos(\Omega t)$$

- la phase instantanée se calcule facilement :

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = \int (\omega_0 + 2\pi \Delta f \cos \Omega t) = \omega_0 t + 2\pi \Delta f \frac{\sin(\Omega t)}{\Omega}$$

- et la porteuse modulée a pour expression :

$$e(t) = E \cos(\theta(t)) = E \cos\left(\omega_0 t + \frac{\Delta f}{F} \sin 2\pi F t\right) = E \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t)$$

- On définit l'indice de modulation par :  $m = \frac{\Delta f}{F}$

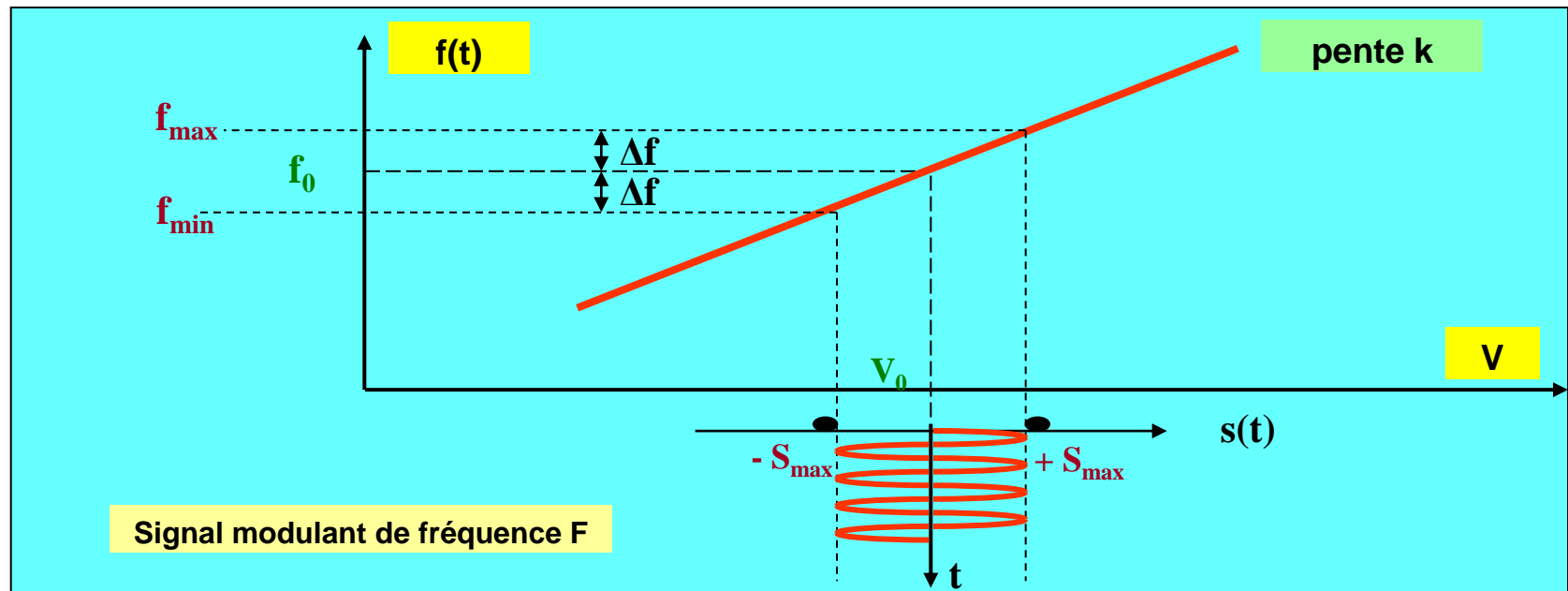
► Pour une fréquence modulante  $F$  donnée, l'indice de modulation augmente donc avec l'excursion en fréquence.

# Chapitre III : La modulation FM

## Indice de modulation

### Exemples :

- les émissions FM dans la bande CB sont dites à faible excursion : avec  $\Delta f = \pm 1$  kHz et  $F = 1$  kHz, alors  $m = 1$
- les émissions de radiodiffusion dans la bande FM sont à excursion moyenne : avec  $\Delta f = \pm 75$  kHz et  $F = 10$  kHz, alors  $m = 7$
- les satellites TV travaillent à forte excursion dans la bande des 10 GHz : si  $\Delta f = \pm 9$  MHz et  $F = 1$  MHz alors  $m = 9$



# Chapitre III : La modulation FM

## Spectre d'un signal FM

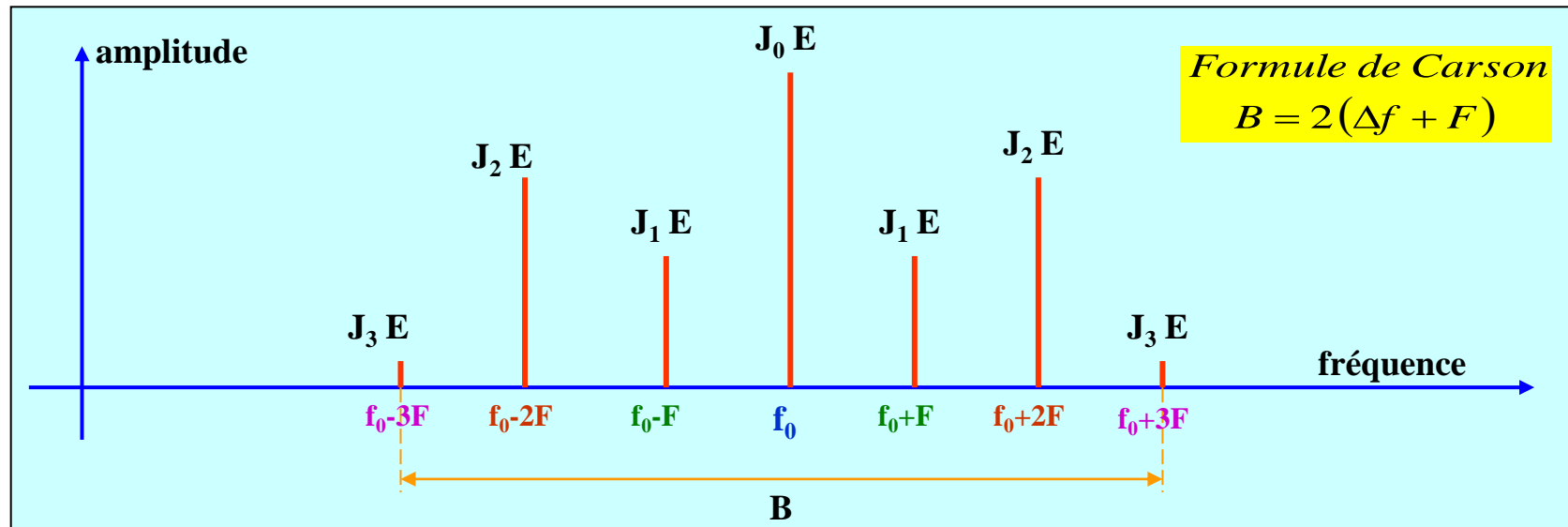
► Le spectre d'un signal FM est complexe et ne se calcule que dans le cas particulier où le signal basse - fréquence est sinusoïdal.

► La porteuse modulée s'écrit dans ce cas :  $e(t) = E \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t)$

► Elle peut, dans ce cas particulier, se décomposer grâce aux fonctions de Bessel :

$$e(t) = E.J_0(m).\cos(\omega_0 t + \varphi_0) + E.J_1(m).\cos((\omega_0 \pm \Omega)t + \varphi_1) + E.J_2(m).\cos((\omega_0 \pm 2\Omega)t + \varphi_2) + \dots$$

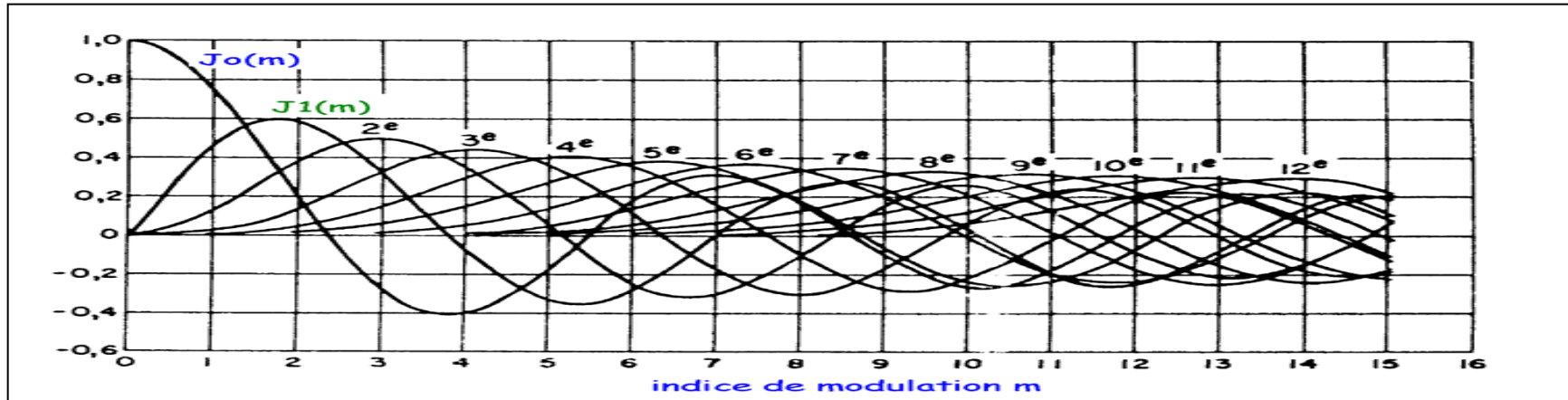
où  $J_0(m)$ ,  $J_1(m)$ ,  $J_2(m)$ ... sont les fonctions de Bessel dont la valeur dépend de  $m$ .



# Chapitre III : La modulation FM

## Les fonctions de Bessel

► Les fonctions de Bessel sont données sous forme de courbes paramétrées en m ou par un tableau donnant les valeurs des fonctions pour quelques valeurs particulières de m.



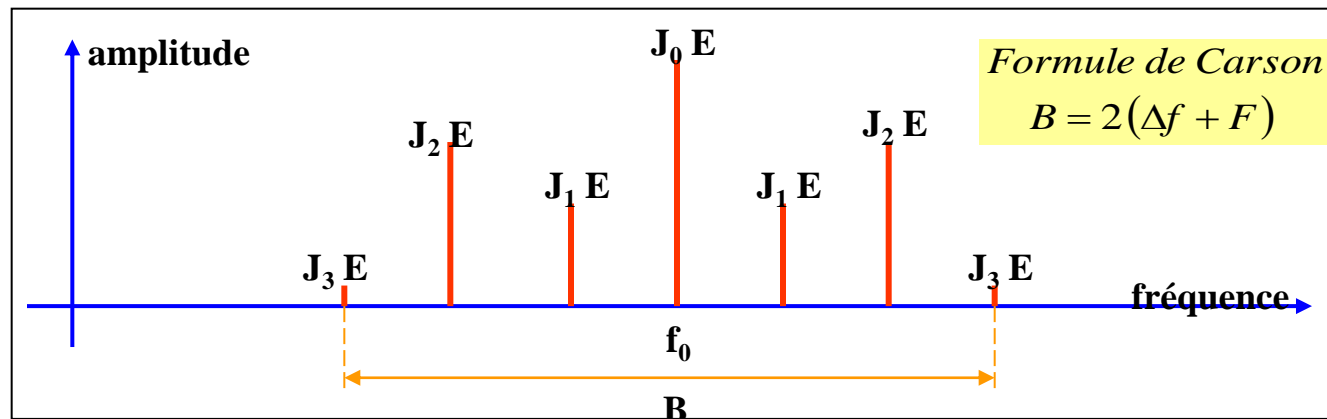
m	$J_0$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$	$J_9$	$J_{10}$
0,00	1,00										
0,25	0,98	0,12									
0,5	0,94	0,24	0,03								
1,0	0,77	0,44	0,11	0,02							
1,5	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01						
2,0	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03						
2,5	-0,05	0,50	0,45	0,22	0,07	0,02					
3,0	-0,26	0,34	0,49	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

# Chapitre III : La modulation FM

## Spectre d'un signal FM

► Une porteuse  $f_0$  modulée par un signal basse-fréquence sinusoïdal de fréquence  $F$  a un spectre caractérisé par :

- une raie à la fréquence de la porteuse  $f_0$  d'amplitude  $J_0 E$
- deux raies à  $f_0 + F$  et  $f_0 - F$  d'amplitude  $J_1 E$  , deux raies à  $f_0 + 2F$  et  $f_0 - 2F$  d'amplitude  $J_2 E$  ...
- le spectre est donc centré sur  $f_0$  et symétrique et la bande occupée  $B$  se mesure sur le spectre
- si  $m > 4$ ,  $B$  peut être calculée par la formule de Carson qui donne une estimation de  $B$  à 98% de la puissance totale

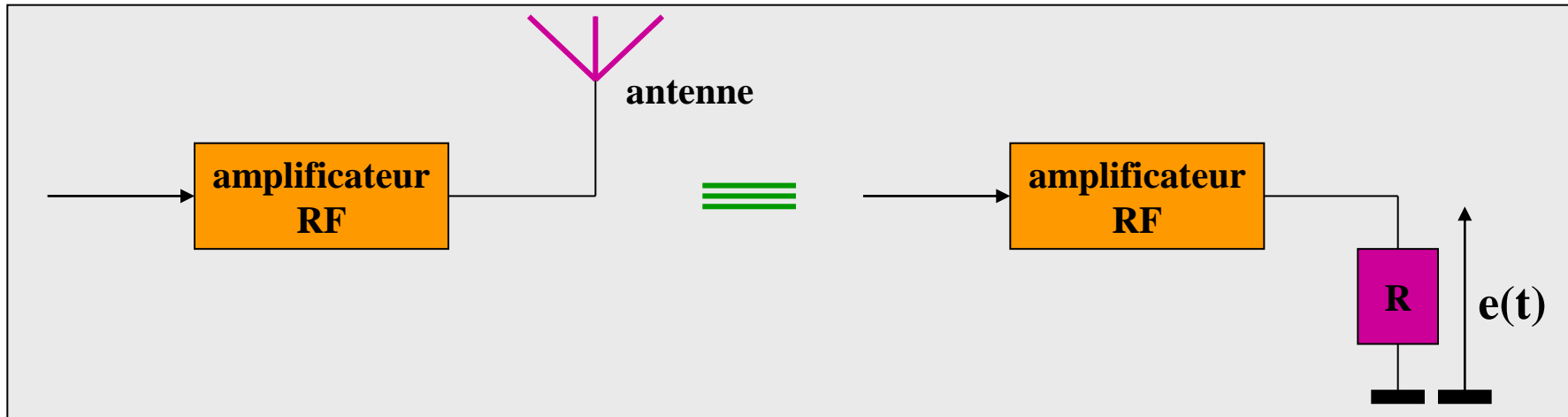




# Chapitre III : La modulation FM

## Puissance transportée par un signal FM

- Le signal FM est appliqué à l'antenne qui se comporte vis-à-vis de l'amplificateur de sortie comme une charge résistive R :



- le signal appliqué à l'antenne est constitué d'une tension sinusoïdale de fréquence variable :

$$e(t) = E \cos\left(\omega_0 t + 2\pi k \int s(t) dt\right)$$

- la puissance dissipée dans une résistance ne dépend pas de la fréquence et vaut :

$$P = \frac{\left(\frac{E}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{E^2}{2R}$$

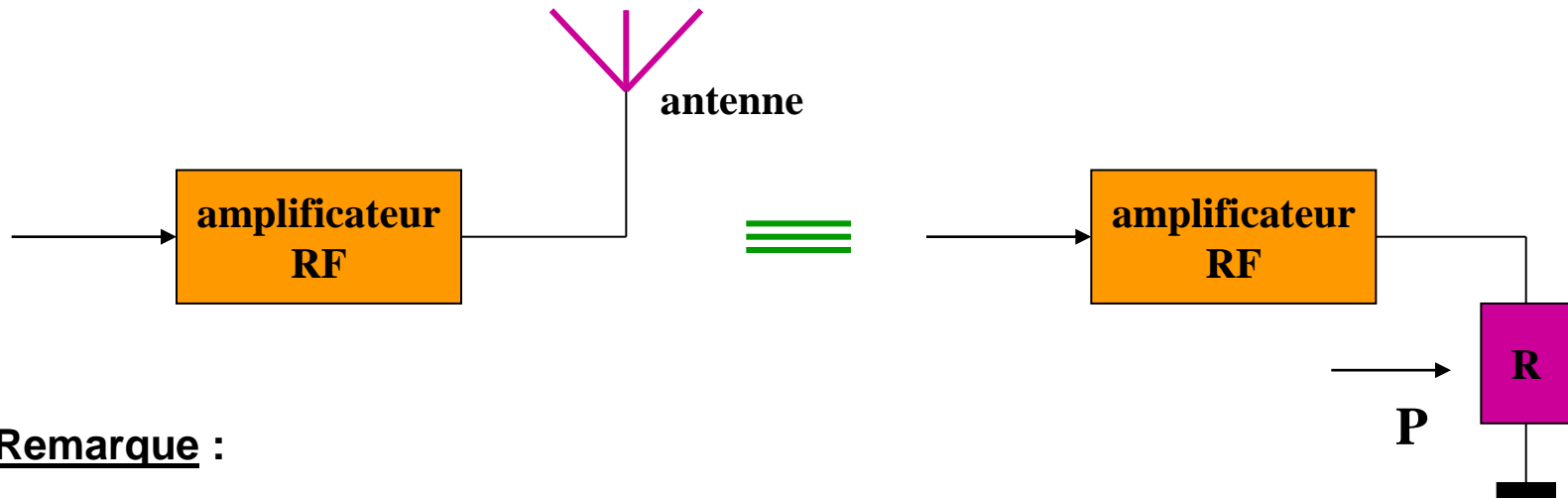
# Chapitre III : La modulation FM

## Puissance transportée par un signal FM

### Exemple :

$E = 50V$ ,  $f_0 = 100 \text{ MHz}$ ,  $\Delta f = \pm 75 \text{ kHz}$ , antenne  $R = 50\Omega$

La puissance totale émise vaut :  $P = E^2/2R = 25 \text{ W}$

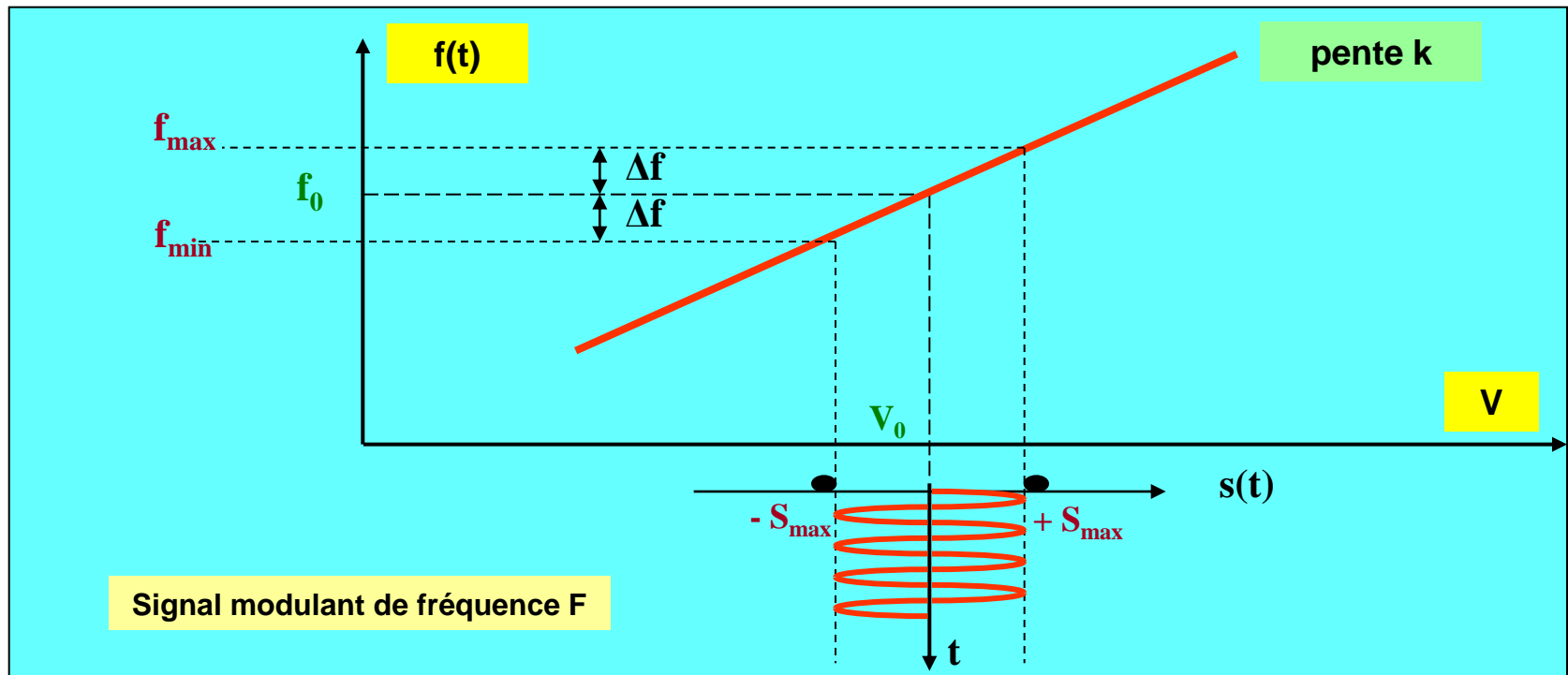
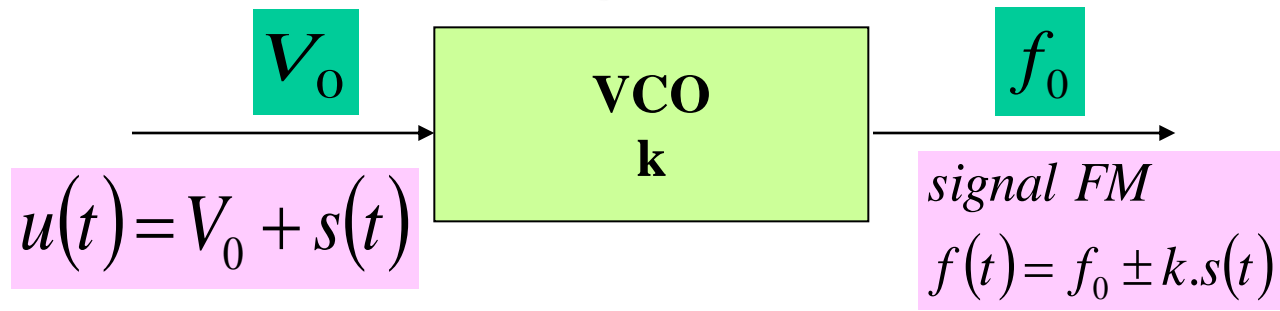


### Remarque :

- les émetteurs FM émettent en permanence une puissance constante, même en l'absence de signal modulant
- ils ne sont donc pas particulièrement économiques au niveau de leur consommation, sauf si on prévoit une interruption de l'émission durant les silences (cas du GSM)

# Chapitre III : La modulation FM

## Principe du VCO

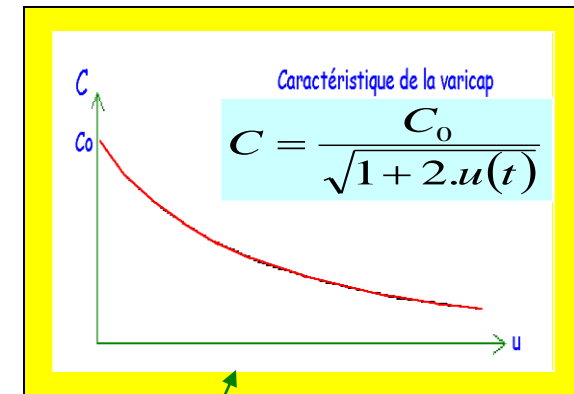
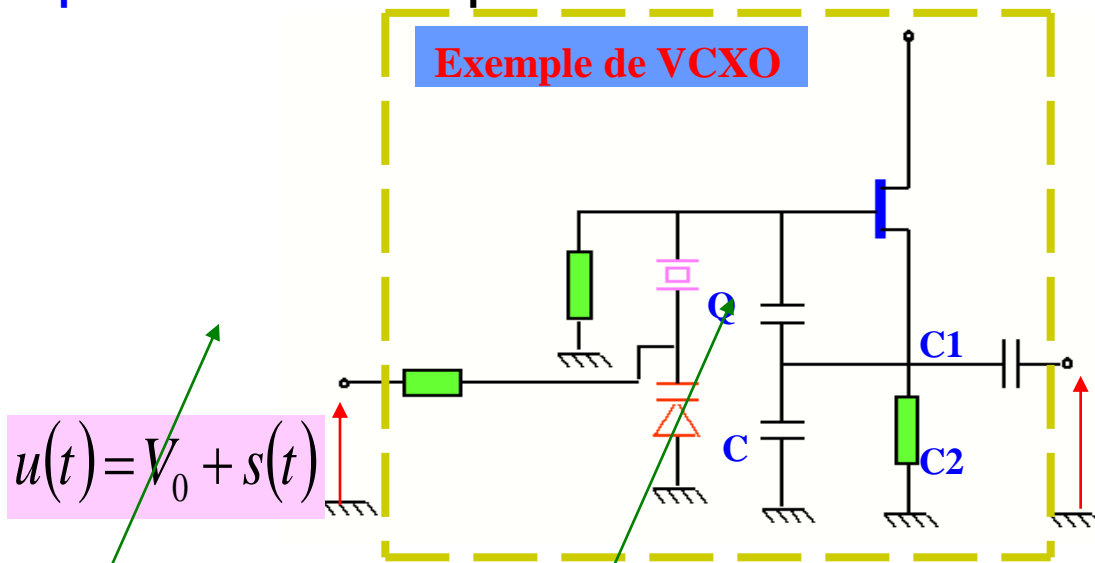


# Chapitre III : La modulation FM

## Modulateur FM à quartz

► Pour stabiliser la fréquence centrale  $f_0$  du modulateur FM, on peut utiliser un oscillateur à quartz commandé en tension :

- l'oscillateur s'appelle alors **VCXO** (*Voltage Commanded Xtal Oscillator*)
- la variation de fréquence se fait en utilisant une diode varicap
- la varicap a une capacité de jonction  $C$  qui dépend de la tension inverse appliquée  $u(t)$
- la fréquence d'oscillation est déterminée par les caractéristiques du quartz et la capacité  $C$  de la varicap

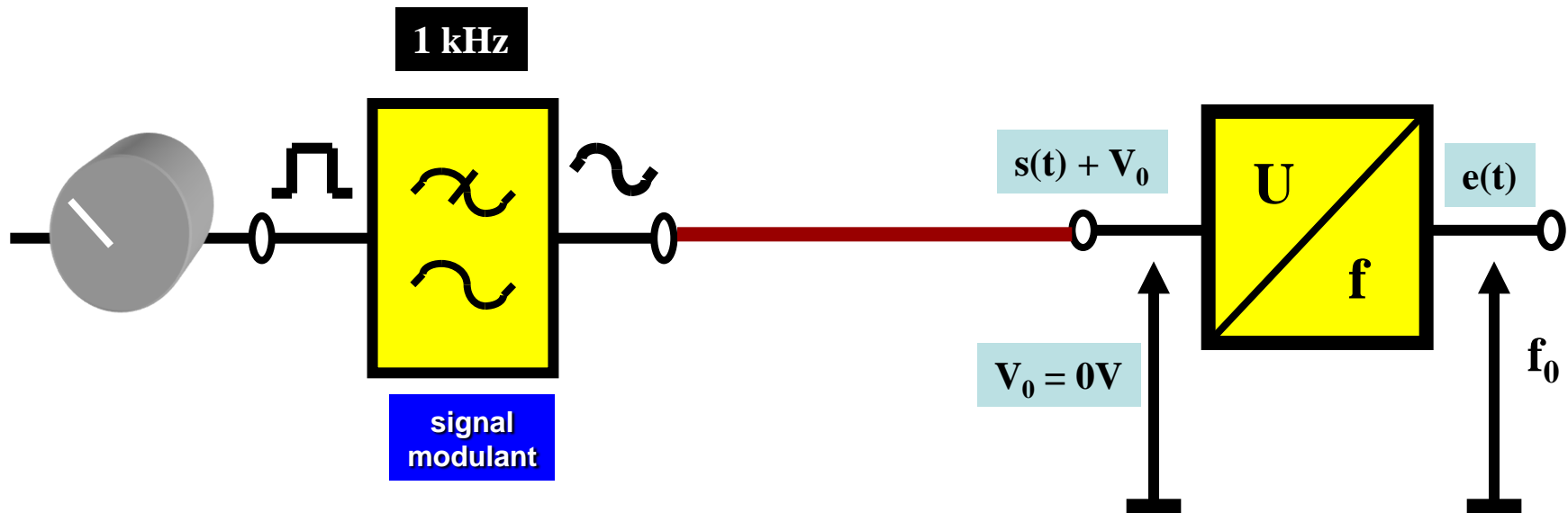


signal FM

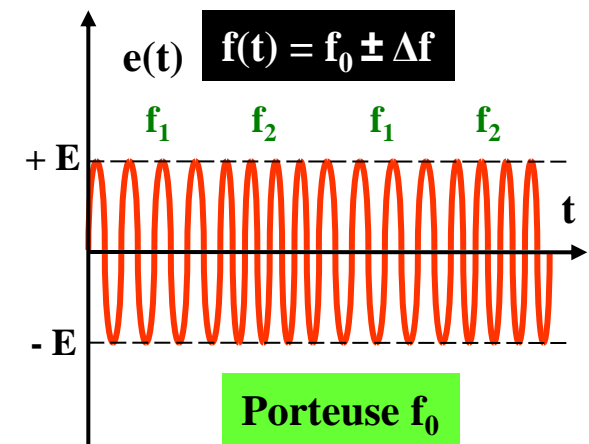
$$f(t) = f_0 + k.s(t)$$

# Chapitre III : La modulation FM

Production d'un signal FM avec une porteuse  $f_0$

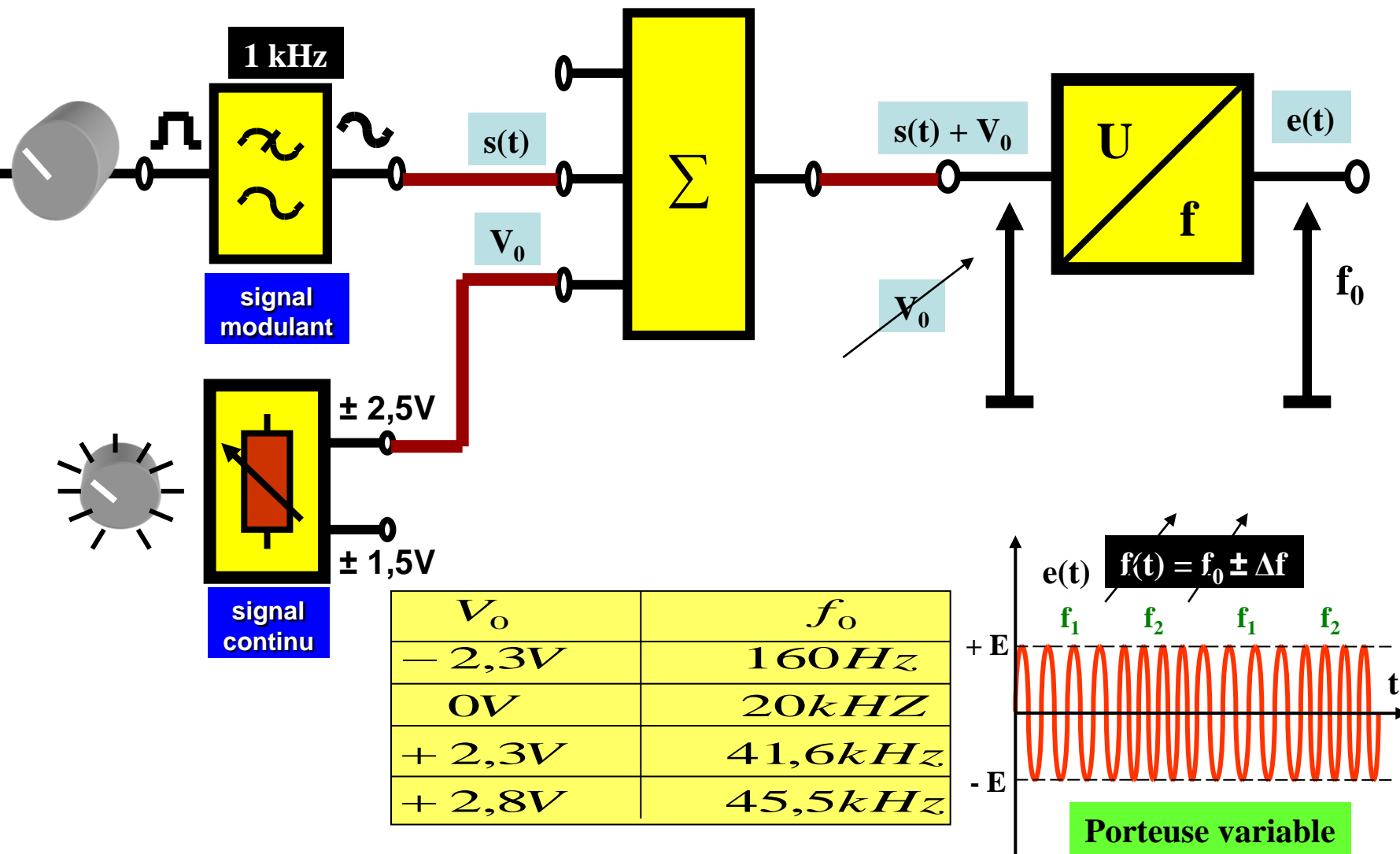


$V_0$	$f_0$	$f_1$	$f_2$
0V	20kHz	$f_0 - \Delta f$	$f_0 + \Delta f$



# Chapitre III : La modulation FM

## Production d'un signal FM avec plusieurs porteuses



# Travaux dirigés

## Exercice n°1

► On considère le signal modulé en fréquence dont l'expression est :

$$e(t) = 10 \cos[6283200 t - 5\cos(3141 t)]$$

Déterminer :

- 1) l'expression de sa fréquence instantanée  $f(t)$
- 2) la fréquence  $f_0$  de la porteuse
- 3) la fréquence  $F$  du signal modulant
- 4) l'excursion en fréquence  $\Delta f$
- 5) l'indice de modulation  $m$
- 6) l'allure du spectre du signal modulé
- 7) son encombrement spectral  $B$
- 9) sa puissance sur une antenne  $R = 50 \Omega$

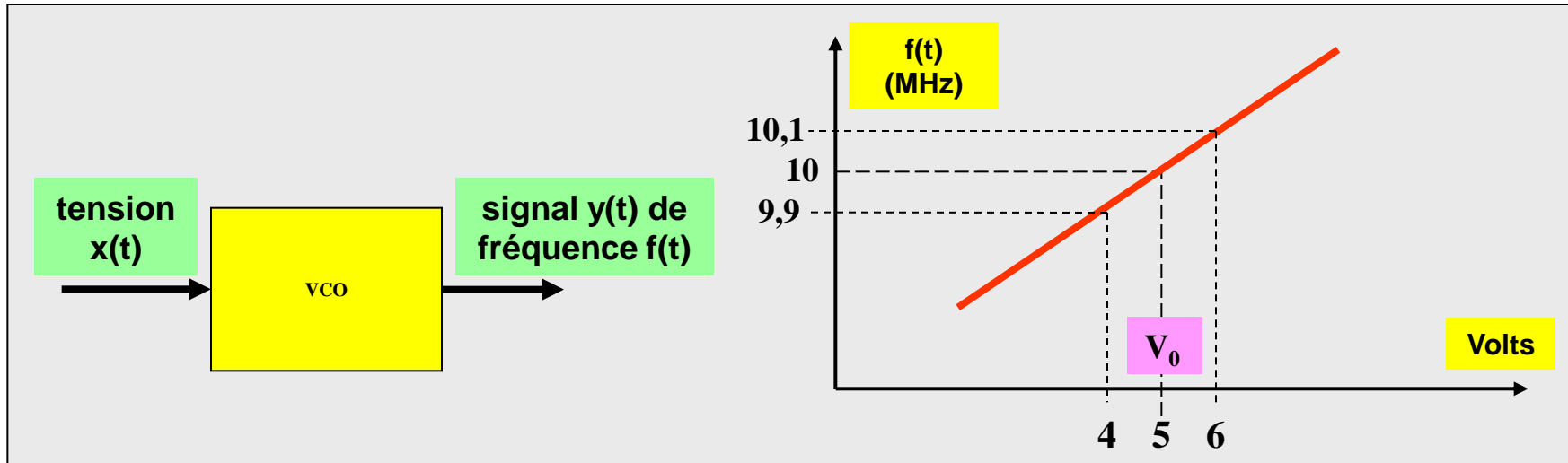




# Travaux dirigés

## Exercice n°2

► Pour fabriquer un signal modulé en fréquence, on utilise un VCO ayant la caractéristique suivante :



On applique à l'entrée de ce VCO le signal  $x(t) = 5 + 0,5\cos(2\pi F t)$  avec  $F = 10$  kHz.

- 1) Calculer la fréquence centrale  $f_0$  du signal en sortie et son excursion en fréquence  $\Delta f$ .
- 2) En déduire l'indice de modulation  $m$ . Les fréquences  $f_{\max}$  et  $f_{\min}$ . Expression de  $y(t)$ .
- 3) Sachant que le VCO fournit en sortie une tension d'amplitude 5V, tracer le spectre du signal  $y(t)$  produit par le VCO et en déduire la largeur de bande  $B$  occupée par ce signal.
- 4) Ce signal est envoyé sur l'antenne de résistance  $R = 50\Omega$  après avoir traversé un ampli de gain  $G = 40$  dB. Calculer la puissance totale émise  $P$ .
- 5) Expression d'une PM. Comparaison des deux modulations PM et FM

# Travaux dirigés

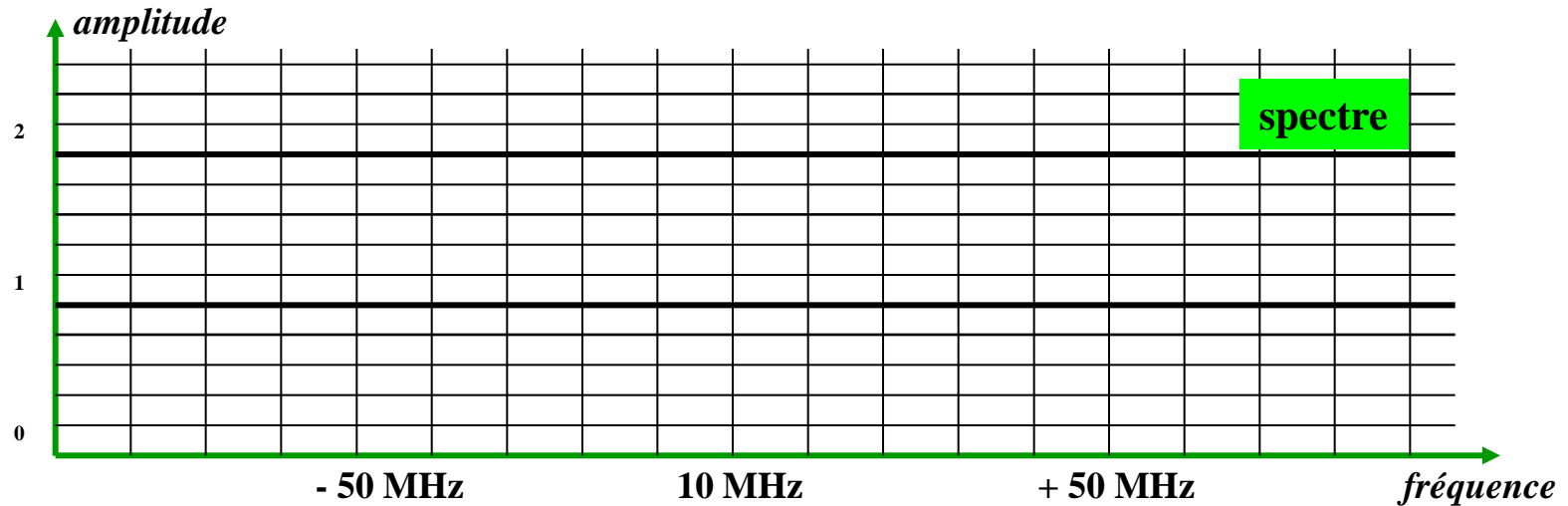


Tableau des fonctions de Bessel

m	J <sub>0</sub>	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>	J <sub>7</sub>	J <sub>8</sub>	J <sub>9</sub>	J <sub>10</sub>
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

# Travaux dirigés

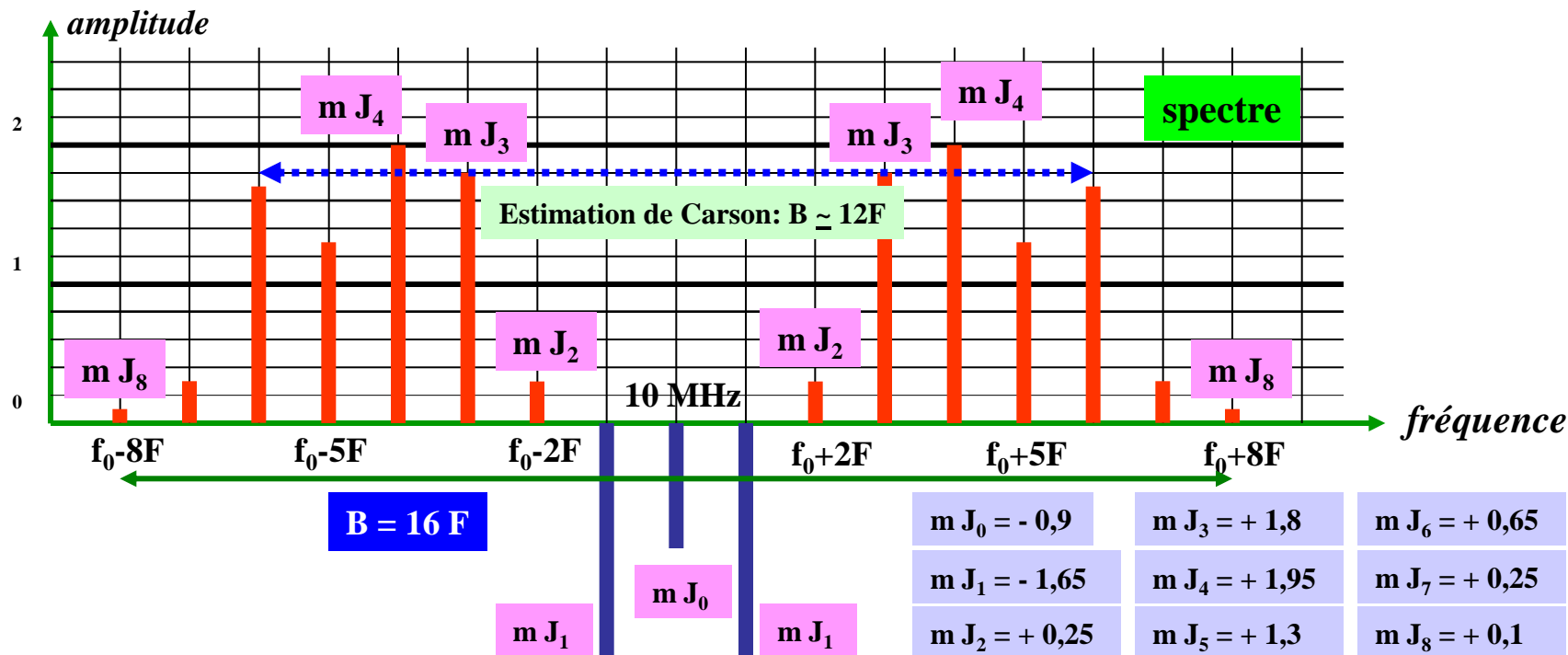


Tableau des fonctions de Bessel

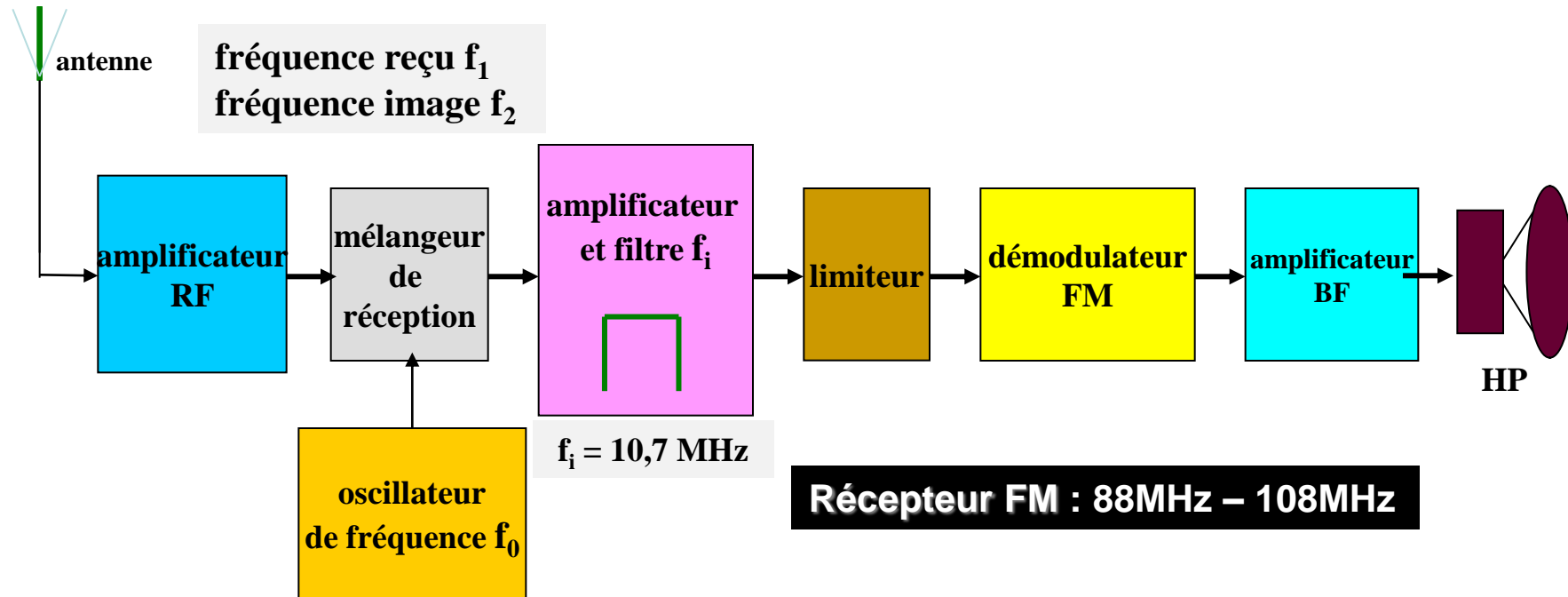
m	J <sub>0</sub>	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>	J <sub>7</sub>	J <sub>8</sub>	J <sub>9</sub>	J <sub>10</sub>
0,00	1,00										
0,25	0,98	0,12									
0,5	0,94	0,24	0,03								
1,0	0,77	0,44	0,11	0,02							
1,5	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01						
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

# Travaux dirigés

## Exercice n°3

Un récepteur FM est destiné à recevoir les émissions de la bande FM ayant les caractéristiques suivantes :

- fréquence  $f_1$  de la porteuse comprise entre 88 et 108 MHz
- signal BF limité à  $F_{\max} = 15$  kHz
- largeur de bande maximale occupée par le spectre du signal modulé  $B_0 = 300$  kHz



# Travaux dirigés

*On décide de placer l'oscillateur local en-dessous de la fréquence à recevoir et le filtre fi est un filtre céramique standard centré sur  $f_i = 10,7$  MHz.*

- 1) On souhaite recevoir Radio Mars émettant sur Essaouira à  $f_1 = 95,7$  MHz. Calculer la valeur de l'oscillateur local  $f_0$  et la fréquence image de Radio Mars  $f_2$ .*
- 2) Que faut-il prévoir pour éviter la réception d'une éventuelle émission à la fréquence image ? Quelles doivent être les caractéristiques du filtre d'entrée ? du filtre de fréquence intermédiaire ?*
- 3) Pour recevoir la totalité de la bande FM, quelle doit être la plage de fréquences couverte par l'oscillateur local ?*
- 4) Quelle est la bande image de la bande FM ?*
- 5) Quel est le rôle du limiteur ? A quelle fréquence travaille le démodulateur si on reçoit Radio Mars ? et si on reçoit Hit Radio à 91,6 MHz ? Quelle doit être la bande passante de l'amplificateur basse-fréquence ?*