

Licence professionnelle RT

Traitement de l'information  
Modulations analogiques

M Bocquet  
2021 – 2022



# Modulations analogiques

## Pourquoi module-t-on un signal ?

La dimension des antennes émettrices et réceptrices dépend de la longueur d'onde du signal ( en général de l'ordre de  $\lambda/2$  ou  $\lambda/4$  ).

Un signal haute fréquence HF ( ex :  $f = 100$  MHz) est facilement transmissible et nécessite des antennes de dimensions correctes, par contre, pour les signaux B.F (ex :  $f = 20$  Hz) la longueur d'onde sera beaucoup plus grande et cela nécessiterait des antennes démesurées et un signal qui serait rapidement atténué.

Le but de la modulation est de:

- \* Translater le spectre d'un signal B.F [ sons, musique , parole ] vers les H.F pour pouvoir le transmettre facilement par voie hertzienne.
- \* D'étager les canaux de transmissions

**Tout signal modulé peut se mettre sous la forme:**

$$e(t) = E(t) \cdot \cos(\theta(t))$$

- $E(t)$  est l'amplitude instantanée
- $\theta(t)$  est la phase instantanée avec :

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = \omega_0 t + \varphi(t)$$

**Par définition la pulsation instantanée est  $\omega(t) = 2\pi f(t) = d\theta(t) / dt$**

**La pulsation du signal porteur est  $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 = \text{cte}$**

**Le signal modulé s'écrira donc:  $e(t) = E(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t)]$**

- **Si,  $E(t)$  est une fonction du temps et  $\varphi(t)$  est constant c'est la modulation d'amplitude.**
- **Ou  $E(t)$  est constante et  $\varphi(t)$  fonction du temps, il existe alors 2 possibilités:**
  - \*  **$\varphi(t) = k u(t)$ ,  $u(t)$  étant le signal modulant. On parlera de modulation de phase**
  - \*  **$d(\varphi(t)) / dt = k' \cdot u(t)$ . On parlera de modulation de fréquence.**

Le signal H.F est appelé **PORTEUSE** .

Le signal B.F est appelé **SIGNAL MODULATEUR** ou **SIGNAL MODULANT** .

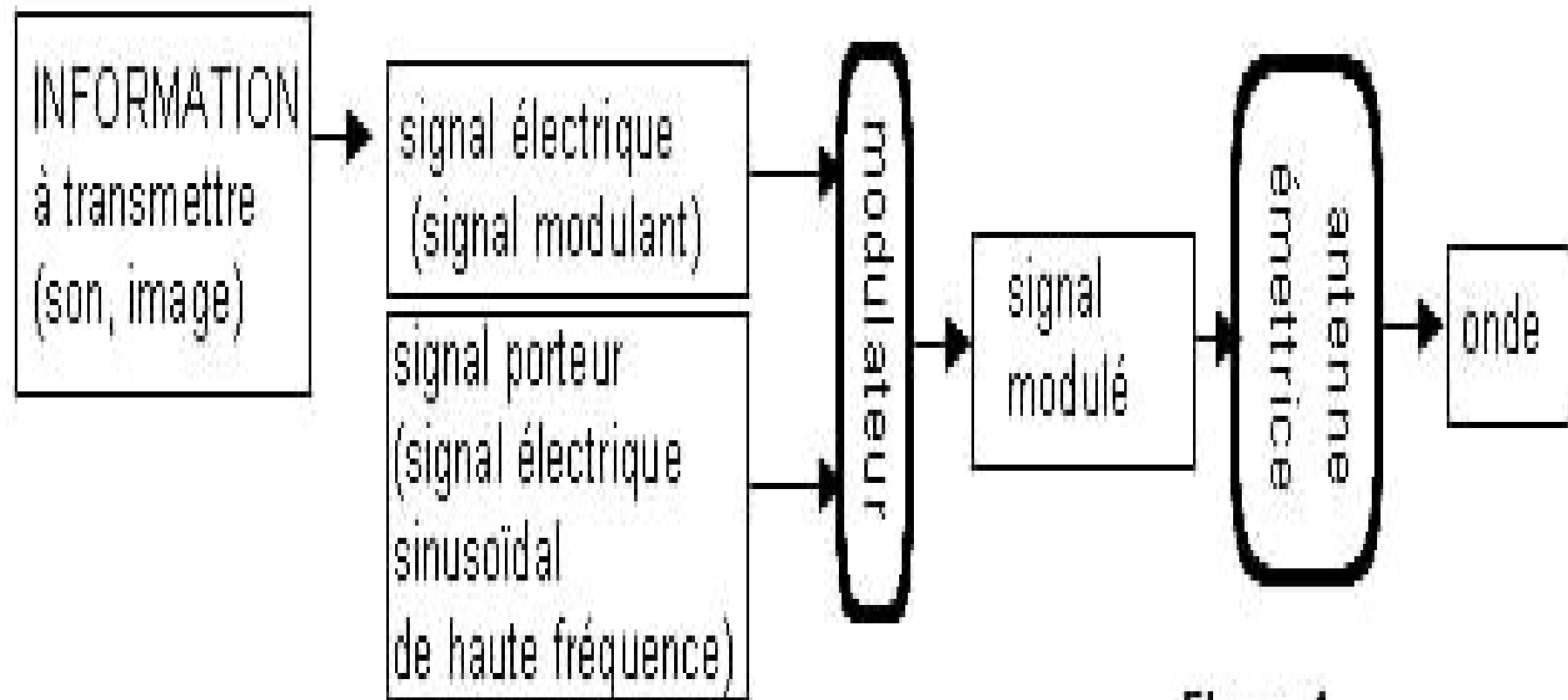


Figure 1

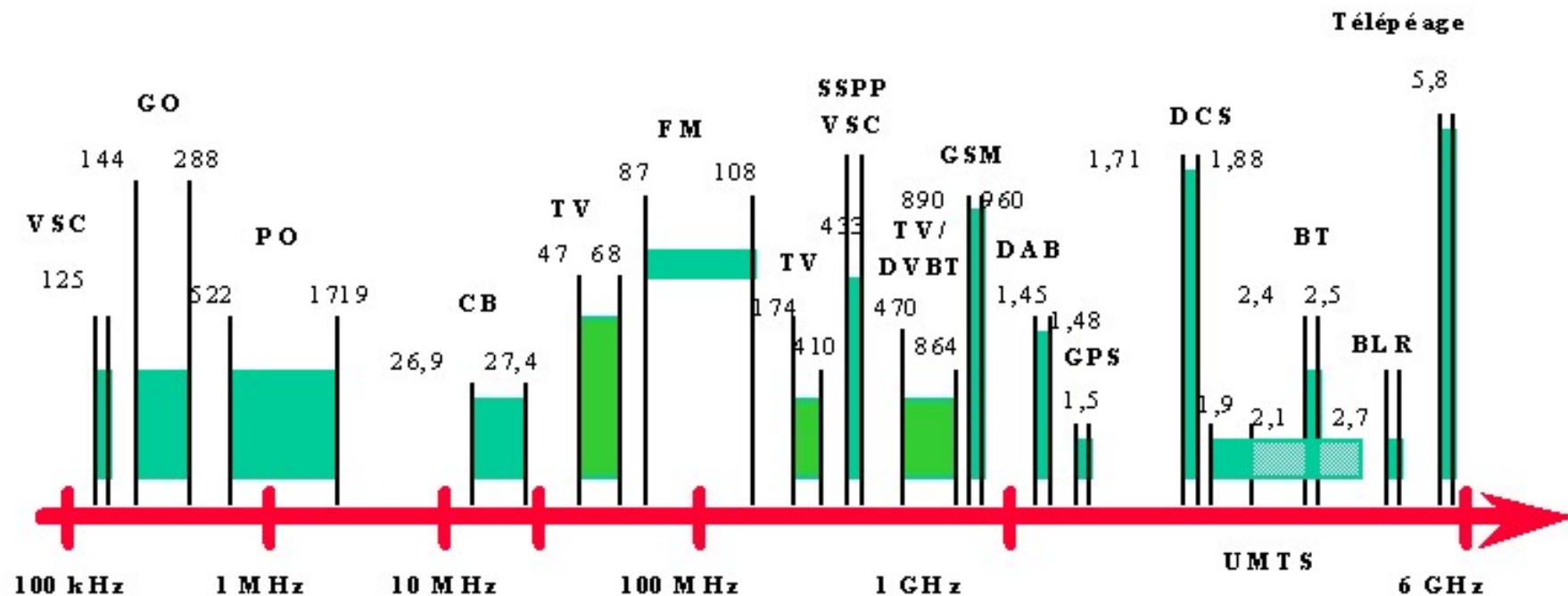
# Champs ELF et ondes radioélectromagnétiques

| Gamme du spectre           | Sigles*                      | Longueurs d'onde  | Fréquences   |
|----------------------------|------------------------------|---|--|
| Extrêmes basses fréquences | ELF                          | > 30 km   | > 0 Hz à 10 kHz  |
| Radiofréquences            | VLF<br>LF<br>MF<br>HF<br>VHF | 10 km à 30 km<br>1 à 10 km<br>100 m à 1 000 m<br>10 à 100 m<br>1 à 10 m | 10 kHz à 30 kHz<br>30 kHz à 300 kHz<br>300 kHz à 3 MHz<br>3 MHz à 30 MHz<br>30 MHz à 300 MHz |
| Hyperfréquences            | UHF<br>SHF<br>EHF            | 1 dm à 1 m<br>1 cm à 1 dm<br>1 mm à 1 cm                                | 300 MHz à 3 GHz<br>3 GHz à 30 GHz<br>30 GHz à 300 GHz  |

# Etalement des fréquences

De nombreuses bandes sont réservées à des E/R embarqués non indiquées sur le schéma

**Le spectre est saturé!!!**



# Modulation amplitude

## 1) Modulation d' amplitude et spectre d'un signal AM:

On n'étudiera le cas d'un signal modulant sinusoïdal , sachant qu'un signal quelconque est une somme de signaux sinusoïdaux (Fourier).

Le signal modulateur est de la forme  $u(t) = U_0 + U \cdot \cos (\Omega.t)$

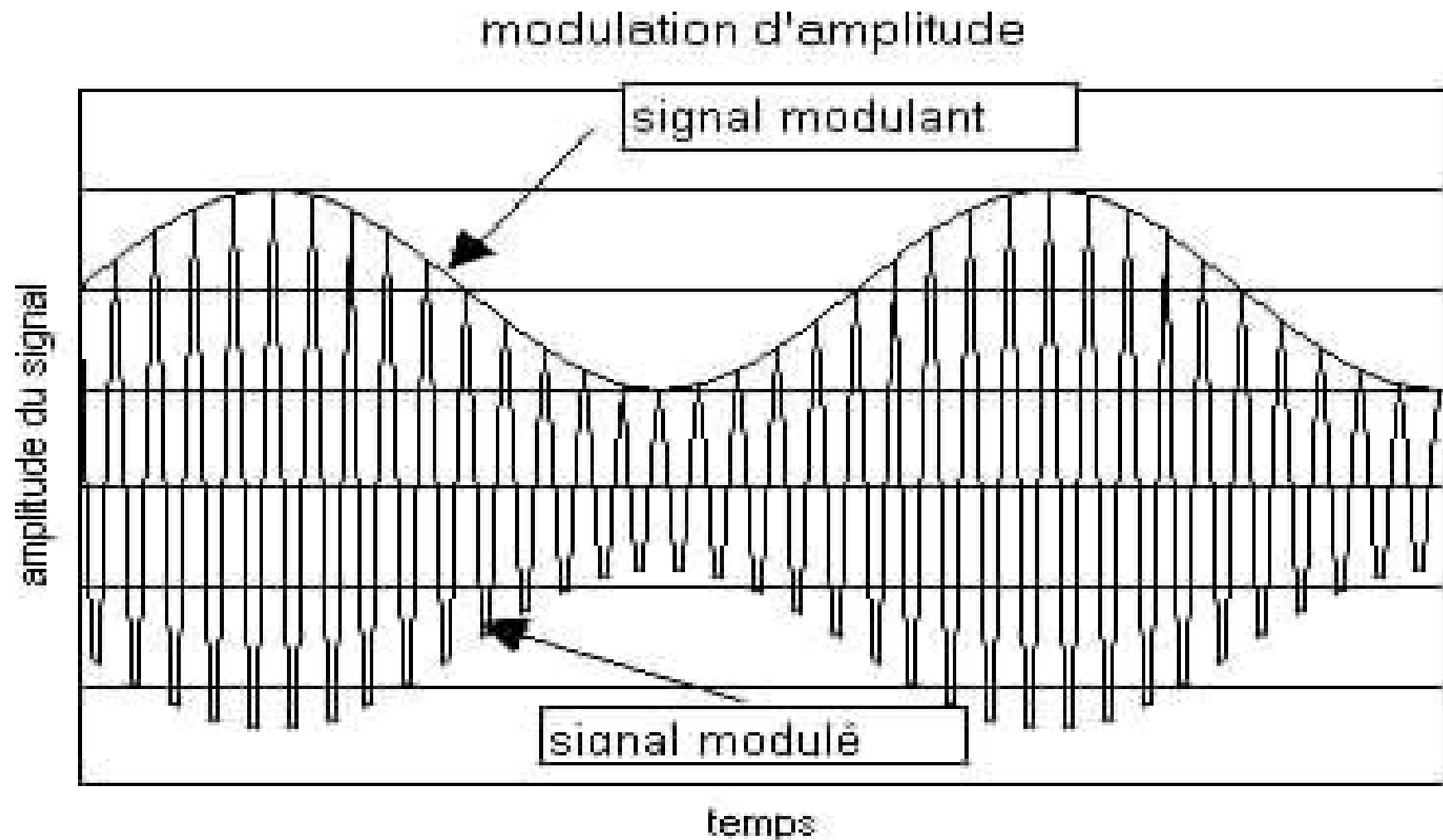
$U_0$  est une composante continue.

fréquence  $F$

La porteuse est de la forme  $v(t) = V \cdot \cos (\omega.t )$

fréquence  $f$

## La modulation d'amplitude AM (Amplitude Modulation).





Le signal modulé est  $e(t) = u(t) \cdot v(t)$  ;

La modulation d'amplitude consiste donc en une multiplication, soit:

$$\begin{aligned} e(t) &= [U_0 + U \cos(\Omega.t)] \cdot V \cdot \cos(\omega.t) \\ &= U_0 [1 + (U / U_0) \cos(\Omega.t)] \cdot V \cdot \cos(\omega.t) \end{aligned}$$

$$e(t) = E [1 + m \cos(\Omega.t)] \cdot \cos(\omega.t)$$

avec  **$m = U / U_0$  taux de modulation** et  $E = U_0 \cdot V$

L'amplitude du signal modulé est  $E [1 + m \cos(\Omega.t)]$ , elle varie entre:

$$U_{\max} = E [1 + m] \text{ pour } \cos(\Omega.t) = 1 \text{ et}$$

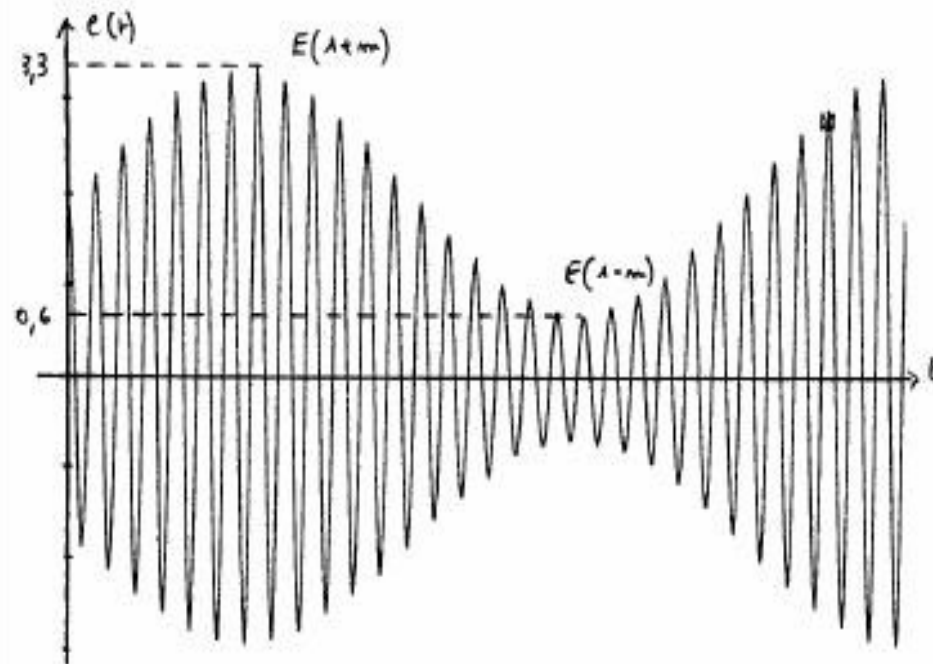
$$U_{\min} = E [1 - m] \text{ pour } \cos(\Omega.t) = -1 .$$

On a donc  $U_{\max} / U_{\min} = [1 + m] / [1 - m]$  soit par transformation

$$\mathbf{m = [ U_{\max} - U_{\min} ] / [ U_{\max} + U_{\min} ]}$$

si  $m > 1$  on parle de surmodulation

Figure 2.  
Influence de  $m$   
sur l'allure de  
la porteuse



$$E(1+m) = 3,3 \text{ divisions}$$

$$E(1-m) = 0,6 \text{ division}$$

$$\text{d'où } (1+m)/(1-m) = 3,3/0,6$$

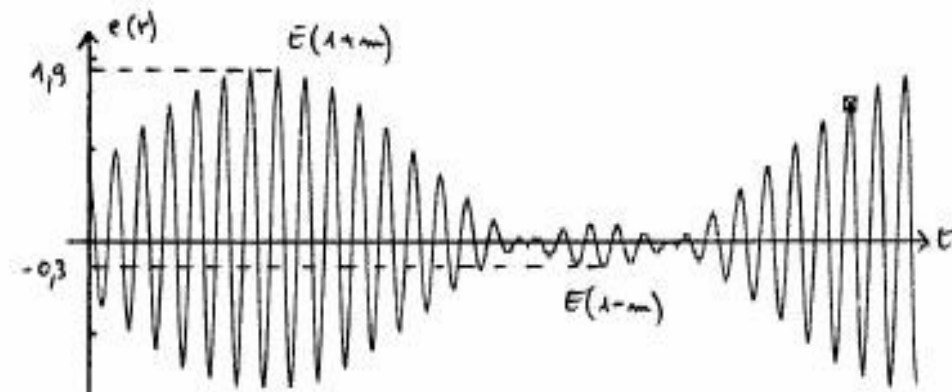
$$\text{soit } m = 0,69$$

$$E(1+m) = 1,9 \text{ divisions}$$

$$E(1-m) = -0,3 \text{ division}$$

$$\text{d'où } (1+m)/(1-m) = -1,9/0,3$$

$$\text{soit } m = 1,37$$



On peut transformer cette multiplication de deux fonctions sinusoïdales  $s(t)$ , en une somme car :

$$\cos(a) \cdot \cos(b) = \frac{1}{2} \cdot [\cos(a+b) + \cos(a-b)].$$

On aura donc :

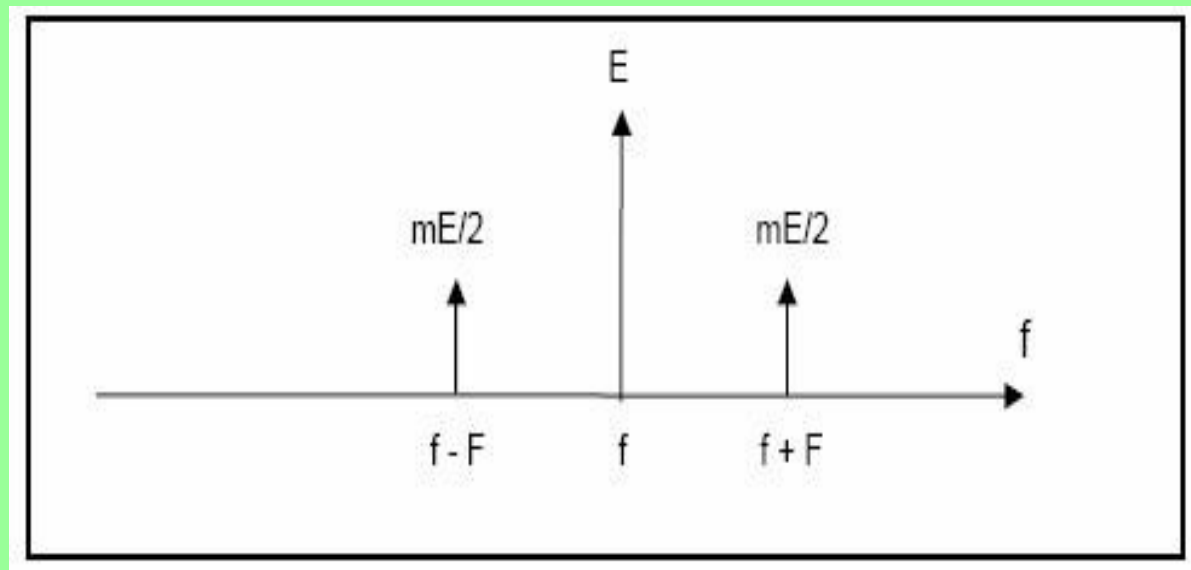
$$e(t) = E \cos(\omega t) + \frac{1}{2} E \cdot m \cdot \cos[(\omega + \Omega)t] + \frac{1}{2} E \cdot m \cdot \cos[(\omega - \Omega)t]$$

Dans ce signal on aura la superposition de trois fréquences:

$f-F$ ,  $f$  et  $f+F$

Ce qui donne

le spectre de fréquence :



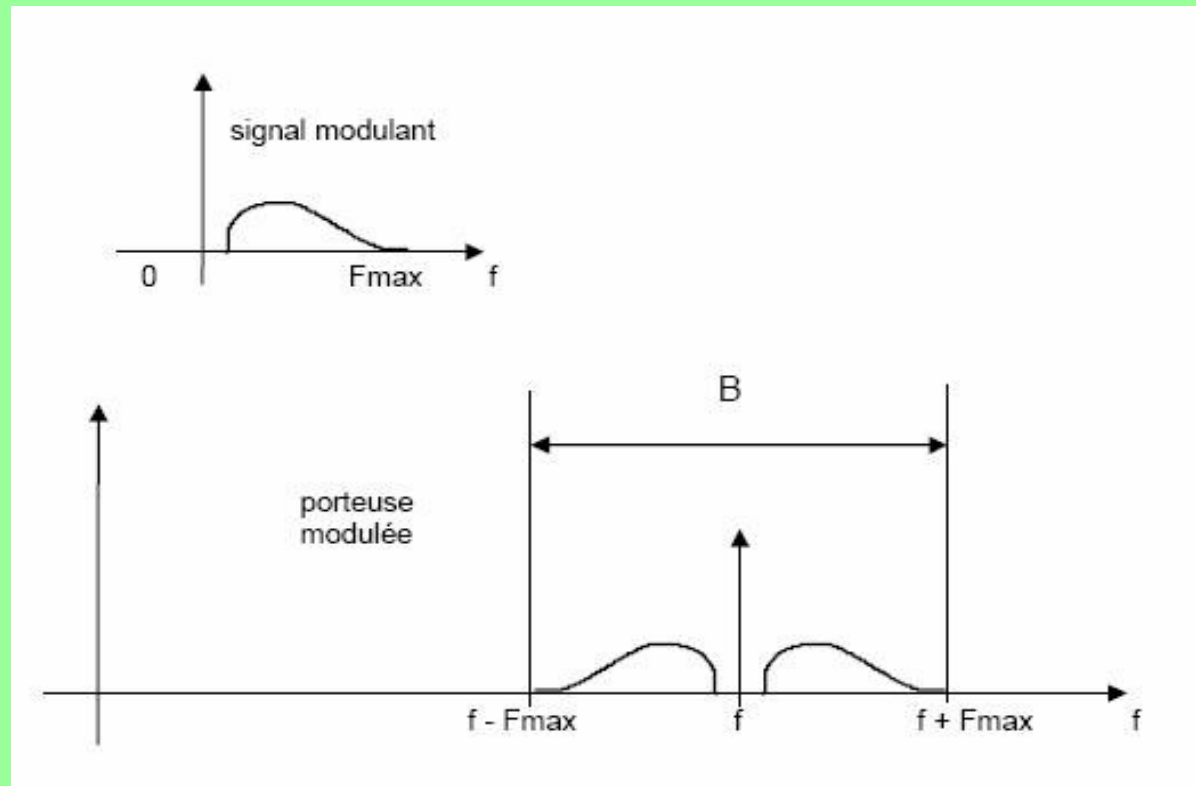
On démontre que le résultat précédent, pour le spectre, se généralise au cas où le signal modulateur  $u(t)$  est quelconque.

- La forme du spectre de  $u(t)$  contient plus qu'une raie
- $F_{\max}$  étant la fréquence de l'harmonique la plus élevée de  $u(t)$
- Le spectre de  $u(t)$  se retrouve de part et d'autre de la porteuse dans le spectre du signal modulé.

Ce qui donne  
le spectre de fréquence :

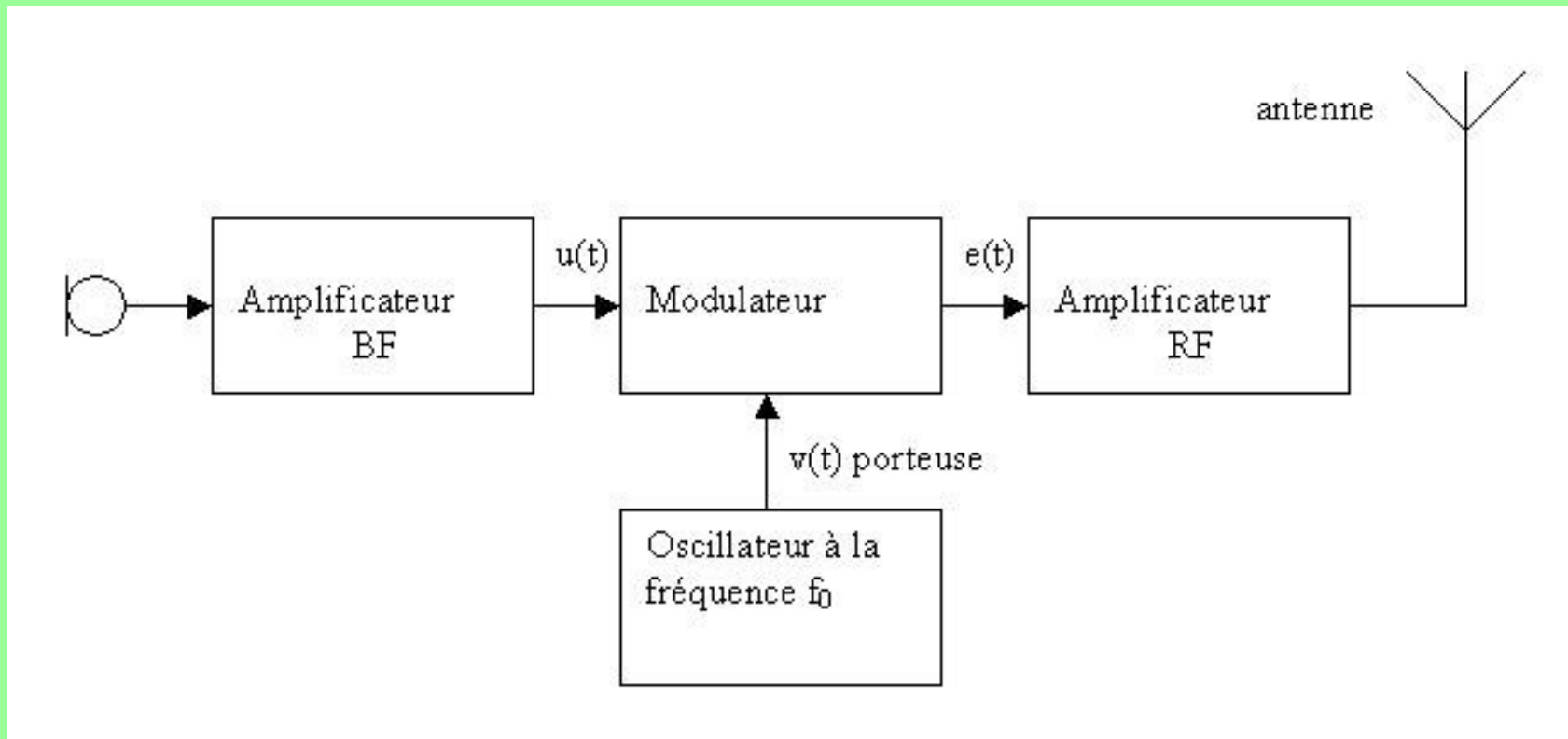
La bande  $B$  occupée  
par un signal AM vaut:

$$B = 2 * F_{\max}$$



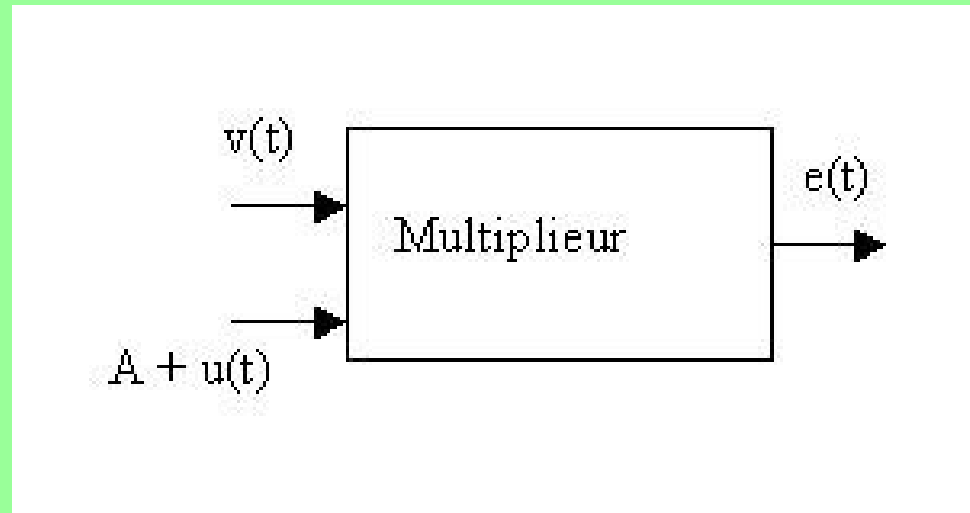
## 2) Production d'un signal AM avec porteuse:

Lorsqu'on veut transmettre un signal en AM, on module la porteuse par l'information basse-fréquence au moyen d'un modulateur:



On crée le signal AM en multipliant la porteuse par le signal modulateur décalé d'une composante continue

Modulateur, multiplieur:

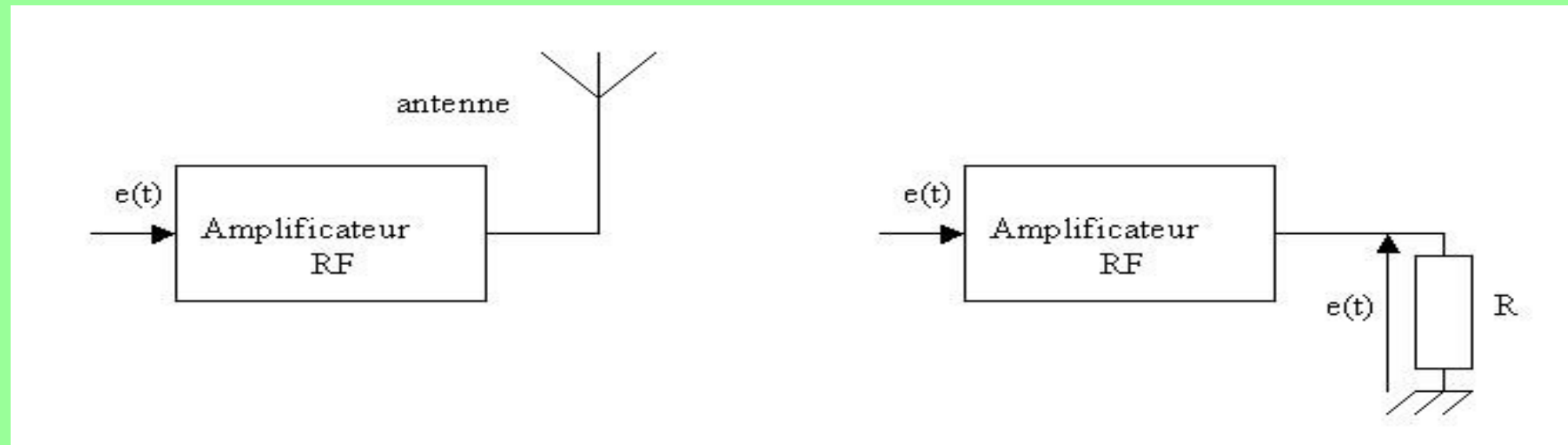


Si on appelle  $K$  le coefficient du multiplieur, on aura:

$$\begin{aligned} e(t) &= [v(t) * (A + u(t))]/K = [V * \cos(\omega.t) * (A + u(t))]/K \\ &= (V * A/K)(1 + u(t)/A) \cos(\omega.t) \end{aligned}$$

Ce qui permet d'ajuster l'indice de modulation en réglant la valeur de la composante continue  $A$

Le signal AM est appliquée à l'antenne qui se comporte vis-à-vis de l'amplificateur de sortie comme une charge résistive R.



La puissance totale dissipée dans l'antenne et donc émise vaut:

$$P = E^2/2R + (mE/2)^2/2R + (mE/2)^2/2R = (1 + m^2/2)E^2/2R$$

On remarque l'importance de la puissance de la porteuse, qui est émise même en l'absence de signal modulant, alors que l'information se trouve dans les bandes latérales.

L'idée est donc de supprimer la porteuse et d'émettre uniquement les deux bandes latérales (modulation en bande latérale double) ou une seule bande latérale (bande latérale unique BLU).

### 3) Démodulation d'un signal AM:

Dans un récepteur AM, le signal peut être démodulé une fois qu'on a sélectionné l'émetteur que l'on désire capter.

Le choix se fait au moyen d'une structure classique oscillateur local mélangeur.

Le signal AM à démoduler, à la fréquence intermédiaire  $f_i$ , peut être réalisé par un détecteur de crête ou par un démodulateur synchrone.

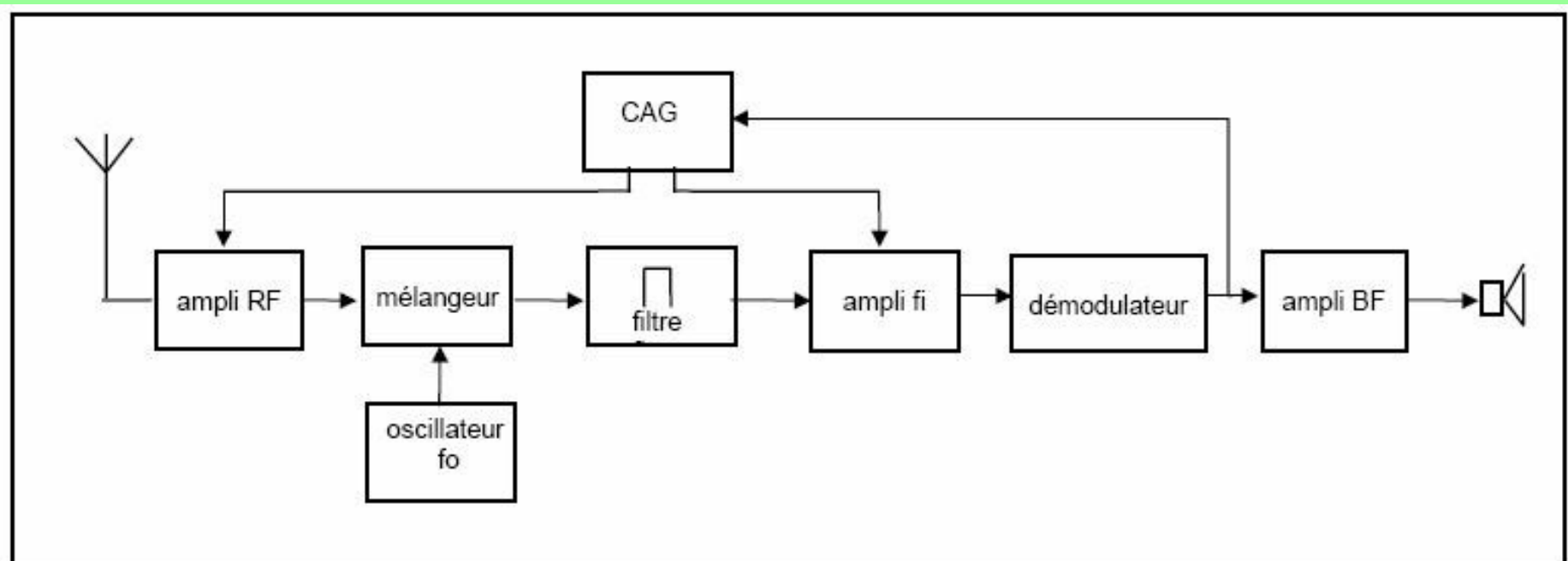


Figure 8. Structure d'un récepteur AM



### 3.1) Détecteur de crête:

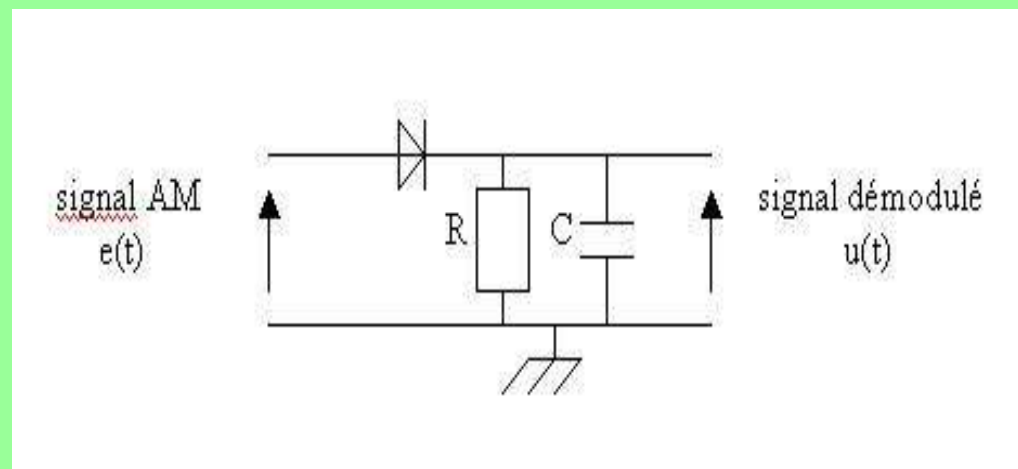
Le détecteur de crête a la particularité d'être une structure simple. Néanmoins à cause du seuil de la diode, le niveau avant démodulation doit être de l'ordre de quelques centaines de mV.

On utilisera de préférence une diode à pointe au germanium, caractérisée par un faible seuil (0,2V) et une faible capacité parasite.

La constante de temps  $\tau = RC$  du circuit doit être grande devant la période de la porteuse et faible devant la période du signal modulant, sinon le signal démodulé ne reproduit pas fidèlement le signal modulant.

Valeur de la constante de temps:

$$\tau = (F_{\max} \cdot f_i)^{-1/2}$$

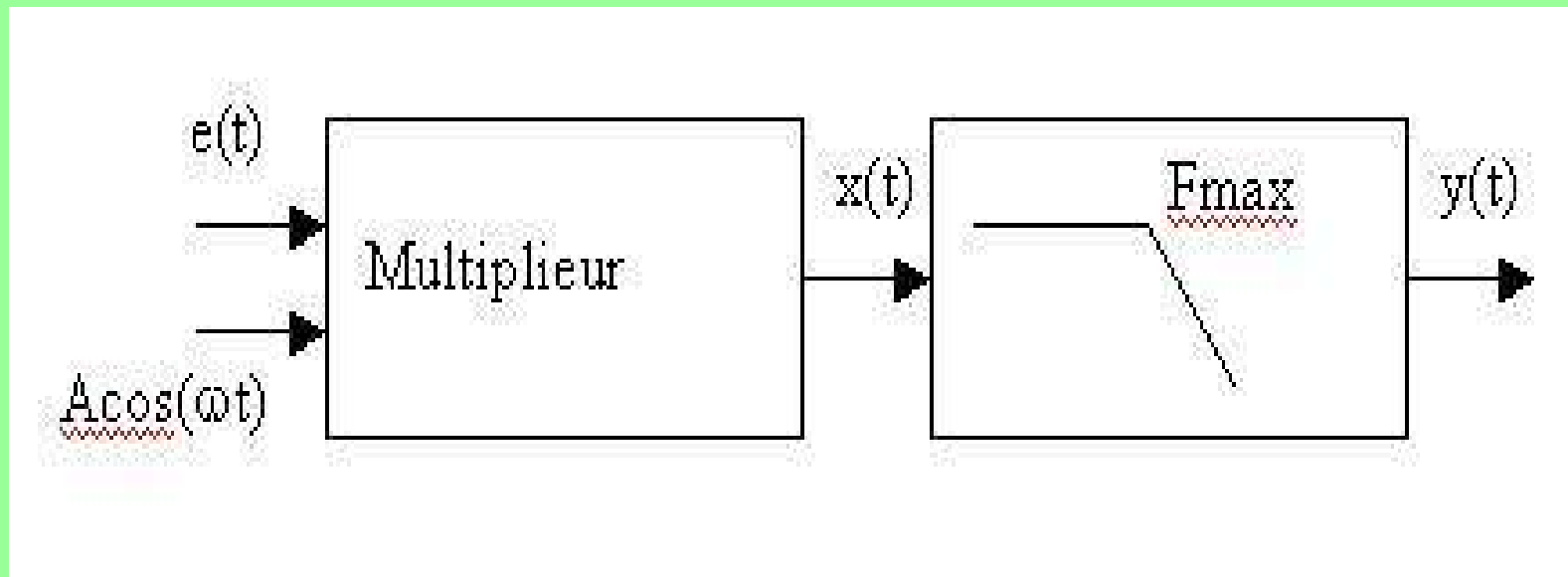


*Pour corriger la surmodulation, on insère une structure CAG, contrôle automatique de gain, qui évite les excursions importantes de  $e(t)$ .*

### 3.2) Détecteur synchrone ou démodulation cohérente:

Dans un démodulateur synchrone, on multiplie simplement le signal AM par un signal sinusoïdal en phase (synchrone) avec la porteuse.

Ce détecteur permet la démodulation pour des signaux fortement bruité.

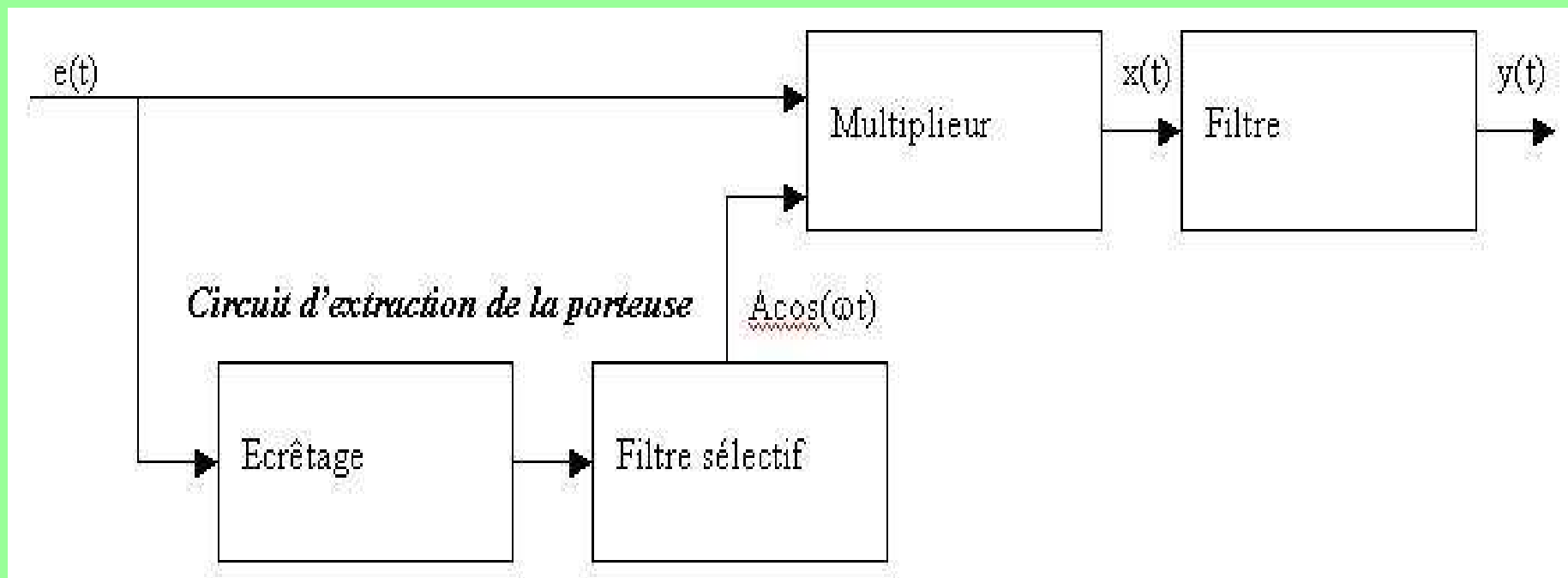


$$\begin{aligned} x(t) &= e(t) * A \cos(\omega t) = u(t) * v(t) * A \cos(\omega t) = u(t) * VA \cos^2(\omega.t) \\ &= VA * u(t)(1 + \cos(2\omega.t))/2 \\ &= (VA/2) * u(t) + (VA/2)u(t)\cos(2\omega.t) \end{aligned}$$

La formule et donc le tracé du spectre de  $x(t)$  montre que ce signal contient le signal modulant  $u(t)$ .

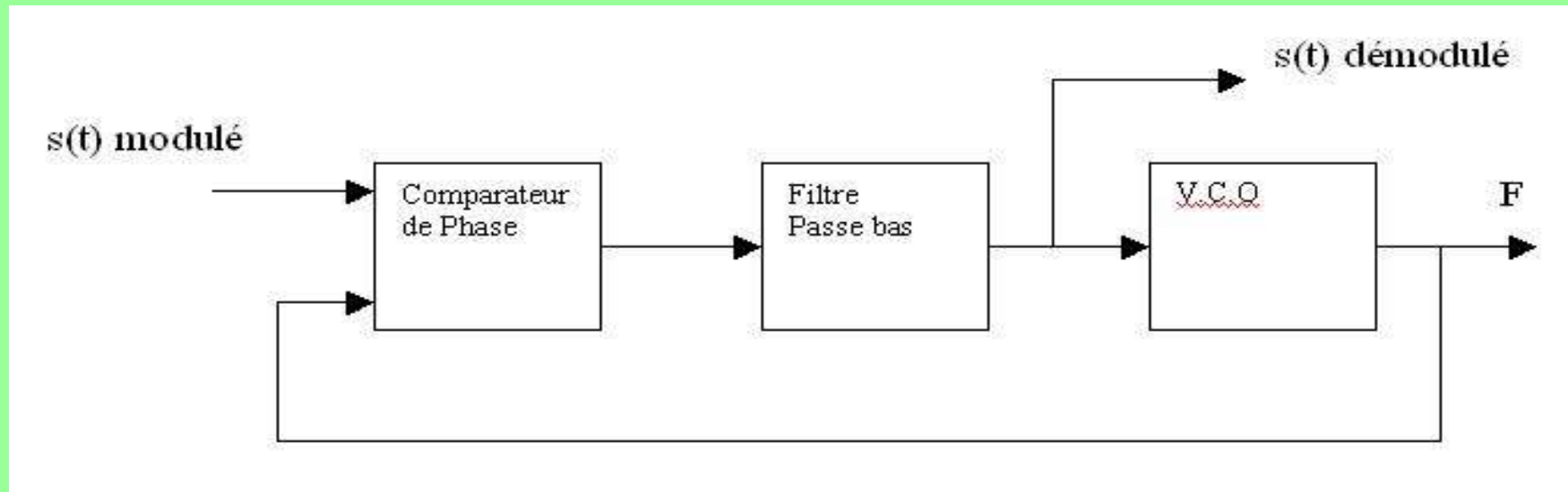
Après filtrage, nous obtenons le signal  $y(t)$ :  $y(t) = (VA/2) * u(t)$

La détection synchrone nécessite la présence d'un signal synchrone avec la porteuse. Pour l'obtenir dans un récepteur, on peut le fabriquer à partir du signal AM par écrêtage et filtrage sélectif ou par une **boucle à verrouillage de phase** accrochée sur la porteuse modulée

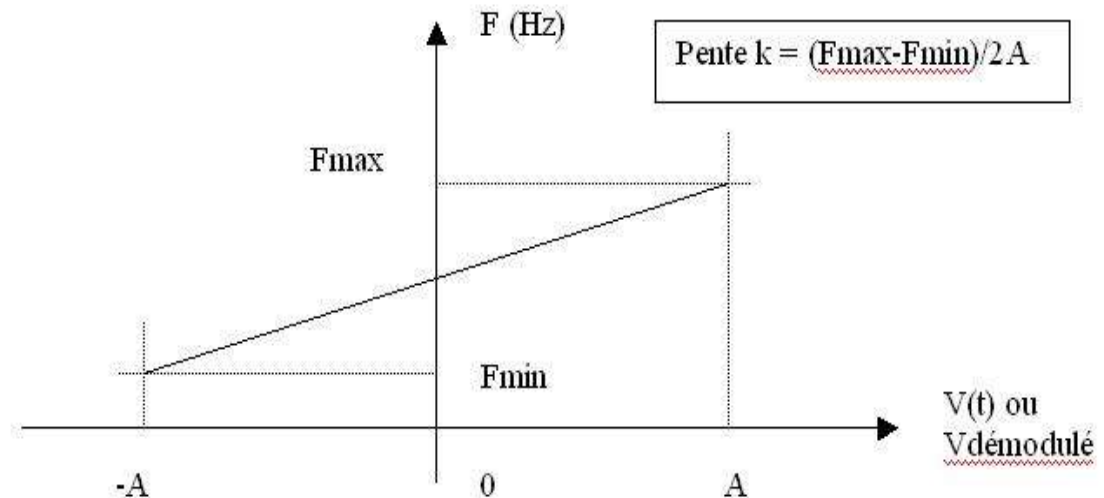


## Boucle à verrouillage de phase:

La BVP ou **PLL** (Phase-locked Loop) est un système bouclé dont une des applications est de délivrer en sortie le même signal que celui utilisé avant la modulation



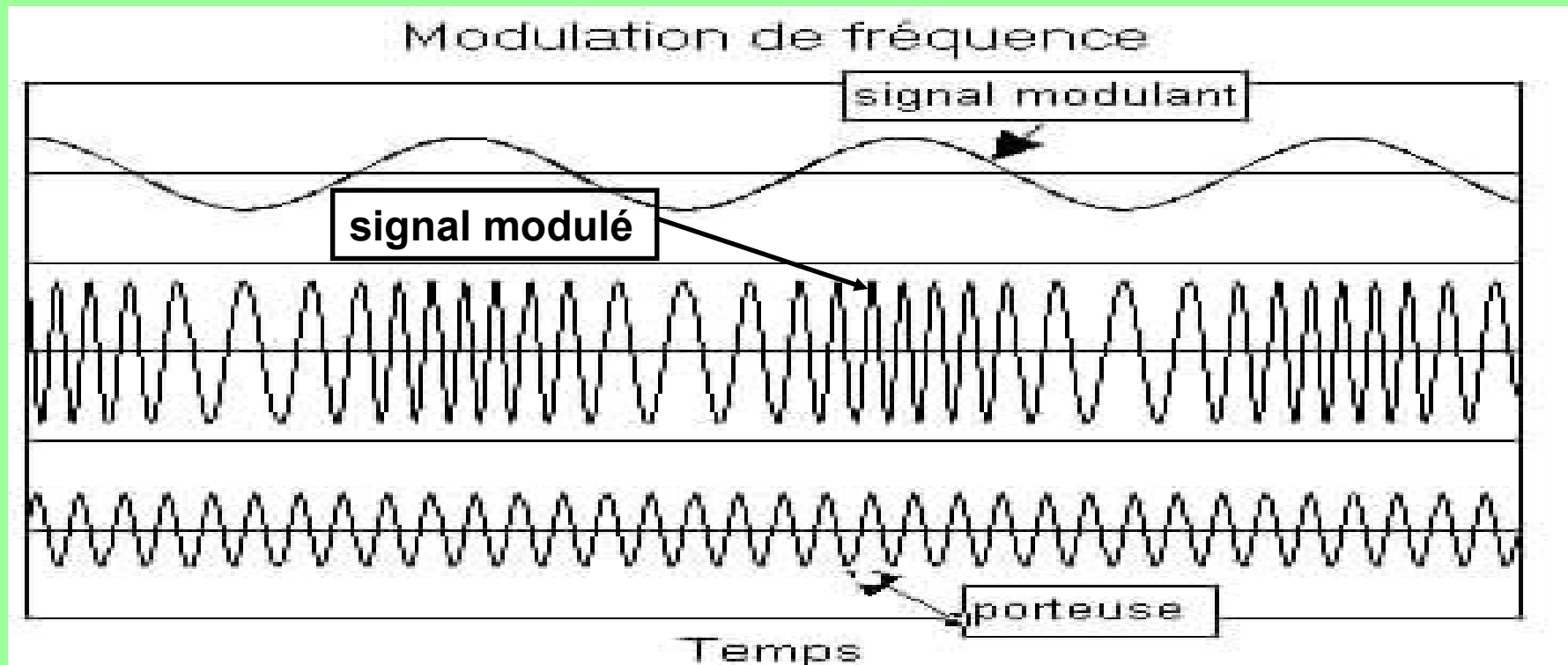
Le VCO (Voltage Controlled Oscillateur) est un circuit délivrant en sortie un signal dont la fréquence dépend de l'amplitude du signal d'entrée.



# Modulation de fréquence

## 1) Modulation de fréquence :

L'information basse fréquence  $s(t)$  à transmettre est inscrit dans la fréquence instantanée de la porteuse.



*Il existe deux types de modulation de fréquences qui sont :*

- NFM (Narrow Frequency Modulation) qui est une modulation de fréquence sur une bande étroite de 5 kHz. C'est ce type de modulation qui est utilisée en radiocommande.*
- WFM (Wide Frequency Modulation) qui est une modulation de fréquence à large bande de l'ordre de 100 kHz. Ce type de modulation est utilisée par les stations de radiodiffusion, pour la transmission du son qui nécessite une bande passante de 15 kHz et pour les possibilités de transmission en stéréophonie. Cette large bande s'explique par le fait qu'il est nécessaire de transmettre, sous forme de balayage en fréquence, la fréquence et l'amplitude du signal.*

La fréquence du signal dépend alors du temps et s'écrit:

$$f(t) = f_0 + ks(t) \text{ avec } \leftarrow$$

$s(t)$ : signal modulant

$f_0$  : fréquence de la porteuse non modulée

Si le signal modulant  $s(t)$  varie entre les valeurs  $+S_{\max}$  et  $-S_{\max}$ , la fréquence varie au rythme du signal modulant entre deux valeurs extrêmes:

$$f_{\min} = f_0 - kS_{\max} \text{ et } f_{\max} = f_0 + kS_{\max}$$

La grandeur  $kS_{\max}$  est appelée excursion en fréquence et notée

$$\Delta f = \pm kS_{\max}$$

Le signal modulé  $e(t)$  s'écrit:

$$e(t) = E \cos(\theta(t)) = E \cos\left(\int \omega(t) dt\right)$$

$$\text{mais } \omega(t) = 2\pi f(t) = \omega_0 t + 2\pi k s(t)$$

$$\text{donc } e(t) = E \cos(\omega_0 t + 2\pi k \int s(t) dt)$$

*formules de la diapo 3*

## 2) Signal modulant sinusoïdal et spectre:

Lorsque le signal modulant est sinusoïdal:  $s(t) = a \cos(\Omega t)$  et de fréquence  $F$

La fréquence instantanée s'écrit:  $f(t) = f_0 + k a \cos(\Omega t)$

L'excursion en fréquence vaut:  $\Delta f = \pm k a$

On définit l'indice de modulation  $m$  par:  $m = \Delta f / F$

Dans ce cas  $e(t)$  est en définitive de la forme :

$$\begin{aligned} e(t) &= E \cos(\theta(t)) = E \cos(\omega_0 t + 2\pi k \int s(t) dt) \\ &= E \cos(\omega_0 t + ((2\pi k a \sin(\Omega t)) / \Omega)) \\ &= E \cos(2\pi f_0 t + m \sin(\Omega t)) \quad \text{puisque: } 1/F = 2\pi / \Omega \end{aligned}$$



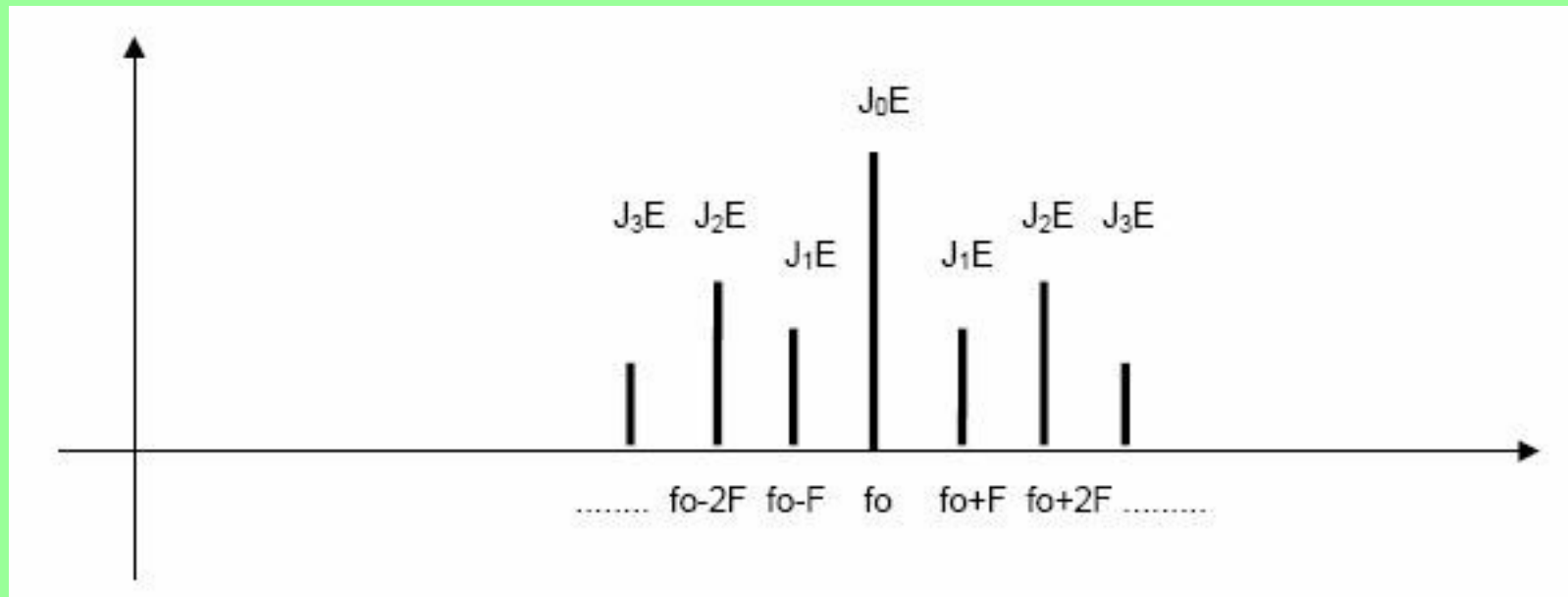
Le spectre d'un signal FM est complexe et ne se calcule mathématiquement que dans le cas particulier précédent où le signal modulant est sinusoïdal.

Cette expression se développe à l'aide des **fonctions de Bessel**

$$e(t) = EJ_{0(m)}\cos(\omega_0 t + \varphi_0) + EJ_{1(m)}\cos[(\omega_0 \pm \Omega) t + \varphi_1] + EJ_{2(m)}\cos[(\omega_0 \pm 2\Omega) t + \varphi_2] \\ + \dots + EJ_{n(m)}\cos[(\omega_0 \pm n\Omega) t + \varphi_n] + \dots$$

où  $J_{0(m)}$ ,  $J_{1(m)}$ ,  $J_{n(m)}$ , ... sont les fonctions de Bessel **paramétrées en m**, indice de modulation

Le spectre d'un signal FM a donc l'allure générale suivante:



- Spectre centré sur la fréquence de la porteuse  $f_0$
- Raies espacées de  $F$ , fréquence du signal modulant
- Amplitude des raies calculées par les fonctions de Bessel
- Nb de raies qui est fonction de l'indice de modulation
- Bande occupée  $B$  supérieure à l'excursion en fréquence totale  $2\Delta f$ , qui peut être calculée par la formule de Carson ou lue sur le spectre. Pour 98% de la puissance totale  $B = 2 (\Delta f + F)$

# Fonctions de Bessel

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     |

### 3) Bruit en modulation de fréquence:

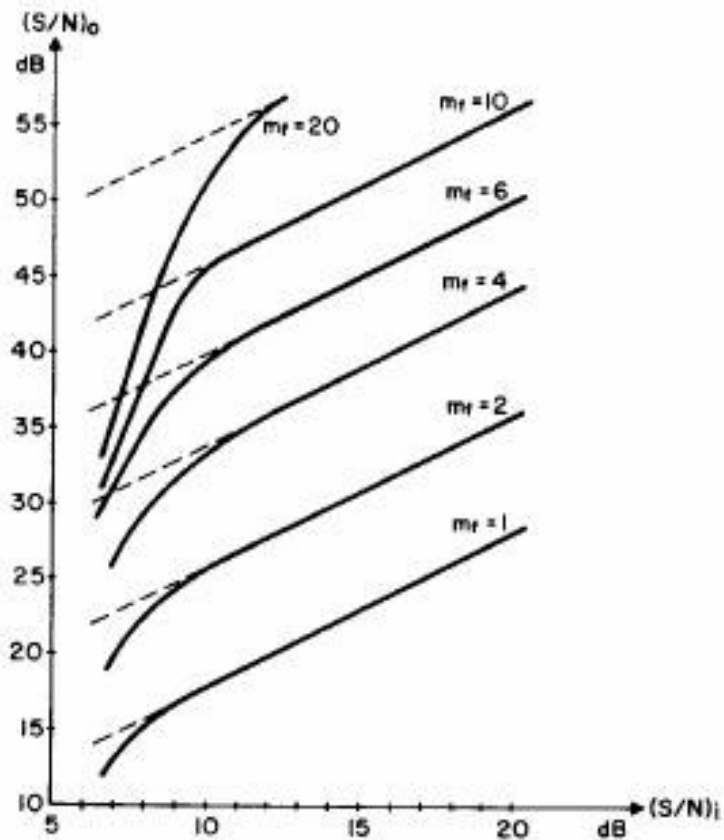
Si le signal à démoduler n'est pas trop bruité, le rapport signal sur bruit (*voir cours réseaux de terrain*) après démodulation est amélioré d'un facteur qui dépend de l'indice de modulation.

$$(S/B)_{BF} = 3m^2(S/B)_p \quad \text{si } (S/B)_p > 10\text{dB}$$

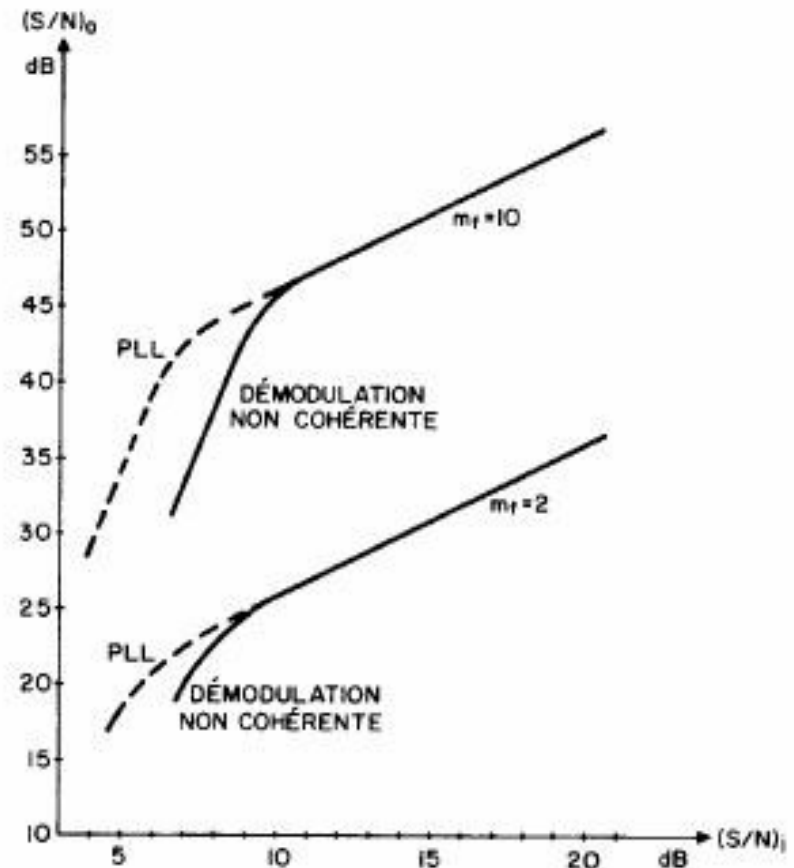
En FM, il donc est toujours possible d'améliorer la qualité en augmentant l'indice de modulation mais à contrario il y a évidemment une augmentation de l'encombrement spectral de l'émetteur.

C'est pourquoi les émissions en radiodiffusion commerciale se font avec une excursion en fréquence,  $\Delta f$ , assez importante de 75kHz.

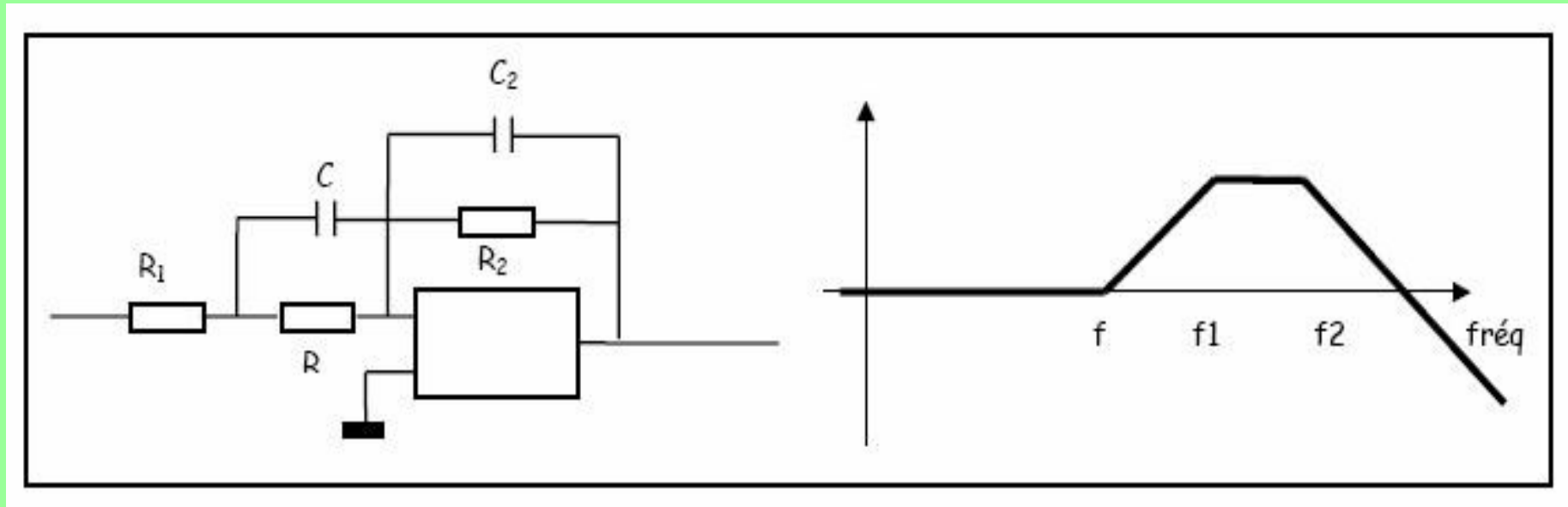
# Influence de $m$ et du type de démodulateur sur la qualité de la liaison.



Amélioration du rapport signal sur bruit au niveau du démodulateur non cohérent.



En utilisant la technique de la préaccentuation, à l'aide d'un filtre on favorise les fréquences élevées du signal vocal, on améliore la qualité d'une liaison FM en phonie.



Ce type de filtre accentue les fréquences aiguës du spectre audio compris entre 10 à 20dB selon le choix des fréquences  $f$  et  $f_1$

A la réception, un filtre corrige les aiguës à leur niveau normal et diminue simultanément le niveau du bruit qui s'est introduit dans la transmission.

#### 4) Emetteur FM à quartz:

Pour émettre en modulation de fréquence, il faut produire une porteuse de fréquence:

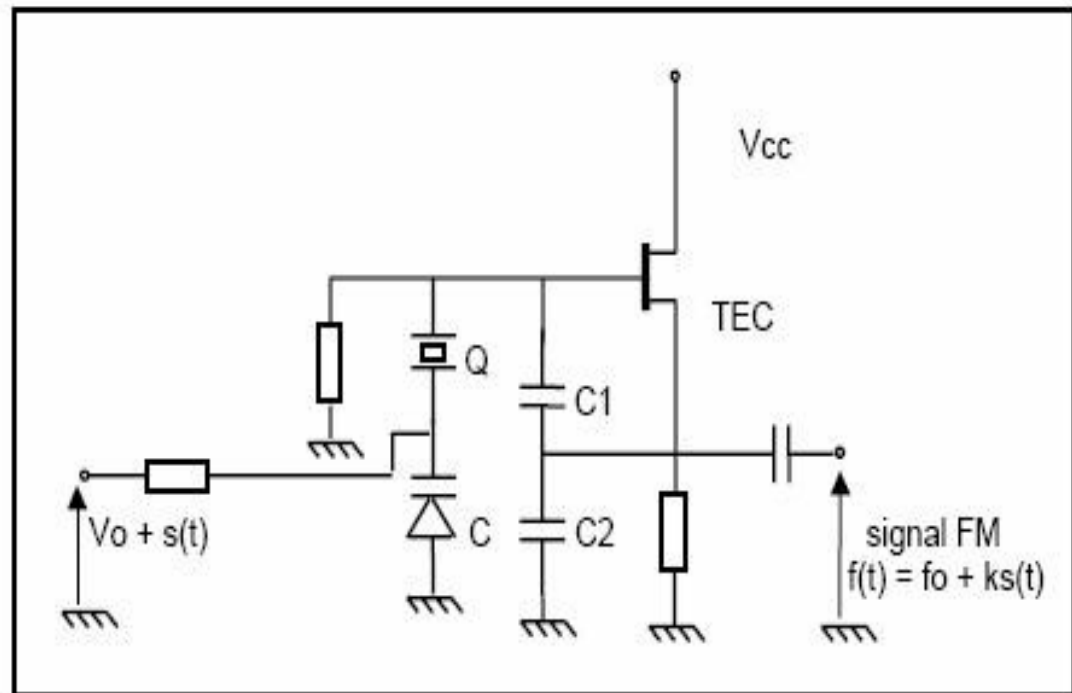
$$f(t) = f_0 + k*s(t) \text{ avec}$$

$f_0$  porteuse de fréquence très stable et  $k*s(t)$  l'excursion en fréquence

Un signal modulé en fréquence est toujours produit par un VCO le plus linéaire possible travaillant autour de la fréquence de la porteuse et commandé par le signal modulant. *(voir diapo 20)*

Une façon d'assurer la stabilité de  $f_0$  est d'utiliser un VCO à quartz mais on peut aussi faire varier légèrement la fréquence de ces oscillateurs en introduisant dans le circuit accordé une diode à capacité variable (Varicap) jouant le rôle d'un condensateur dont la valeur de la capacité  $C$  dépend de la tension modulante.

On obtient ainsi un oscillateur à quartz commandé en tension appelé VCXO (Voltage Commanded Cristal Oscillator)

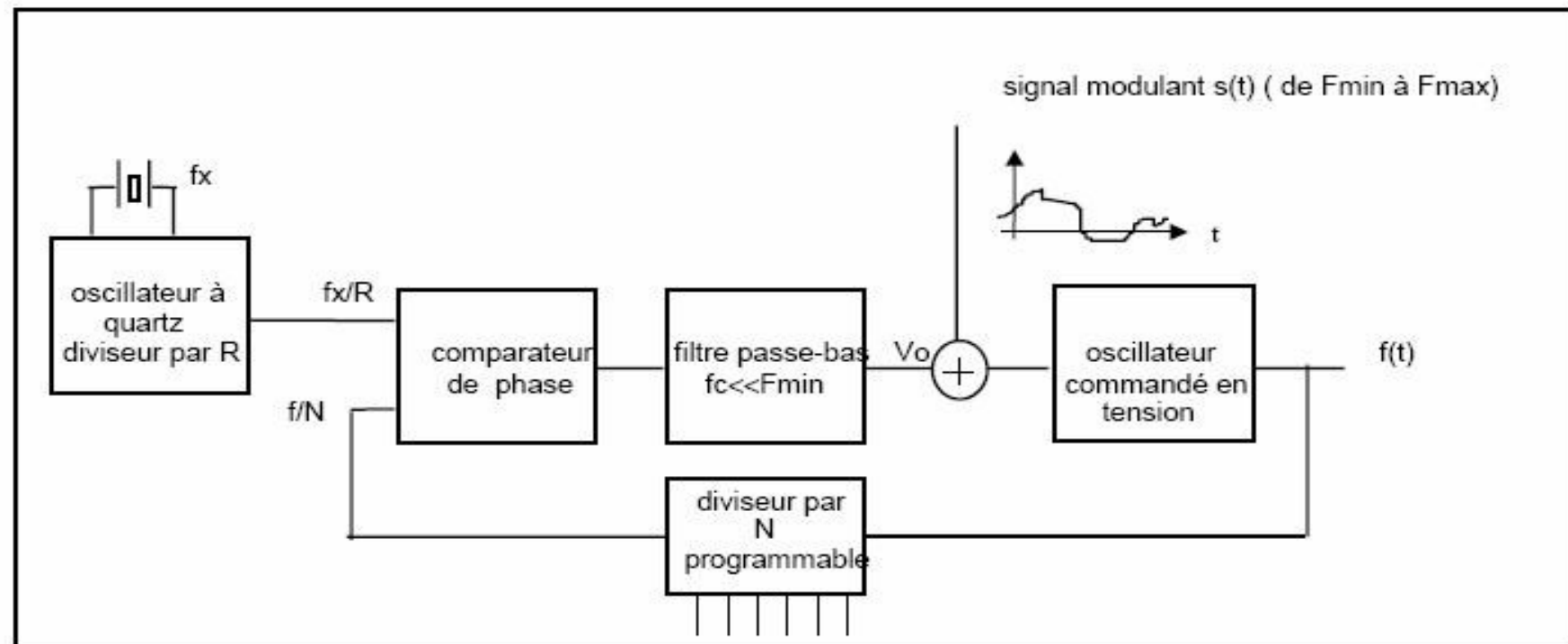




## 5) Emetteur FM à synthétiseur:

Pour satisfaire aux exigences de stabilité de  $f_0$  et d'excursion en fréquence importante, on emploie souvent un modulateur à PLL (boucle à verrouillage de phase) *diapo20*

On supprime ainsi les dérives éventuelles du VCO en l'accrochant sur un oscillateur à quartz au moyen d'une PLL



Fonctionnement:

En absence du signal modulant, le VCO se verrouille sur l'oscillateur à quartz et on a:

$$f(t)/N = f_x/R$$

En présence du signal modulant, la fréquence du VCO varie proportionnellement à  $s(t)$  (*diapo20*)

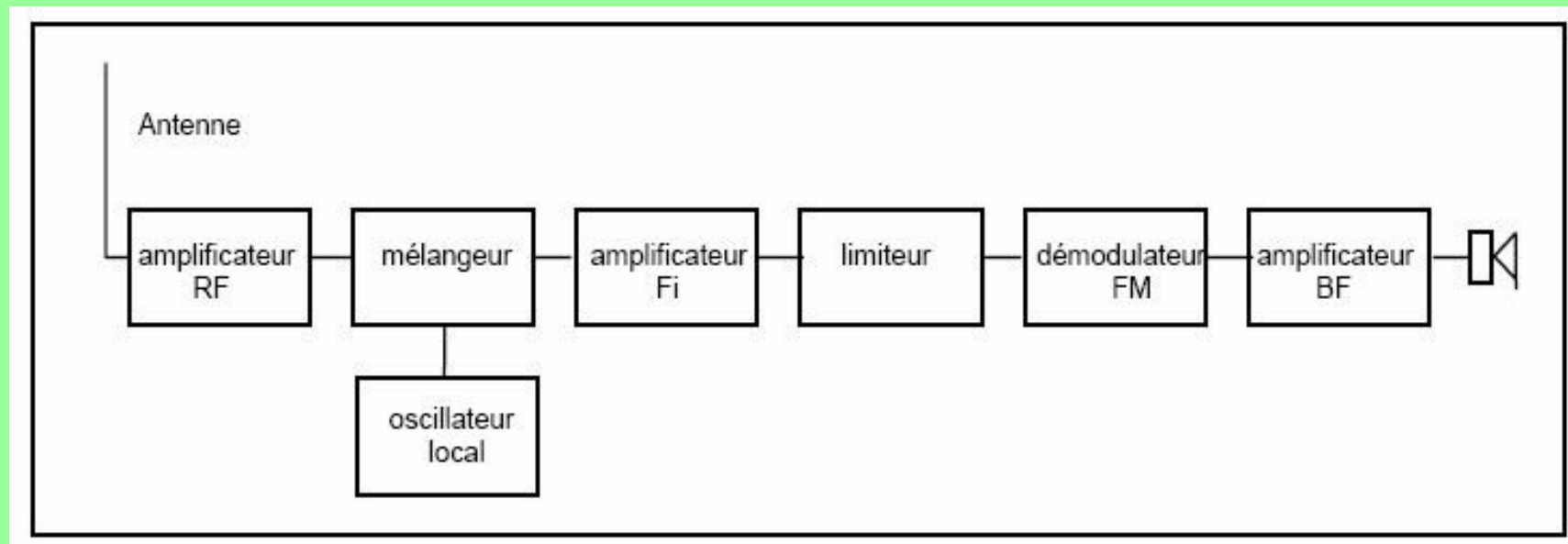
La PLL est incapable de réagir aux variations rapides de la fréquence de sortie  $f(t)$  liées au signal modulant car le filtre de la boucle a une fréquence de coupure très basse par rapport à la fréquence min de ce signal. Elle stabilise donc la fréquence centrale  $f_0$  du VCO mais son excursion reste libre.

$$f(t) = f_x * N/R + k * s(t) \text{ avec } k \text{ pente du VCO}$$

N permettra la sélection des canaux en modifiant la fréquence

## 6) Récepteur FM:

Dans un récepteur FM, pour faire le choix d'une émission, on utilise en général la technique du changement de fréquence.



En radiodiffusion, la valeur standard de  $f_i$  est de 10,7MHz

La BP de l'étage Fi va de 10kHz pour les émissions en bande étroite à 300kHz pour la radiodiffusion commerciale

## Limiteur:

Le limiteur ramène l'amplitude du signal  $F_i$  à une valeur constante. Cela ne gêne pas puisque l'information se trouve dans la fréquence instantanée.

- \* En l'écrêtant ainsi on supprime une grande partie des parasites
- \* Tous les émetteurs, faibles ou puissants, se retrouvent avec le même niveau  $f_i$  et donc un volume sonore identique dans les enceintes.
- \* Certains démodulateurs FM sont sensibles à l'amplitude du signal et démodulent les variations d'amplitude comme les variations de fréquences, d'où l'intérêt de maintenir une amplitude constante à l'entrée du démodulateur.

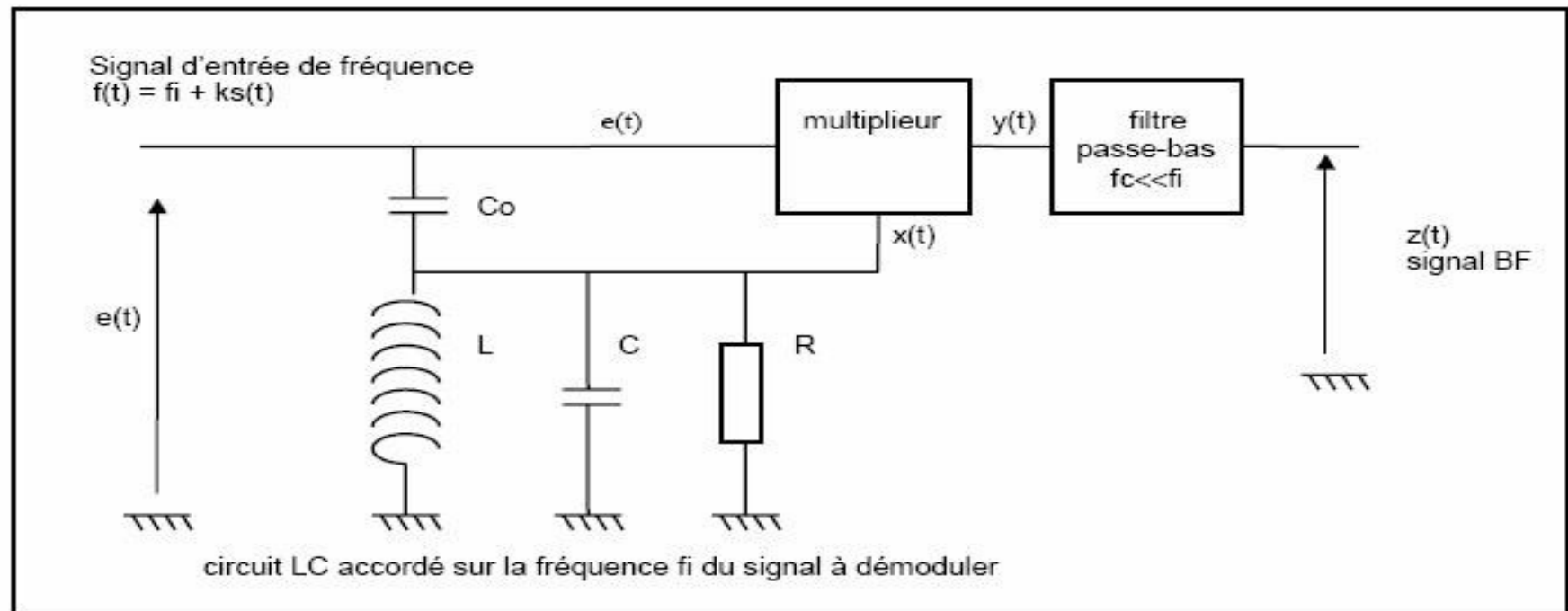
Lorsque le signal modulé est débarrassé des fluctuations parasites de son amplitude, il peut être démodulé par un discriminateur à quadrature ou un démodulateur à PLL

## 7) Démodulateurs de fréquence:

**Le discriminateur à quadrature** (ou de phase ou à coïncidence) type très utilisé en télécommunications.

Construit autour d'un multiplieur analogique. Le signal à démoduler  $e(t)$  est multiplié par le signal  $x(t)$  qui est le signal  $e(t)$  déphasé au moyen d'un filtre.

Quand le circuit LC est accordé sur la fréquence  $f_i$ , on démontre que la partie basse du mélange en sortie du multiplieur est proportionnelle au signal modulant  $s(t)$ :  $z(t) = A*s(t)$



**Le démodulateur à PLL** donne de meilleurs résultats que le précédent lorsque le signal à démoduler est très bruité. Il sera donc particulièrement et principalement pour la réception des signaux faibles issus d'émetteurs lointains ou de faibles puissances (ex: satellites)

Lorsque la boucle est verrouillée, le VCO fournit à sa sortie un signal de fréquence égale à celle du signal d'entrée

$$f'(t) = f(t) = f_i + k*s(t)$$

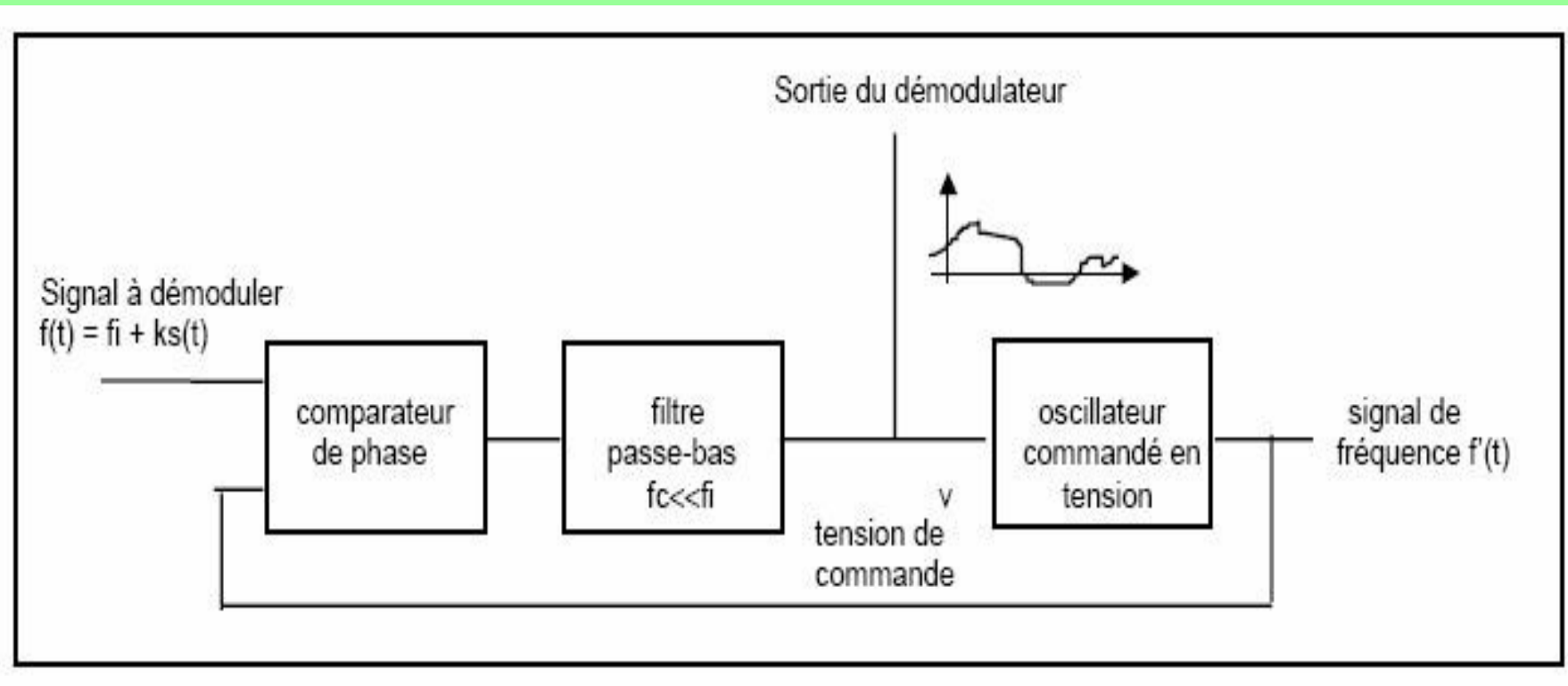
Comme le VCO est caractérisé par sa pente  $k_0$  autour de  $f_i$ :

$$f'(t) = k_0 * v(t)$$

D'où:

$$v(t) = f'(t)/k = f_i / k_0 + k s(t) / k_0 = V_0 + A*s(t)$$

La tension de commande du VCO comprend une composante continue  $V_0$  qu'il est facile de supprimer au moyen d'un condensateur de liaison et d'une tension variable proportionnelle au signal modulant.



**Applications et vérification des apports du cours dans les TP**

**Bon courage**