

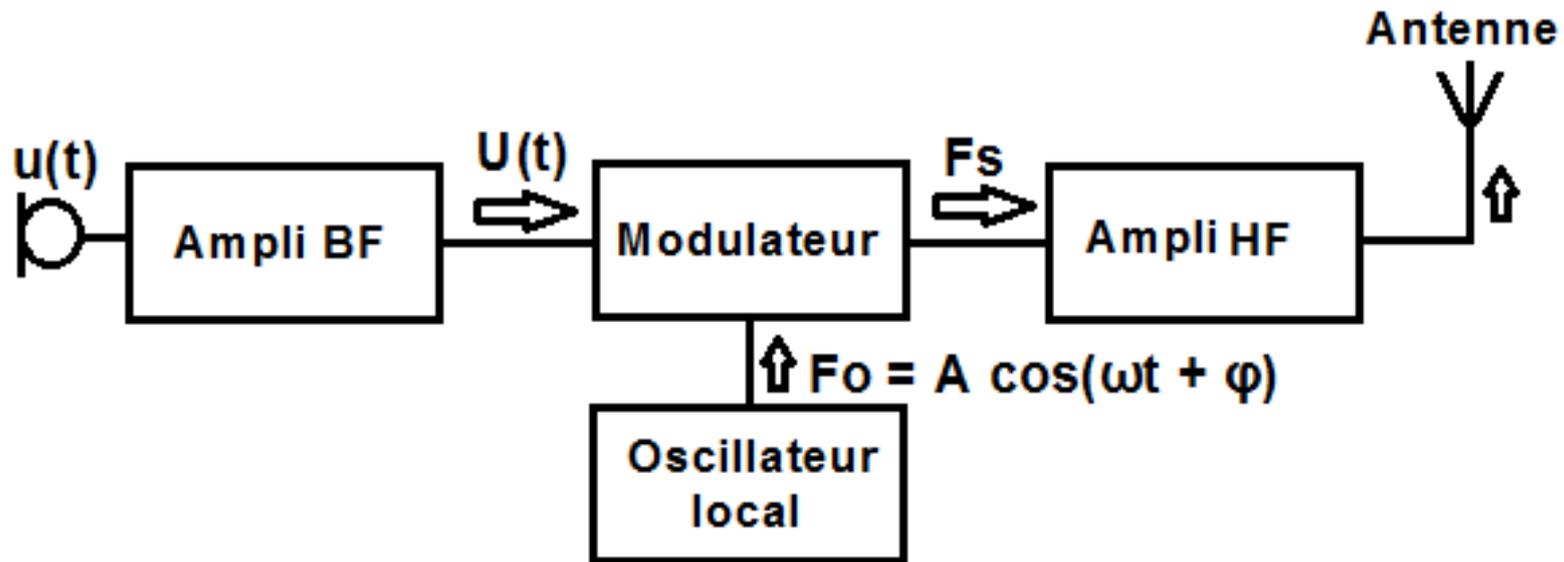
# Les modulations

**La modulation permet de transposer un signal portant une information à basse fréquence vers une fréquence plus élevée qui pourra se propager sous forme d'une onde électromagnétique.**

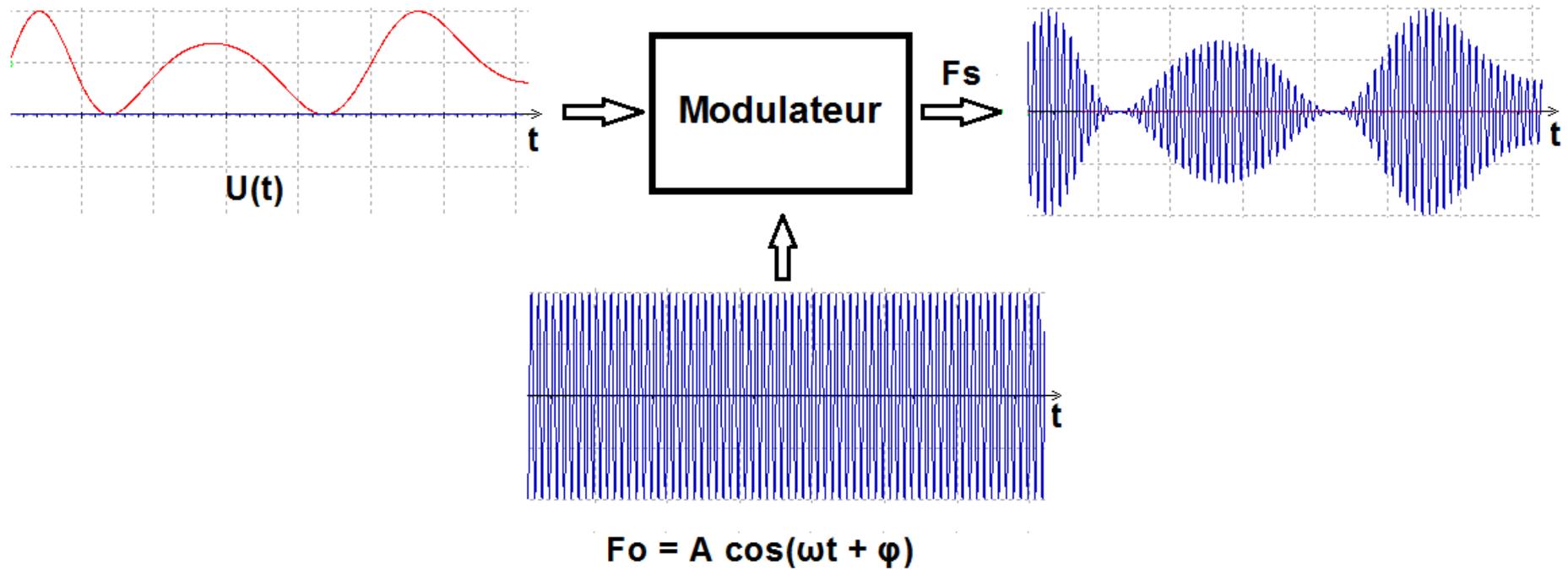
**L'information à basse fréquence peut être analogique (signal vocal provenant d'un microphone) ou numérique (codage d'une télécommande).**

**Parmi les différents types de modulations existantes on va étudier la modulation d'amplitude et la modulation de fréquence.**

# Emission en modulation d'amplitude



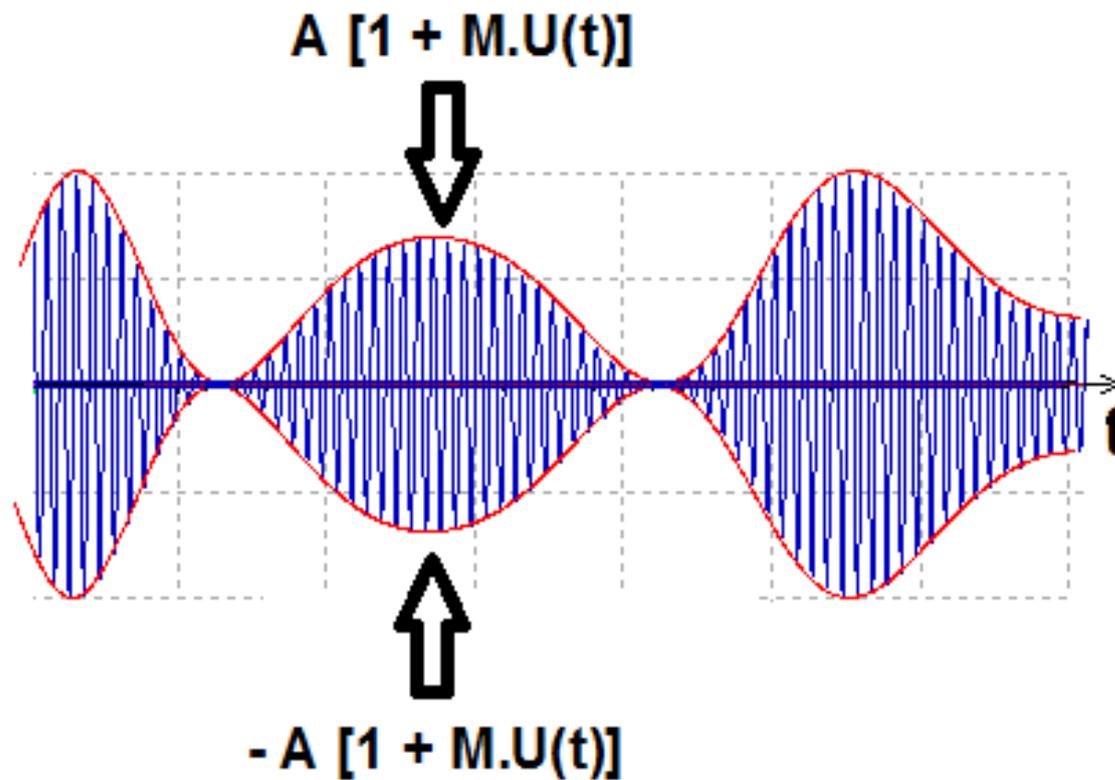
# Production du signal AM



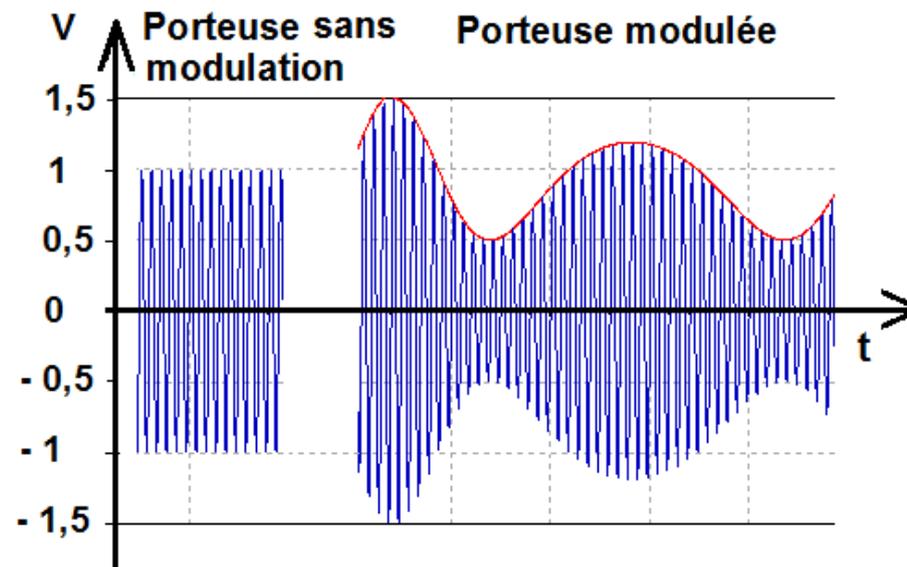
# Principe du modulateur

- L'information à transmettre est le signal BF  $U(t)$ .  
L'oscillateur local génère la fréquence porteuse  
 $F_o = A \cos(\omega t + \varphi)$  avec  $\omega = 2\pi F$
- Le modulateur va produire le signal:  
 $F_s = A [1 + M.U(t)] \cos(\omega t + \varphi)$
- $A \cos(\omega t + \varphi)$  est la fréquence porteuse.
- $[1 + M.U(t)]$  est la modulation de l'amplitude.
- $M$  est un coefficient qui va déterminer l'indice de modulation.

# Enveloppe de l'onde modulée



# Indice de modulation



Max avec modulation: 1,5V

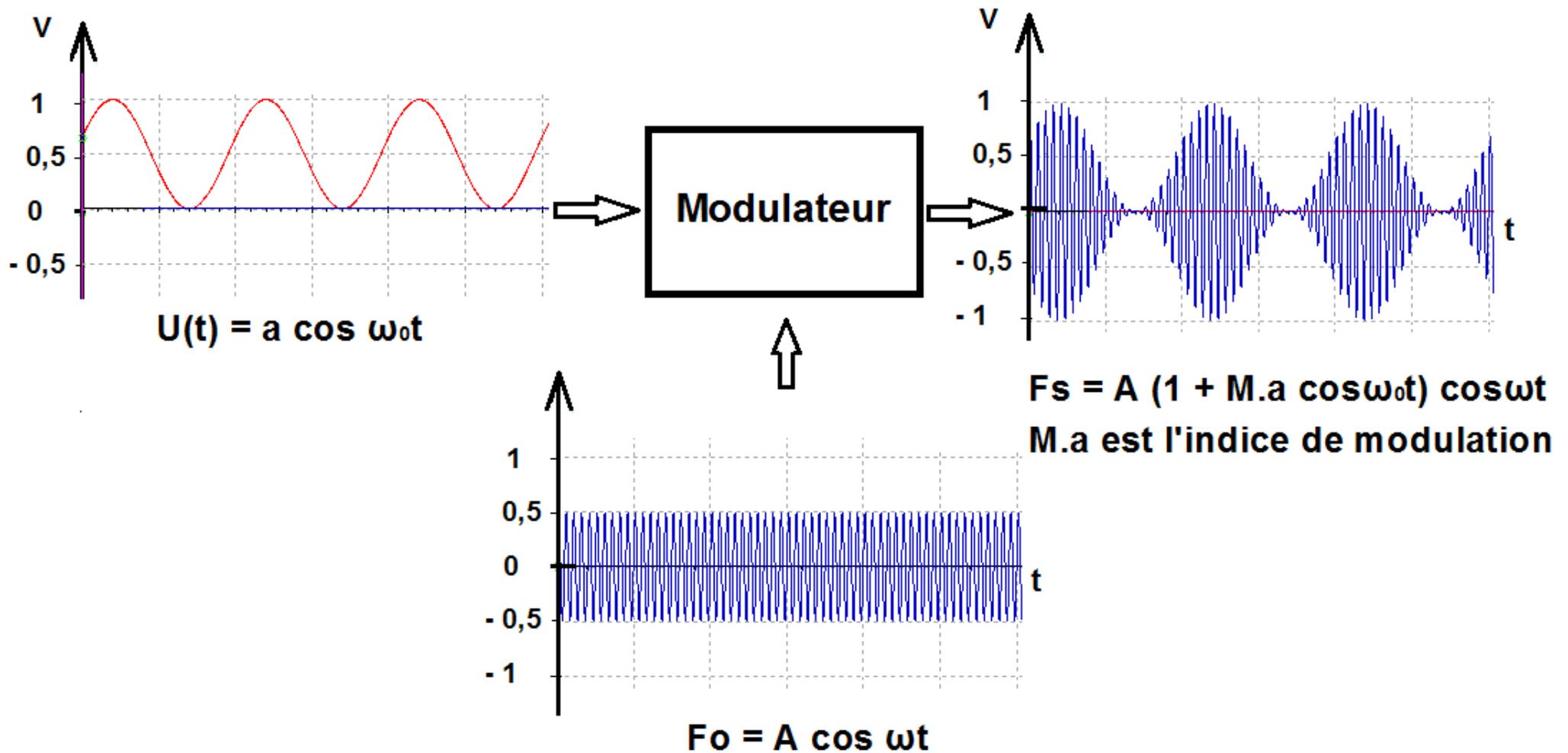
Min avec modulation: 0,5V

$V_{\max} / V_{\min} = 3$

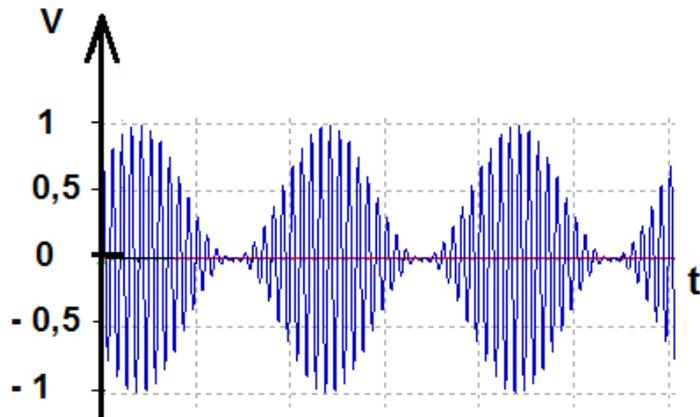
Indice de modulation =  $\frac{1,5 - 0,5}{1,5 + 0,5} = 0,5$

soit un taux de modulation de 50%

# Signal modulant sinusoïdal

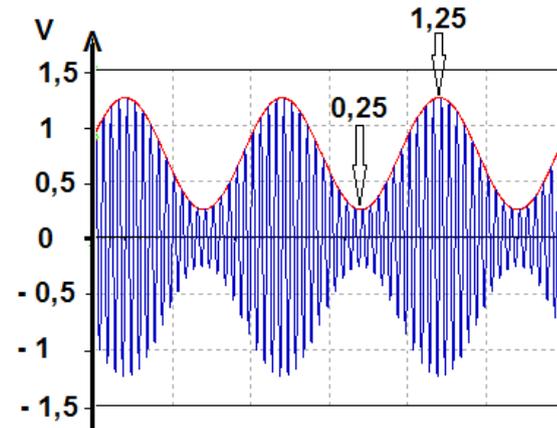


# Applications numériques



Quel est l'indice de modulation ?

1



Quel est le taux de modulation ?

66,6%

# Spectre du signal AM

Si la modulation BF est sinusoïdale l'équation du signal AM est  $F_s = A (1 + M.a \cos\omega_0 t) \cos\omega t$

On suppose un taux de modulation de 100% on a :

$$F_s = A (1 + \cos\omega_0 t) \cos\omega t$$

En développant :

$$F_s = A \cos \omega t + A/2 [\cos(\omega+\omega_0)t] + A/2 [\cos(\omega-\omega_0)t]$$

Le signal AM en sortie comporte trois termes.

Le premier est la fréquence porteuse  $F_0$ .

Les deux autres correspondent aux fréquences  $F_1$  &  $F_2$  avec  $F_1 = (\omega-\omega_0)/2\pi$  et  $F_2 = (\omega+\omega_0)/2\pi$ .

L'amplitude de  $F_1$  ou  $F_2$  est la moitié de celle de  $F_0$

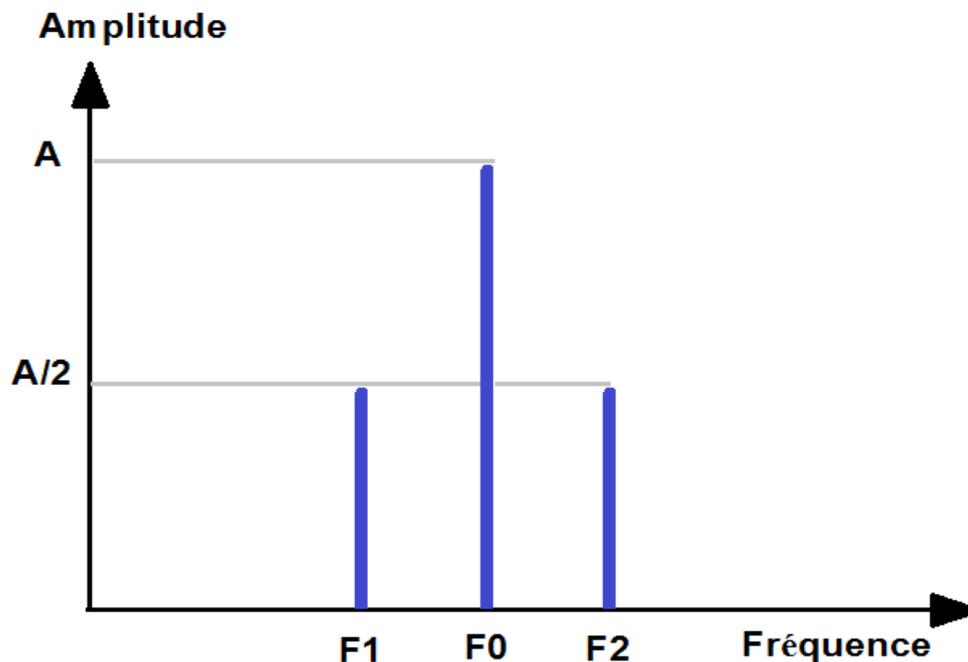
# Spectre du signal AM modulé à 100%

$$F_s = A \cos 2\pi F_0 t + A/2 (\cos 2\pi F_1 t) + A/2 (\cos 2\pi F_2 t)$$

Le signal de la porteuse modulée par une sinusoïde produit 3 raies.

La raie centrale avec l'amplitude  $A$  est la porteuse.

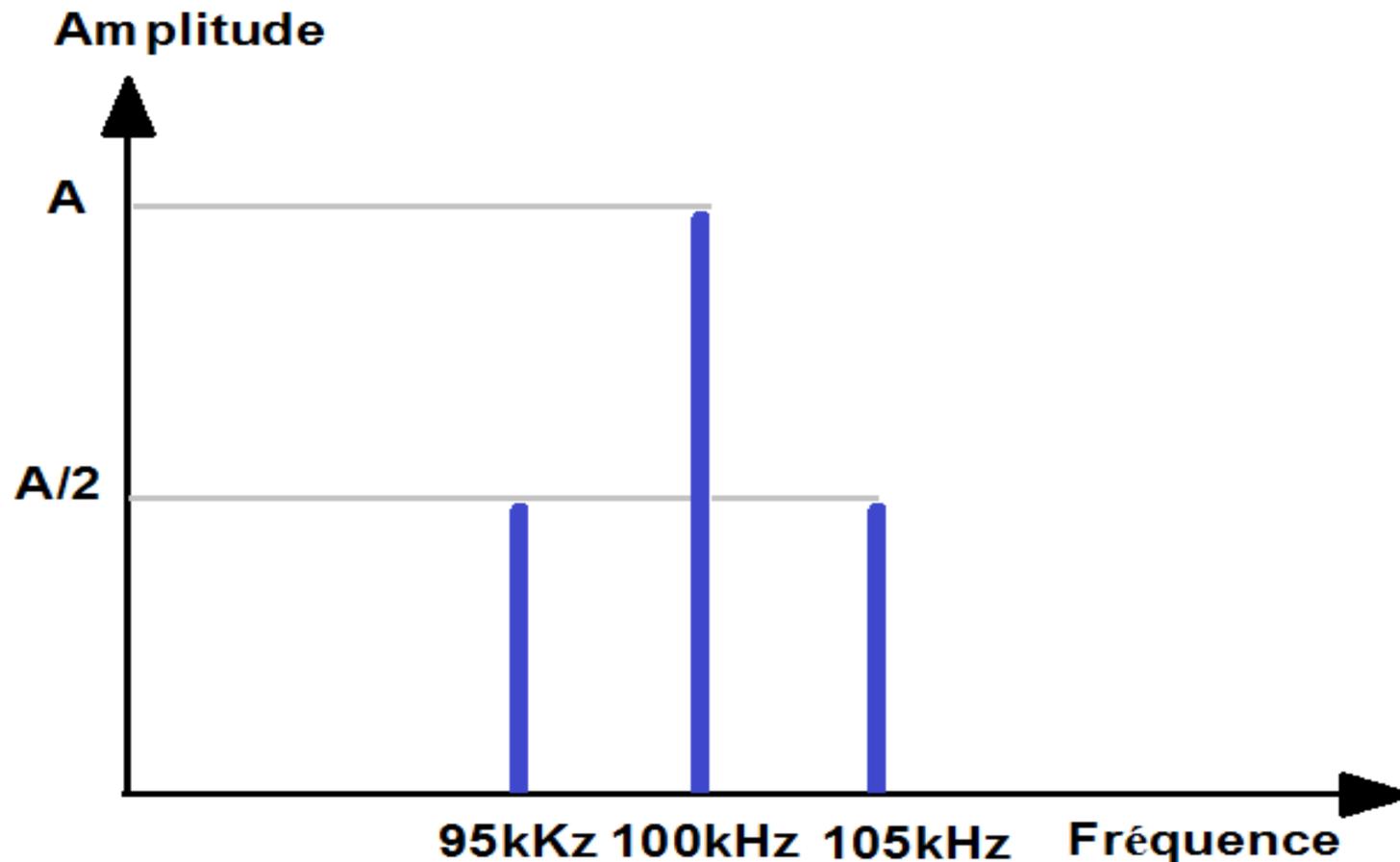
Les 2 raies d'amplitudes  $A/2$  portent l'information.



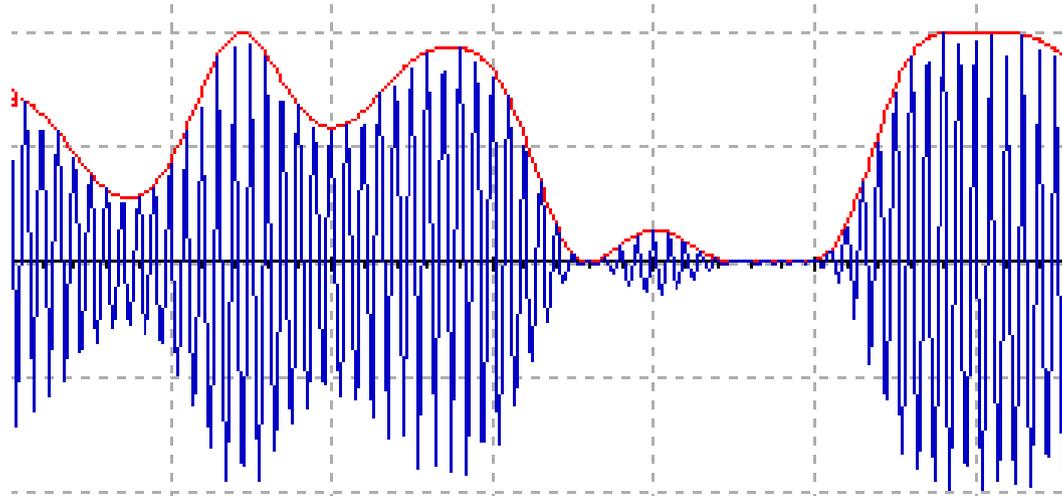
# Application numérique

Une porteuse de fréquence 100kHz est modulée à 100% par un signal sinusoïdal de 5kHz.

Quelles sont les fréquences et les amplitudes des raies observées sur un analyseur de spectre ?



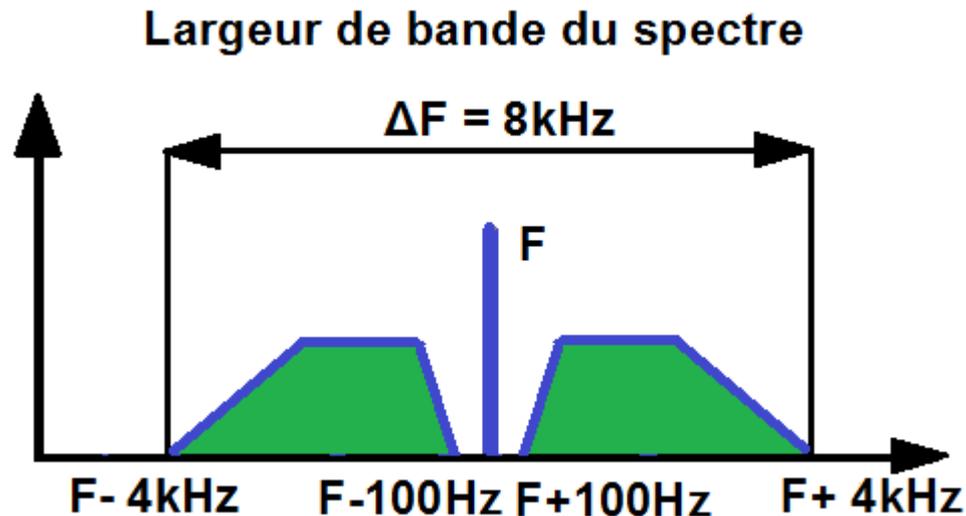
# Modulation par un signal complexe



**On considère un signal modulant complexe (voix par exemple) comportant des fréquences allant de 100Hz à 4kHz avec des amplitudes qui font varier le taux de modulation de 0 à 100%.**

**Le signal modulé aura l'allure suivante.**

# Spectre en fréquence

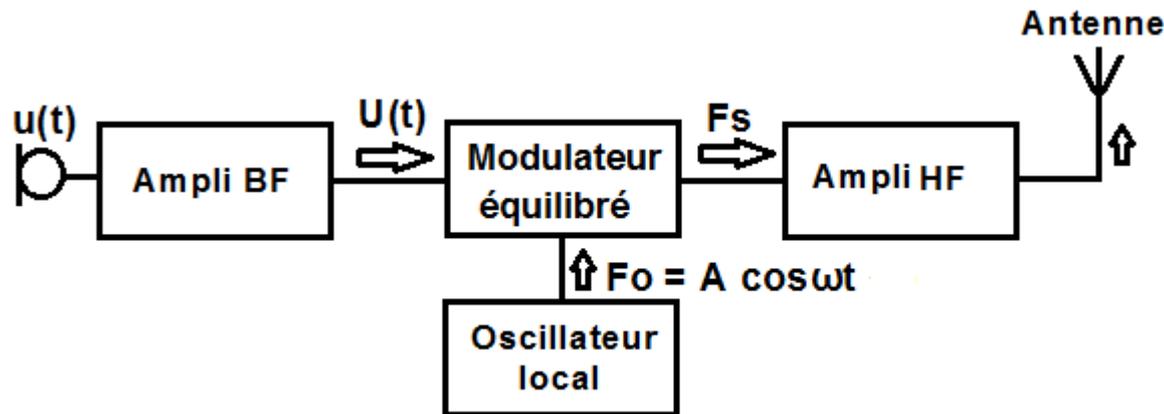


**Le spectre du signal AM comprend maintenant 2 bandes latérales et la porteuse.**

**La même information est contenue dans les 2 bandes latérales mais avec des fréquences inversées.**

**Une grosse partie de l'énergie rayonnée est contenue dans la fréquence centrale  $F_0$  qui ne transporte pas d'information**

# Modulation d'amplitude à porteuse supprimée



Le modulateur équilibré (multiplieur) produit une porteuse modulée qui est le produit de  $U(t)$  par  $F_0(t)$ .

$$F_s = U(t) \cdot A_0 \cos \omega t$$

Si la modulation  $U(t)$  est sinusoïdale l'équation de la porteuse modulée est

$$F_s = U_0 \cos \omega_0 t \cdot A_0 \cos \omega t$$

# Spectre du signal avec modulateur équilibré

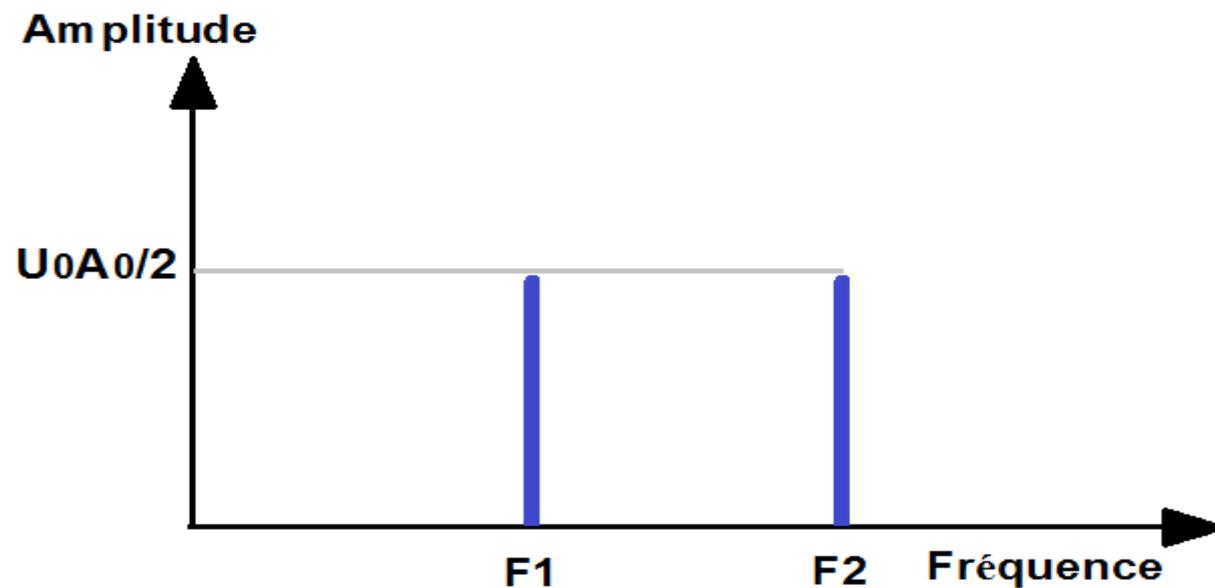
On a en sortie du modulateur  $F_s = U_0 \cos \omega_0 t \cdot A_0 \cos \omega t$  d'où

$$F_s = U_0 A_0 / 2 [\cos(\omega - \omega_0) t] + U_0 A_0 / 2 [\cos(\omega + \omega_0) t]$$

On a en sortie du modulateur 2 fréquences  $F_1$  et  $F_2$  telles que  $F_1 = (\omega - \omega_0) / 2\pi$  et  $F_2 = (\omega + \omega_0) / 2\pi$

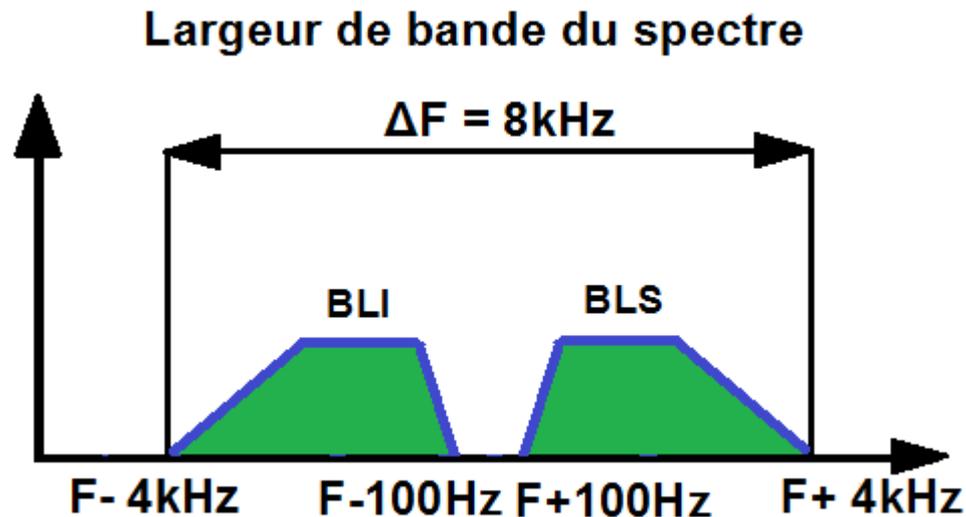
Le spectre de la porteuse modulée par la sinusoïde est constitué de 2 raies d'amplitude  $U_0 A_0 / 2$ .

Ces 2 raies portent l'information  $\cos \omega_0 t$ .



# Cas d'un signal modulant complexe

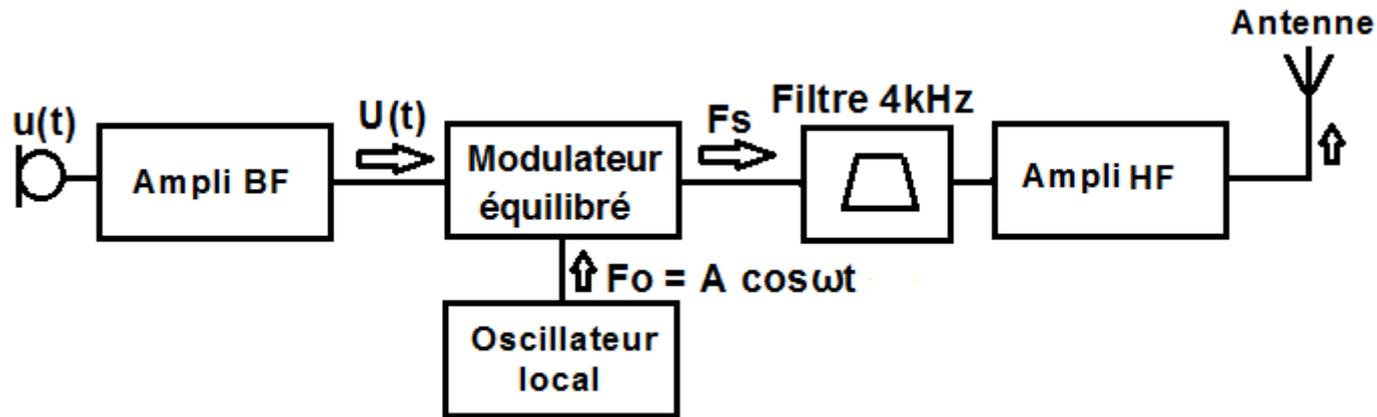
On reprend l'exemple du signal modulant comportant des fréquences allant de 100Hz à 4kHz avec un taux de modulation de 0 à 100%.



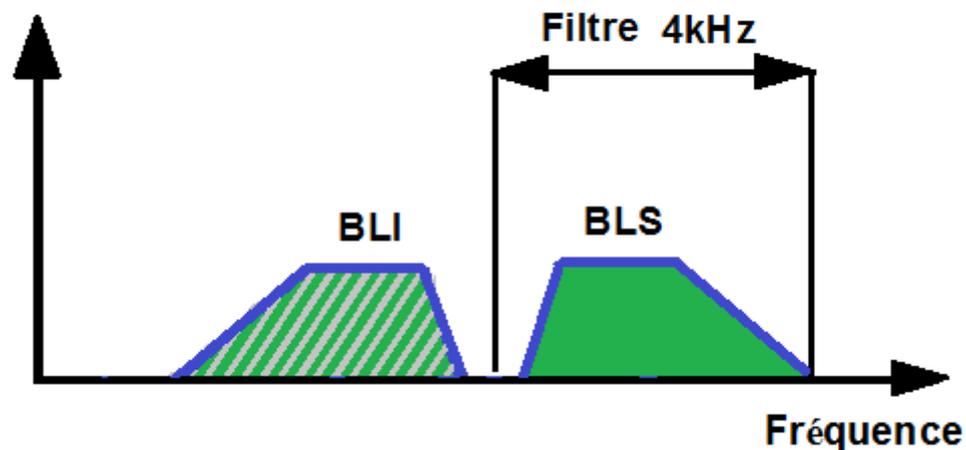
Le spectre du signal se réduit aux les 2 bandes latérales qui transportent la même information mais avec des fréquences inversées.

On a gagné la puissance qui était perdue dans la porteuse et il n'y a pas de signal émis en l'absence de modulation.

# Emetteur à bande latérale unique



Entre le modulateur et l'ampli HF on introduit un filtre dont la bande passante est de 4kHz. Ce filtre élimine une des bandes latérales.



# Emission en modulation de fréquence

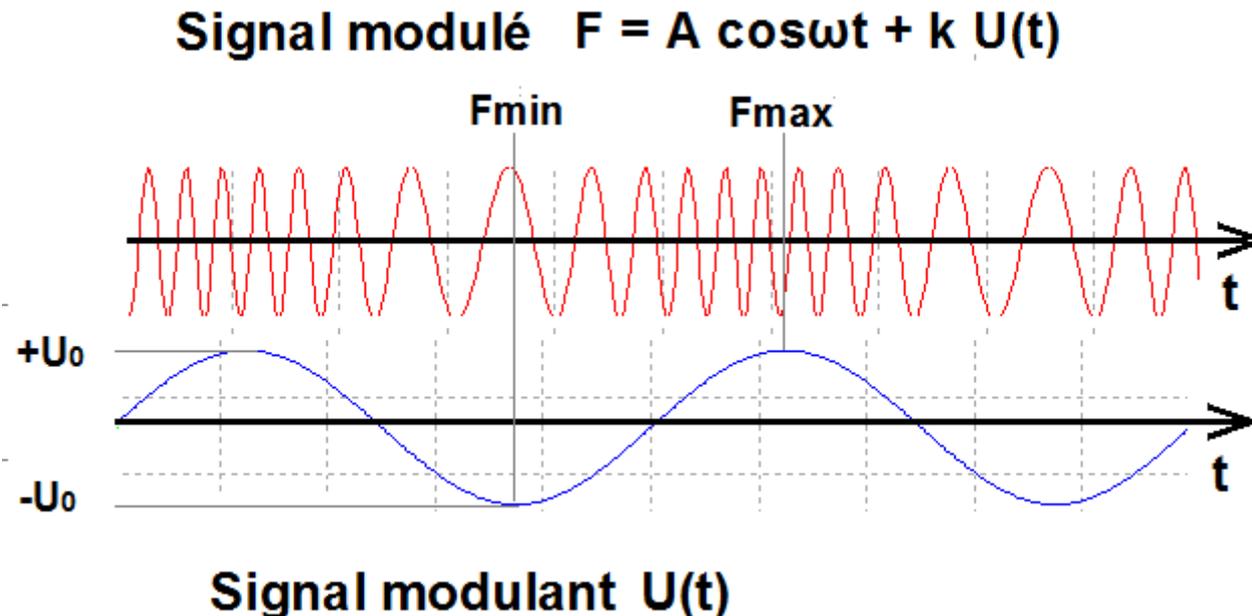
Pour produire un signal FM il faut une information BF et une fréquence porteuse sinusoïdale  $F_0(t) = A \cos \omega t$ .

Soit  $U(t)$  le signal BF de l'information à transmettre. Cette information  $U(t)$  sera transmise par la porteuse dont la fréquence instantanée sera modulée par la fréquence BF.

$$\text{Fréquence instantanée} = F_0(t) + k U(t)$$

$k$  est un coefficient qui dépend du modulateur. Il s'exprime en Hz par Volt.

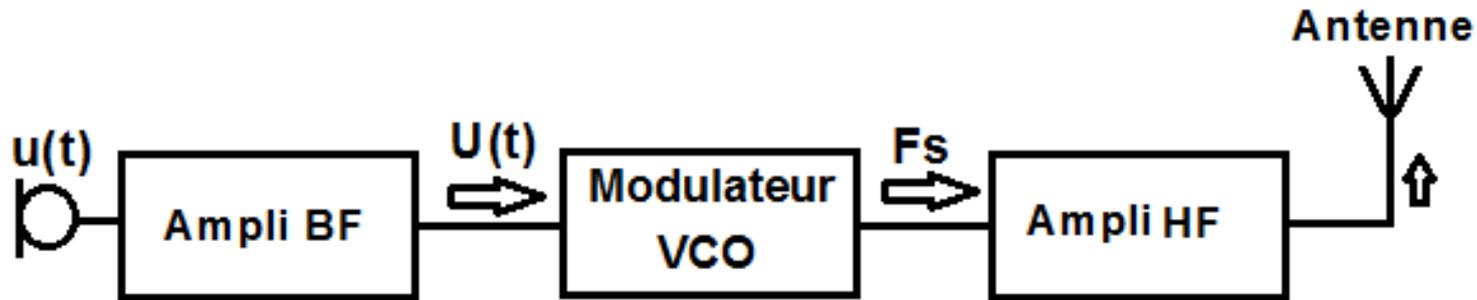
# Signal modulé en fréquence



**Exemple : On a une fréquence porteuse  $F_0 = 10\text{MHz}$  et un modulateur tel que  $k.U_0 = 10\text{kHz}$ .**

**La fréquence instantanée du signal modulé va varier de  $9,990\text{MHz}$  à  $10,010\text{MHz}$  au rythme de la modulation  $U(t)$**

# Emetteur FM simplifié



Le modulateur le plus simple consiste en un oscillateur dont la fréquence est commandée en tension par le signal BF. (VCO = Voltage Controlled Oscillator)

Sans signal modulant  $U(t)$  le VCO du modulateur produit la fréquence porteuse  $F_0(t) = A \cos \omega t$ .

On retrouve cette fréquence en sortie du modulateur.

Avec le signal modulant la fréquence à un instant  $t$  est égale à  $F_s(t) = F_0(t) + k U(t)$

# Excursion en fréquence et indice de modulation

$$F_s(t) = F_0(t) + k U(t)$$

On prend un signal modulant  $U(t)$  variant autour de 0 avec une amplitude max de  $\pm U_0$ .

La fréquence instantanée du VCO sans signal modulant est  $F_0(t)$

La fréquence maximum sera  $F_{s\max} = F_0 + k U_0$

La fréquence minimum sera  $F_{s\min} = F_0 - k U_0$

L'excursion de fréquence vaut  $\Delta F = kU_0$

Soit  $F_u$  la fréquence maximum du signal modulant  $U(t)$   
l'indice de modulation est égal à  $m = \Delta F / F_u$

# Exemple pratique

On veut étudier les caractéristiques techniques d'un talkie-walkie qui émet sur une fréquence de 150MHz. Il possède un VCO dont la fréquence change de 10Hz pour une variation de 1mV du signal de modulation. On peut en déduire que  $k = 10\text{kHz/V}$ .

Le signal du micro est amplifié puis est injecté dans le VCO. A cet endroit sa mesure à l'oscilloscope montre que la tension crête à crête atteint 500mV avec un niveau de voix normal. On peut en déduire que l'excursion de fréquence correspond à  $\Delta F = 0,25 \times 10\text{kHz} = 2500\text{Hz}$

La bande passante de l'amplificateur du micro va de 100Hz à 3000Hz.

La fréquence modulante maximum sera de 3KHz et l'indice de modulation sera légèrement inférieur à 1.

# Spectre en fréquence d'un signal FM

Le spectre d'un signal FM est complexe.

Pour simplifier on prend un signal modulant de la forme  $U(t) = U_0 \cos \omega_m t$  avec une fréquence du VCO en absence de signal  $F_0 = \omega_0 / 2\pi$

On montre que l'expression de la porteuse modulée est

$$F_s = A \cos(\omega_0 t + m \sin \omega_m t)$$

où  $m$  est l'indice de modulation.

En développant le cosinus de la somme on obtient 2 termes qui se développent en série de Fourier dont les coefficients sont donnés par des fonctions de Bessel.

# Exemple du talkie-walkie

La fréquence sans modulation est de 150MHz et la fréquence du signal de modulation est de 2,5kHz. On considère que l'indice de modulation vaut  $m = 1$

