



Modulations analogiques de porteuse AM FM PM

Filière SMP - Cycle Licence - Semestre 6

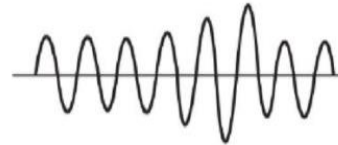


Qu'est ce que la modulation ?

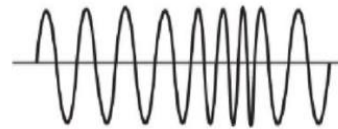
- La modulation consiste à transformer un signal sinusoïdal connu appelé porteuse par le signal à transmettre.
- C'est la variation d'une grandeur caractéristique la porteuse (Amplitude, Fréquence ou Phase) en fonction du signal informatif.
- Elle translate le spectre en bande de base vers une fréquence plus élevée.

Exemple

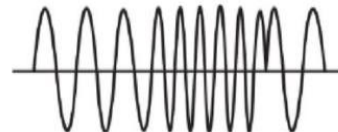
Signal informatif (Modulant)



Signal AM

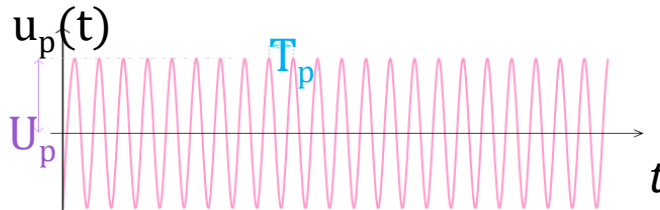


Signal FM



Signal PM

Signal porteur (Porteuse)



Principe de base

Le signal à transmettre est par conséquent intégré dans une **onde sinusoïdale** de **haute fréquence** appelée **porteuse** :

$$u_p(t) = U_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \varphi_p)$$

➡ Les paramètres modifiables sont :

→ l'amplitude : U_p

→ la fréquence : $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$

→ la phase : φ_p

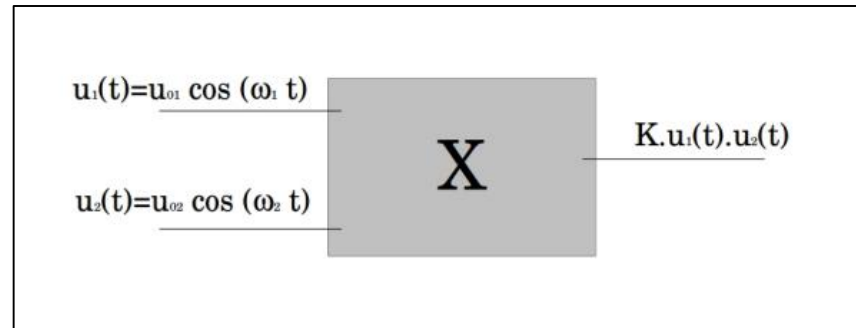
➡ Modulation d'amplitude **AM**

➡ Modulation de fréquence **FM**

➡ Modulation de phase **PM**

Modulation AM

- Première modulation employée en Télécommunication
- L'élément de base est un multiplieur (mélangeur) :



Avec en entrée $u_1(t) = u_{01} \cos(\omega_1 t)$ et $u_2(t) = u_{02} \cos(\omega_2 t)$, on obtient en sortie :

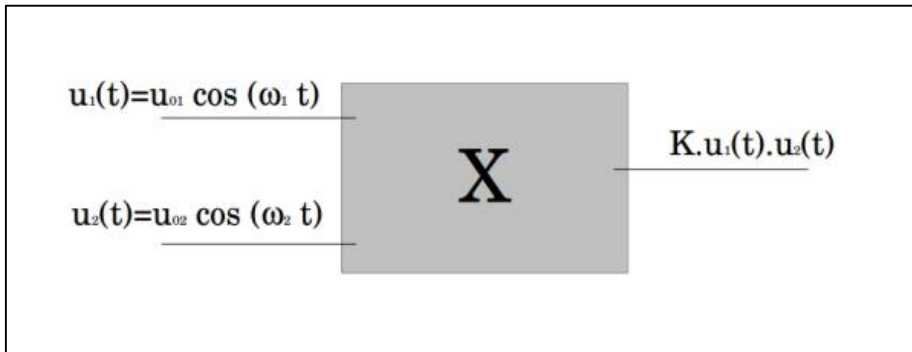
$$v(t) = K.u_1(t).u_2(t)$$

$$v(t) = K.\frac{u_{01}u_{02}}{2}[\cos((\omega_1 + \omega_2).t) + \cos((\omega_1 - \omega_2).t)]$$

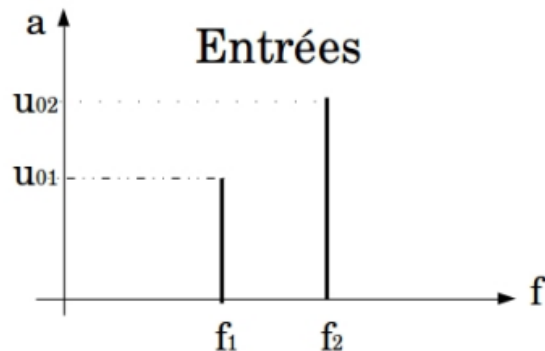
Modulation AM

- Analyse fréquentielle des signaux :

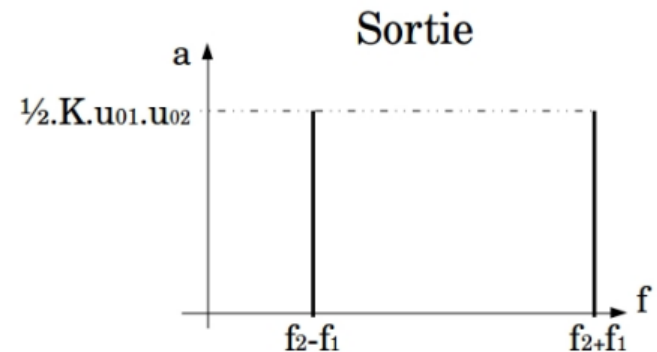
Définition : Le spectre d'un signal est la représentation fréquentielle du signal.



$$u_1(t) = u_{01} \cos(\omega_1 t) \text{ et } u_2(t) = u_{02} \cos(\omega_2 t)$$



$$v(t) = K \cdot \frac{u_{01} u_{02}}{2} [\cos((\omega_1 + \omega_2).t) + \cos((\omega_1 - \omega_2).t)]$$



Modulation AM avec porteuse

Composante
continue

U_0

$$u_s(t) = A (1 + m \cos(2\pi f_m t)) \times \cos(2\pi f_p t)$$

Signal
modulé AM-
DBAP

$u_m(t)$

Signal
modulant
basse
fréquence

$u'_m(t)$

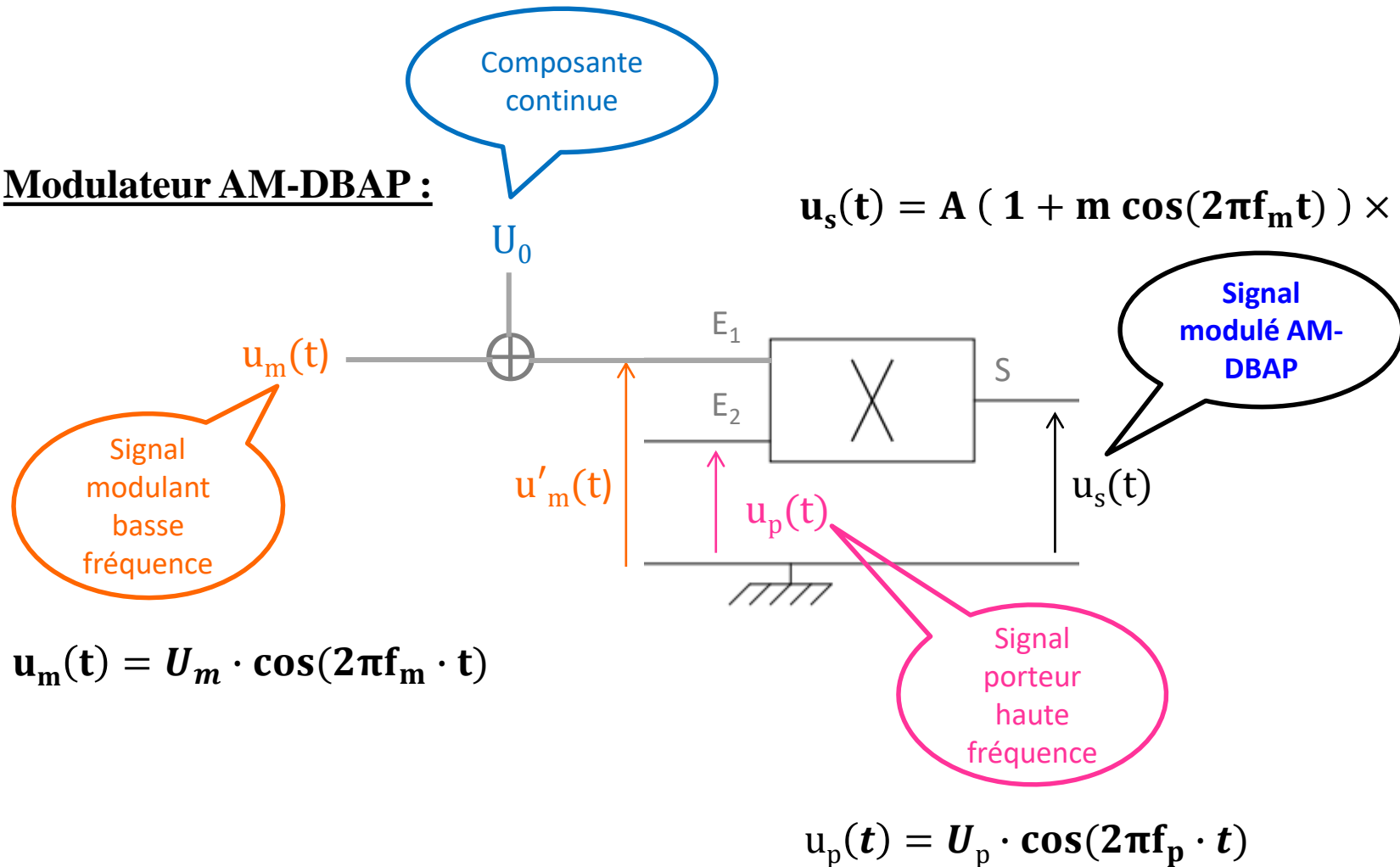
$u_p(t)$

Signal
porteur
haute
fréquence

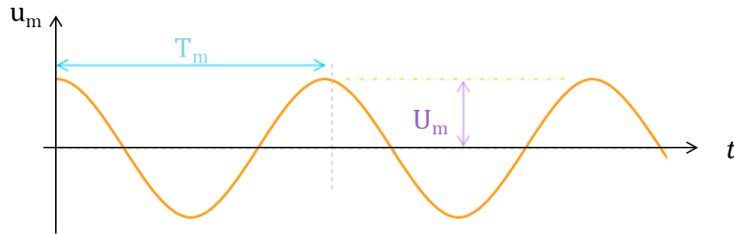
$u_s(t)$

$$u_m(t) = U_m \cdot \cos(2\pi f_m \cdot t)$$

$$u_p(t) = U_p \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$$

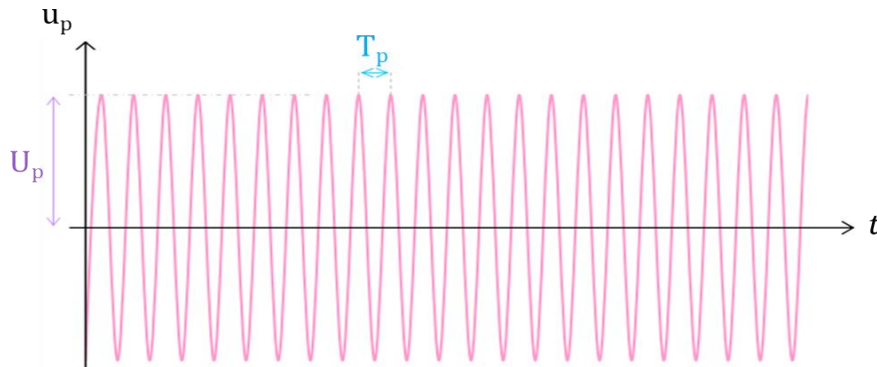


Modulation AM avec porteuse



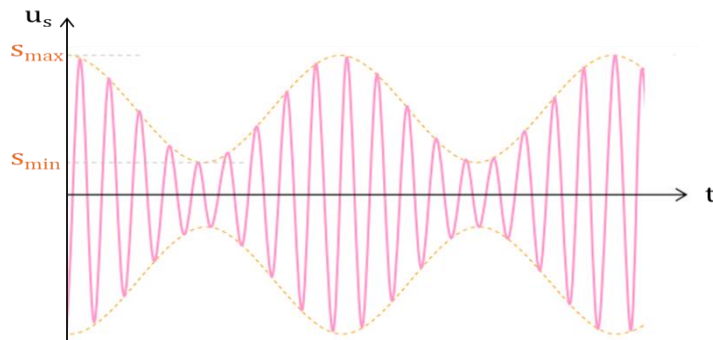
Signal modulant basse fréquence

$$u_m(t) = U_m \cdot \cos(2\pi f_m \cdot t)$$



Signal porteur haute fréquence

$$u_p(t) = U_p \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$$



Signal modulé AM-DBAP

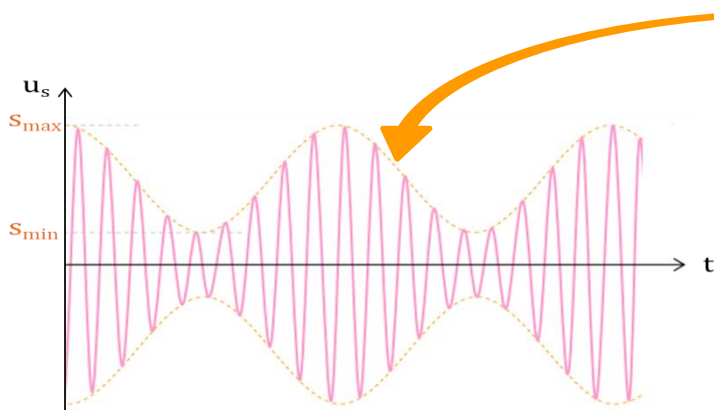
$$u_s(t) = A (1 + m \cos(2\pi f_m t)) \times \cos(2\pi f_p t)$$

Modulation AM avec porteuse

modulant $u_m(t) = U_m \cdot \cos(2\pi f_m \cdot t)$

porteur $u_p(t) = U_p \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$

Signal modulé AM-DBAP :



$$u_s(t) = A (1 + m \cos(2\pi f_m t)) \times \cos(2\pi f_p t)$$

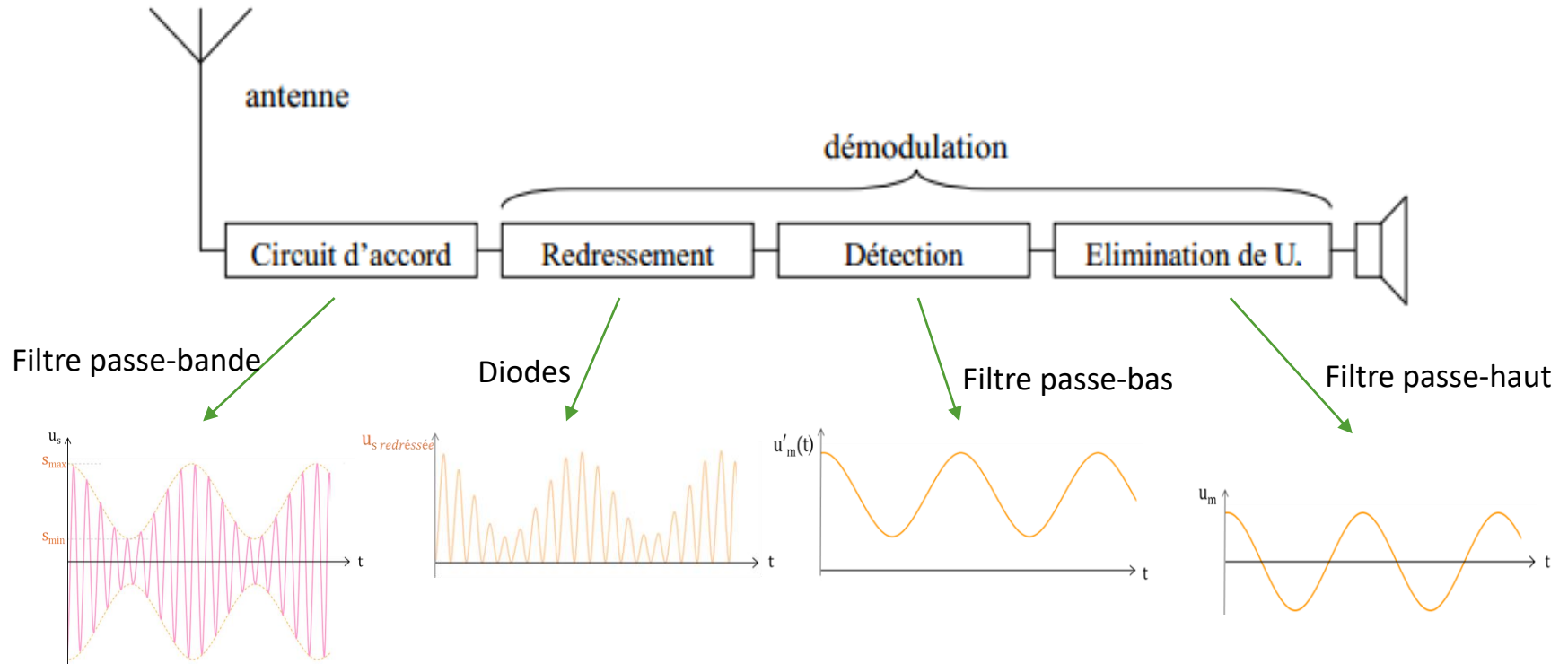
avec $A = kU_p U_0$

Taux de modulation : $m = \frac{U_m}{U_0} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}}$

Condition de bonne modulation : $m < 1$

Modulation AM avec porteuse

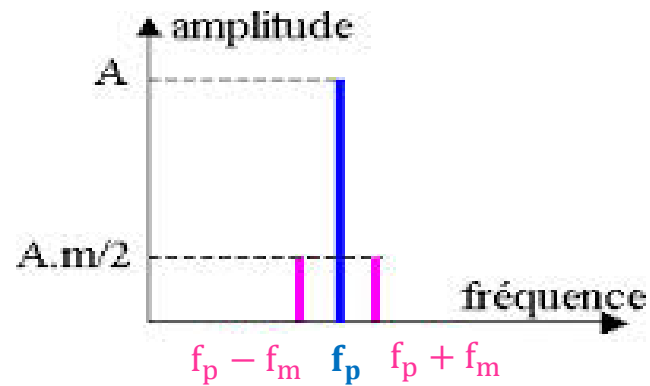
Démodulateur AM-DBAP :



Modulation AM avec porteuse

Spectre du signal modulé AM-DBAP :

$$u_s(t) = \frac{A \cdot m}{2} \cos(2\pi(\mathbf{f_p} + \mathbf{f_m})t) + \frac{A \cdot m}{2} \cos(2\pi(\mathbf{f_p} - \mathbf{f_m})t) + A \cos(2\pi\mathbf{f_p}t)$$



$$B = 2 f_m$$

Modulation AM avec porteuse

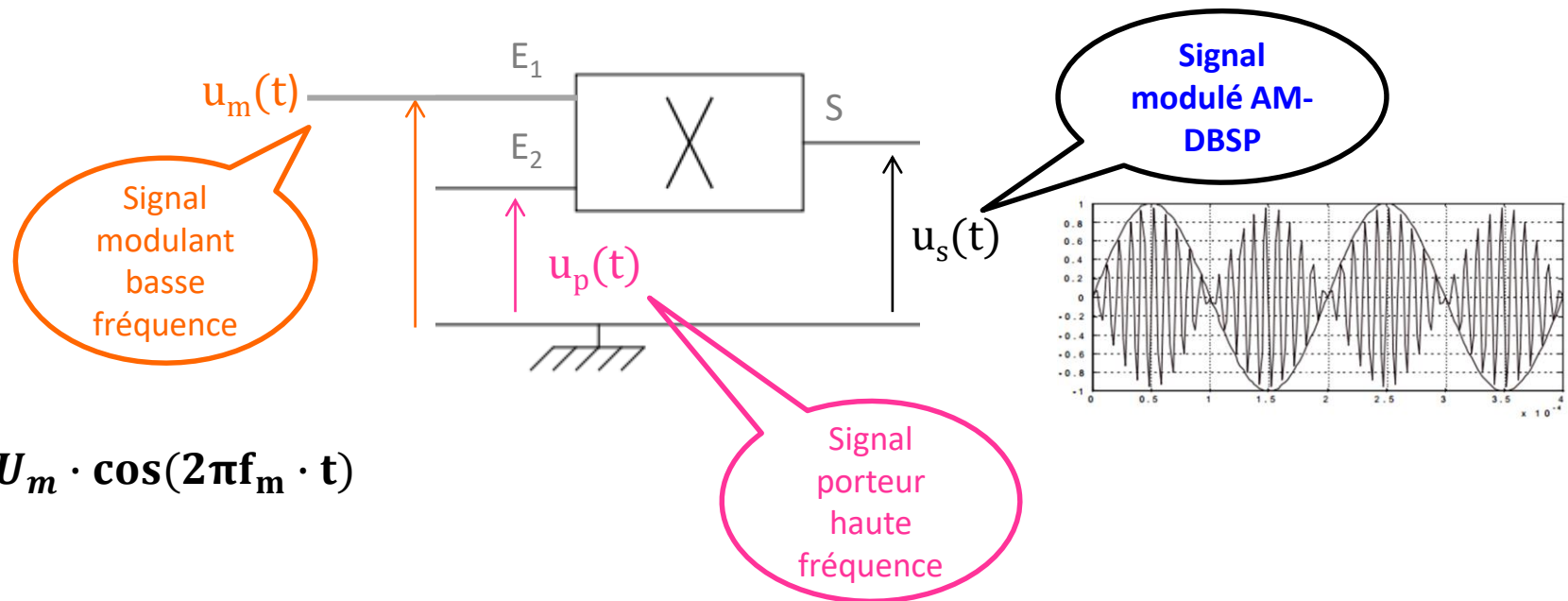
Inconvénient de la modulation AM-DBAP :

- Transporte la plus grande partie de son énergie dans la porteuse alors que l'information utile se trouve contenue dans les bandes latérales
- Solution d'économie en énergie : supprimer la porteuse lors de l'émission.

Modulation AM sans porteuse

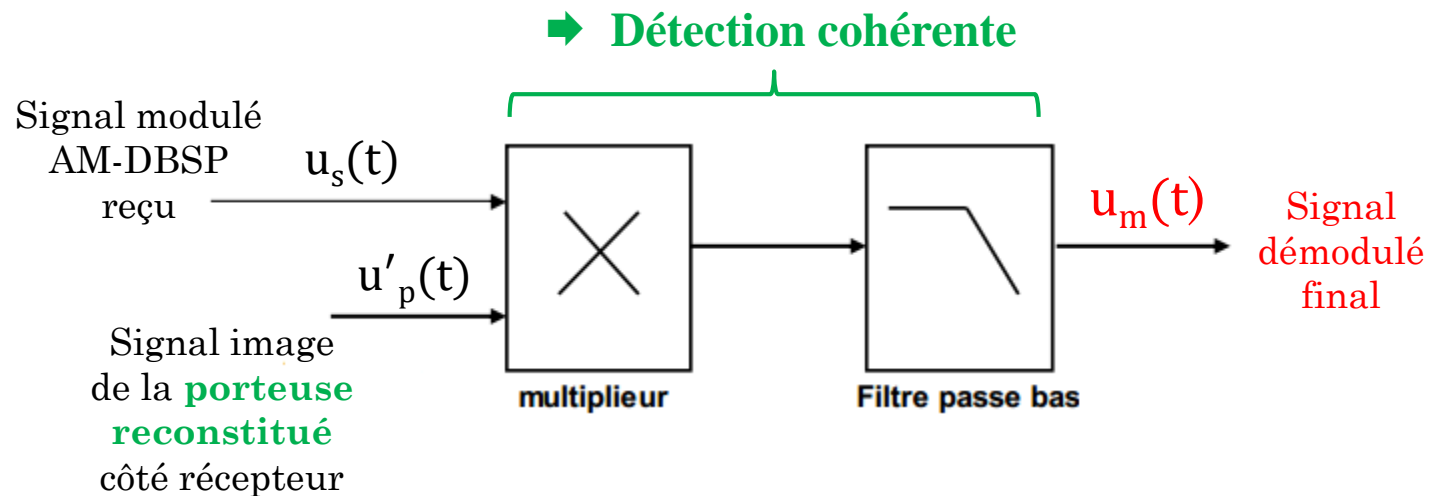
Modulateur AM-DBSP :

$$u_s(t) = k \times U_m \cos(2\pi f_m t) \times U_p \cos(2\pi f_p t)$$



Modulation AM sans porteuse

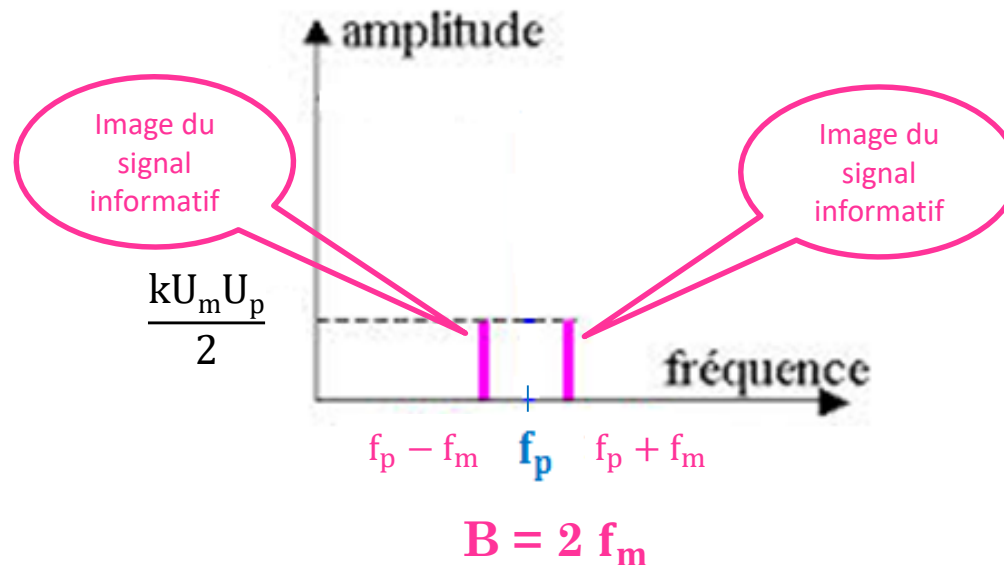
Démodulateur AM-DBSP :



(Boucle à verrouillage de phase PLL)

Modulation AM sans porteuse

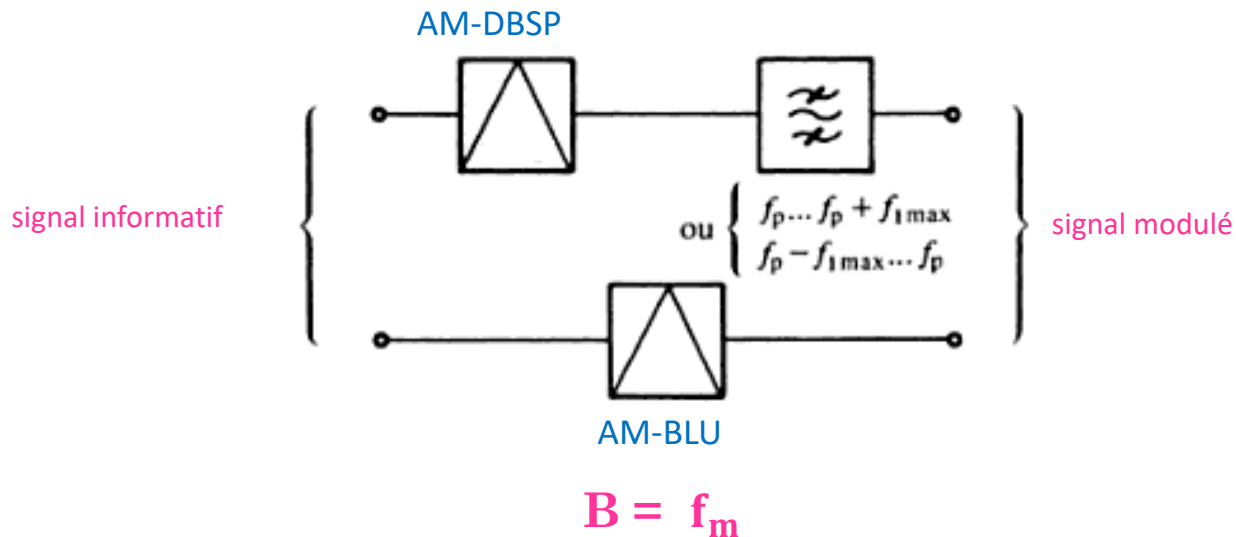
Spectre du signal modulé AM-DBSP :



➡ L'information transmise est redondante car une seule bande suffit.

Modulation AM sans porteuse à bande latérale unique

Modulateur AM-BLU :



Démodulateur AM-BLU :

Le signal BLU reçu est multiplié par $U'_p \cos(2\pi f_p t)$ suivi par un filtrage passe bas pour éliminer la composante haute fréquence en $2f_p$.

Modulation angulaire

On regroupe sous le terme modulation angulaire :

la **Modulation de Fréquence FM** et la **Modulation de Phase PM**.

Pour un signal modulant $u_m(t)$:

- **En modulation de phase :**

$$\theta_i(t) = 2\pi f_p t + k_p u_m(t) \quad \text{et} \quad f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} = f_p + \frac{k_p}{2\pi} \frac{du_m(t)}{dt}$$

k_p est le coefficient de proportionnalité du modulateur (en rd/V) .

- **En modulation de fréquence :**

$$\theta_i(t) = 2\pi f_p t + 2\pi k_f \int_0^t u_m(x) dx \quad \text{et} \quad f_i(t) = f_p + k_f u_m(t)$$

k_f est la sensibilité du modulateur (en Hz/V).

Modulation angulaire

Elle consiste à faire varier l'argument d'une **onde porteuse** sinusoïdale en fonction du message à transmettre $u_m(t)$:

$$u_p(t) = U_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) = U_p \cos(\theta_i(t))$$

où U_p et ω_p sont des constantes.

- la phase instantanée de $u_p(t)$: $\theta_i(t) = \omega_p t + \varphi_p(t)$

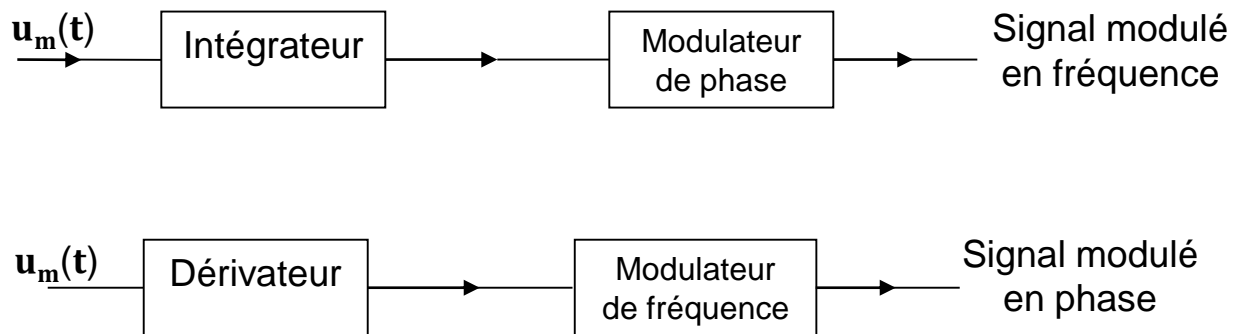
- la fréquence instantanée de $u_p(t)$: $f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} = f_p + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_p(t)}{dt}$

➡ La fonction $\varphi_p(t)$ est appelée excursion (variation) de phase instantanée.

➡ La fonction $\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_p(t)}{dt}$ est appelée excursion de fréquence instantanée.

Modulation angulaire

La modulation de fréquence et la modulation de phase présentent des caractéristiques analogues et on peut facilement déduire l'une à partir de l'autre :



On va s'intéresser dans la suite à la modulation de fréquence en conséquence.

Modulation angulaire

La modulation de fréquence :

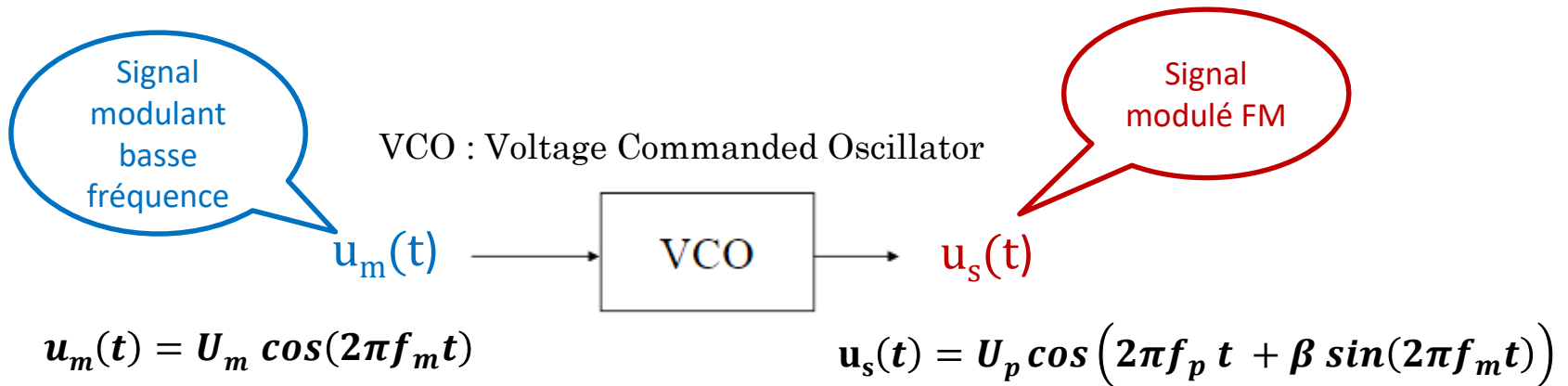
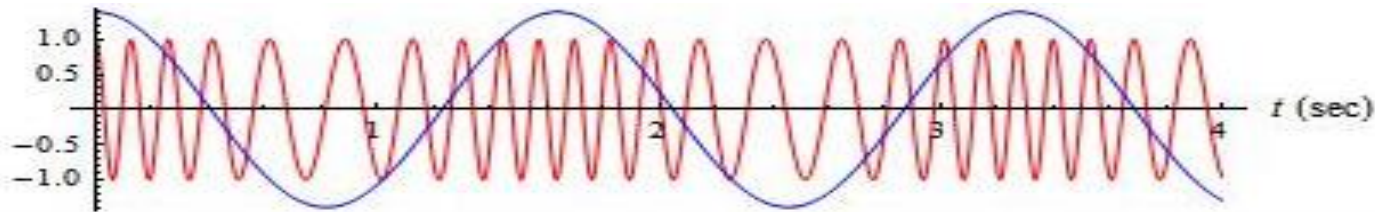
- ➔ Générer un signal FM consiste à transformer des variations de tension en variations de fréquence (VCO : Oscillateur Commandé en Tension).
- Cette transformation, tension $u \rightarrow$ fréquence f , doit être linéaire :

$$f(u) = f_p + \alpha u$$

- Si $u = 0$ alors $f = f_p$: le modulateur FM délivre la porteuse non modulée, α est appelé sensibilité du modulateur (en Hz/V) et mesure la variation de fréquence Δf produite par une variation de tension.

Modulation angulaire

Génération d'un signal FM :



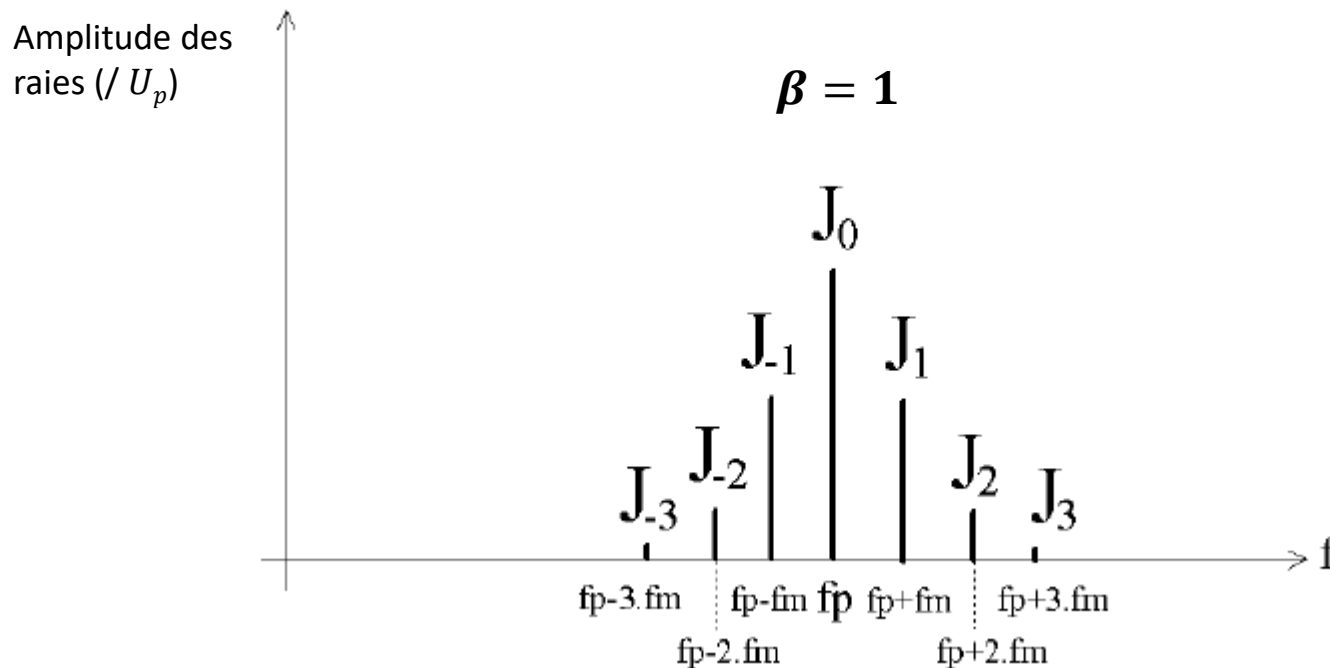
Indice de modulation : $\beta = \frac{U_m k_f}{f_m} = \frac{\Delta f}{f_m}$

Δf : Excursion de fréquence.

Modulation angulaire

Spectre d'un signal FM : Fonctions de Bessel $J_n(\beta)$

On obtient un spectre de raies symétrique par rapport à f_p et avec un écart de f_m entre chaque paire de raies successives. On a : $|J_n| = |J_{-n}|$



Modulation angulaire

Spectre d'un signal FM : approximation

- On remarque qu'en théorie le spectre est infini (nombre de raies infini).
- On cherche souvent à optimiser la largeur du spectre transmis pour qu'il soit adapté à la largeur du support de transmission.
- ➡ La transmission d'un signal modulé en fréquence nécessite alors une plage de fréquence de largeur :

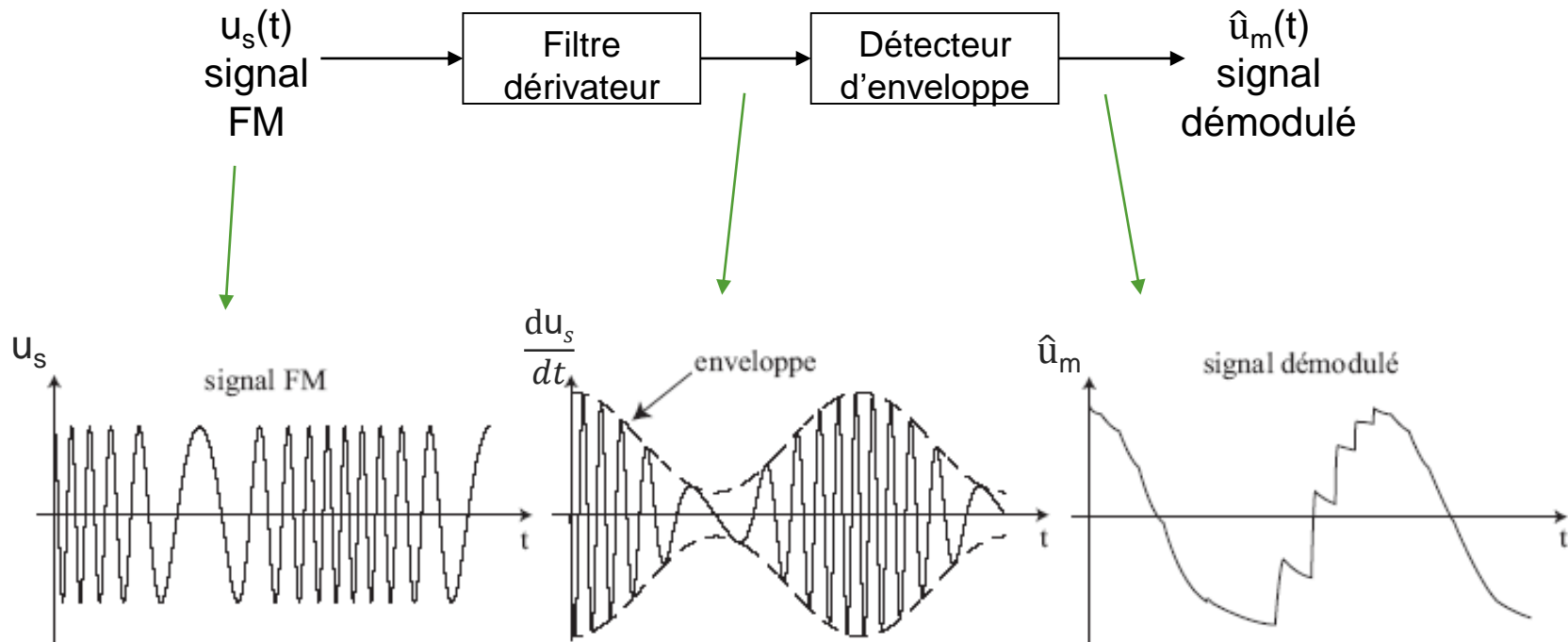
$$B \approx 2(\beta + 1)f_m \approx 2(\Delta f + f_m)$$

La largeur de bande B s'appelle Bande de Carson. On montre qu'elle conserve 98 % de la puissance du signal modulé.

Modulation angulaire

Démodulation d'un signal FM :

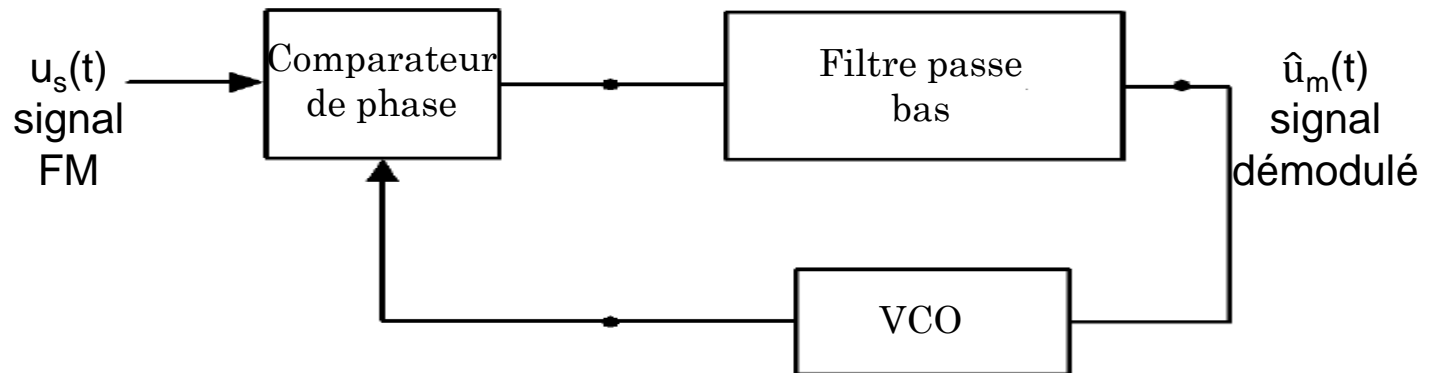
➔ Discriminateur :



Modulation angulaire

Démodulation d'un signal FM :

- ➔ La boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop)



Comparaison : modulation d'amplitude et de fréquence

- ➔ La modulation de fréquence présente l'avantage par rapport à la modulation d'amplitude d'être beaucoup moins sensible aux parasites électromagnétiques.
- ➔ De plus en FM toute l'énergie transmise contient l'information alors qu'en AM les deux raies latérales sont redondantes et la porteuse ne contient pas d'information.
- ➔ Par contre les circuits de modulation et de démodulation sont en général plus compliqués en FM qu'en AM.

Exercices d'application

- ➡ Retrouver l'équation du signal modulé AM-DBAP en explicitant A et m :

$$\mathbf{u_s(t) = A (1 + m \cos(2\pi f_m t)) \times \cos(2\pi f_p t)}$$

Signal modulant : $u_m(t) = U_m \cdot \cos(2\pi f_m \cdot t)$

Signal porteur : $u_p(t) = U_p \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t)$

Composante continue : U_0

- ➡ Exprimer les fréquences contenues dans le signal modulé $\mathbf{u_s(t)}$.