

Chapitre 4 – Méthodes de modulation et démodulation

I- Généralités : *Nécessité de moduler une onde porteuse HF*

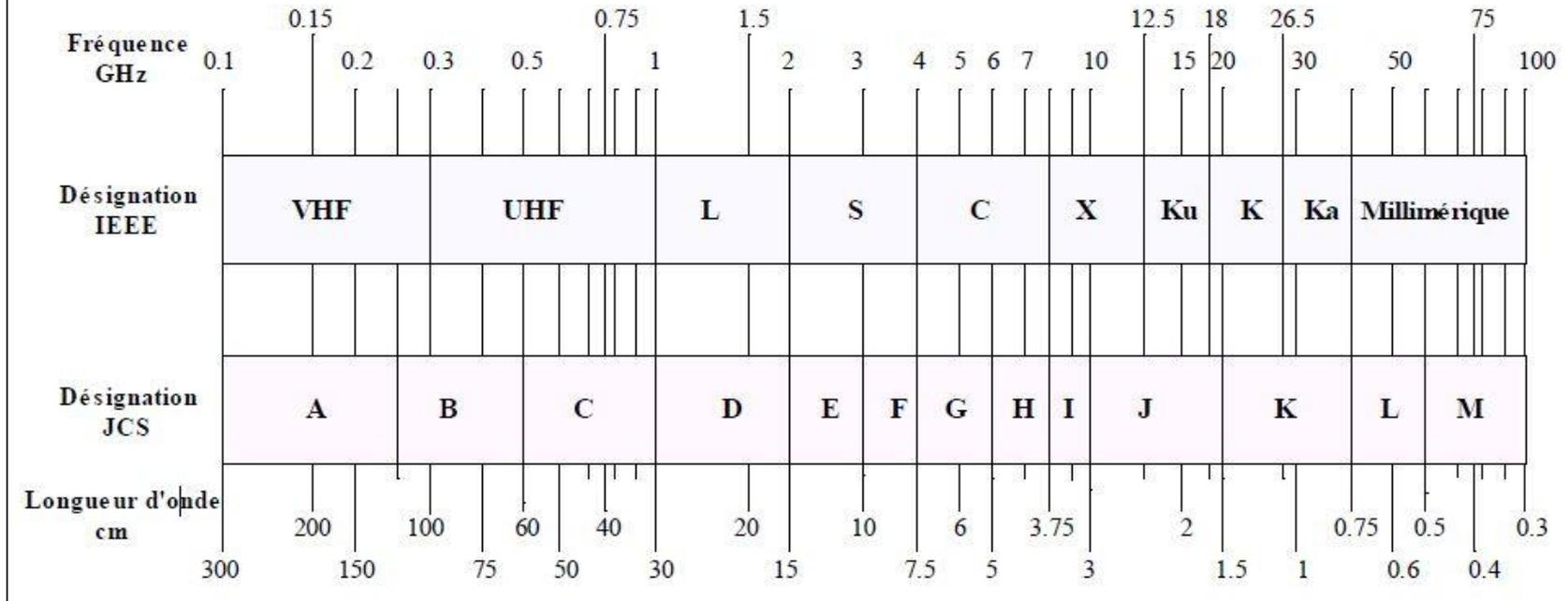
En radiodiffusion, les informations à transmettre sont des signaux électriques dont les fréquences correspondent à des vibrations sonores (signal donné par un micro, musique), c'est à dire des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz.

Mais on ne peut pas transmettre directement par voie hertzienne ces signaux de basse fréquence, il est nécessaire d'utiliser ces signaux BF pour moduler une onde "porteuse" de haute fréquence.

Les trois principales raisons sont les suivantes :

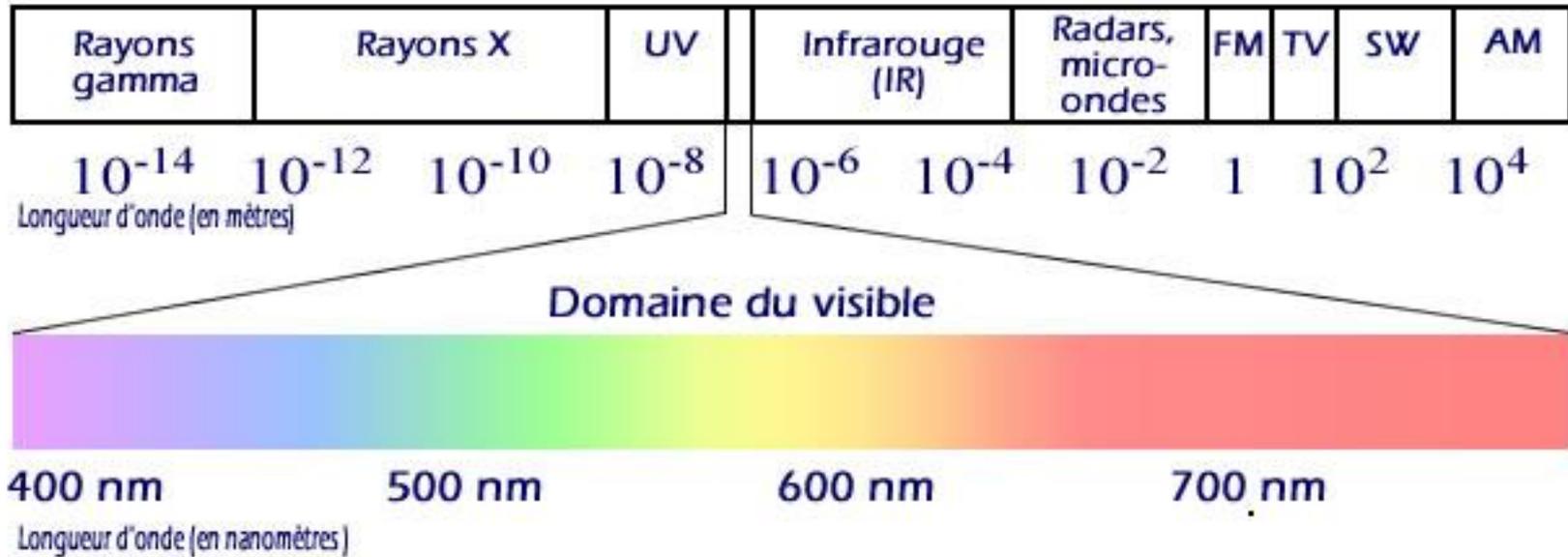
- La portée de l'émission est plus grande en haute fréquence.
- L'émission d'une onde basse fréquence (inférieure à 20 kHz) nécessiterait une antenne très grande (plusieurs centaines de mètres de hauteur).
- Le problème du choix, au niveau du récepteur, entre toutes les ondes reçues par l'antenne réceptrice.

Répartition des fréquences



- Fréquences radioélectriques : 90kHz à 30 MHz
 - GO (grandes ondes) : 150kHz à 275kHz
 - MO (moyennes ondes) : 275kHz à 520kHz
 - PO (petites ondes) : 520kHz à 1605kHz
- VHF (Very High Frequency) : 30MHz à 300MHz (FM : 88MHz à 108MHz)
- UHF (Ultra High Frequency) : 300MHz à 3GHz
 - radios-modems (433MHz, 869MHz), four à micro-ondes, GSM (900MHz et 1.8 GHz), ZigBee (868MHz, 915MHz, 2.4 GHz), Wifi (2.4 GHz), Blue Tooth (2.4GHz), liaisons satellites, radars...
- SHF (Super High Frequency) : 3GHz à 30GHz - (Wifi 5GHz)
- EHF (Extremely High Frequency) : 30GHz à 300GHz

Spectre électromagnétique



Différents modes de modulation :

- **Analogiques : AM-BLU-FM-PM-QAM**
- Numériques : APSK-ASK-CLK-CPM-FSK-MSK-OFDM_OOK-PPM-PSK-QAM-TCM

Principe de la modulation

Quelques définitions :

- Le signal à transmettre est utilisé pour modifier l'une des caractéristiques d'un signal HF appelé **onde porteuse**
- Le signal BF à transmettre est appelé le **signal modulant** (paroles, musiques, information)
- Dans le cas d'une onde porteuse sinusoïdale, on peut moduler :
 - l'amplitude
 - la fréquence
 - la phase

Le signal $V = A * \cos(\omega * t + \varphi)$

→ si $A = A(t)$: **modulation d'amplitude**

→ si $\omega = \omega(t)$: **modulation de fréquence**

→ si $\varphi = \varphi(t)$: **modulation de phase**

Plus généralement :

Le signal $V = A * \cos(\Omega * t)$

→ si $A = A(t)$: **modulation d'amplitude**

→ si $\Omega = \Omega(t)$: **modulation angulaire**

Notations :

ω : Signal modulant ou
enveloppe(BF)

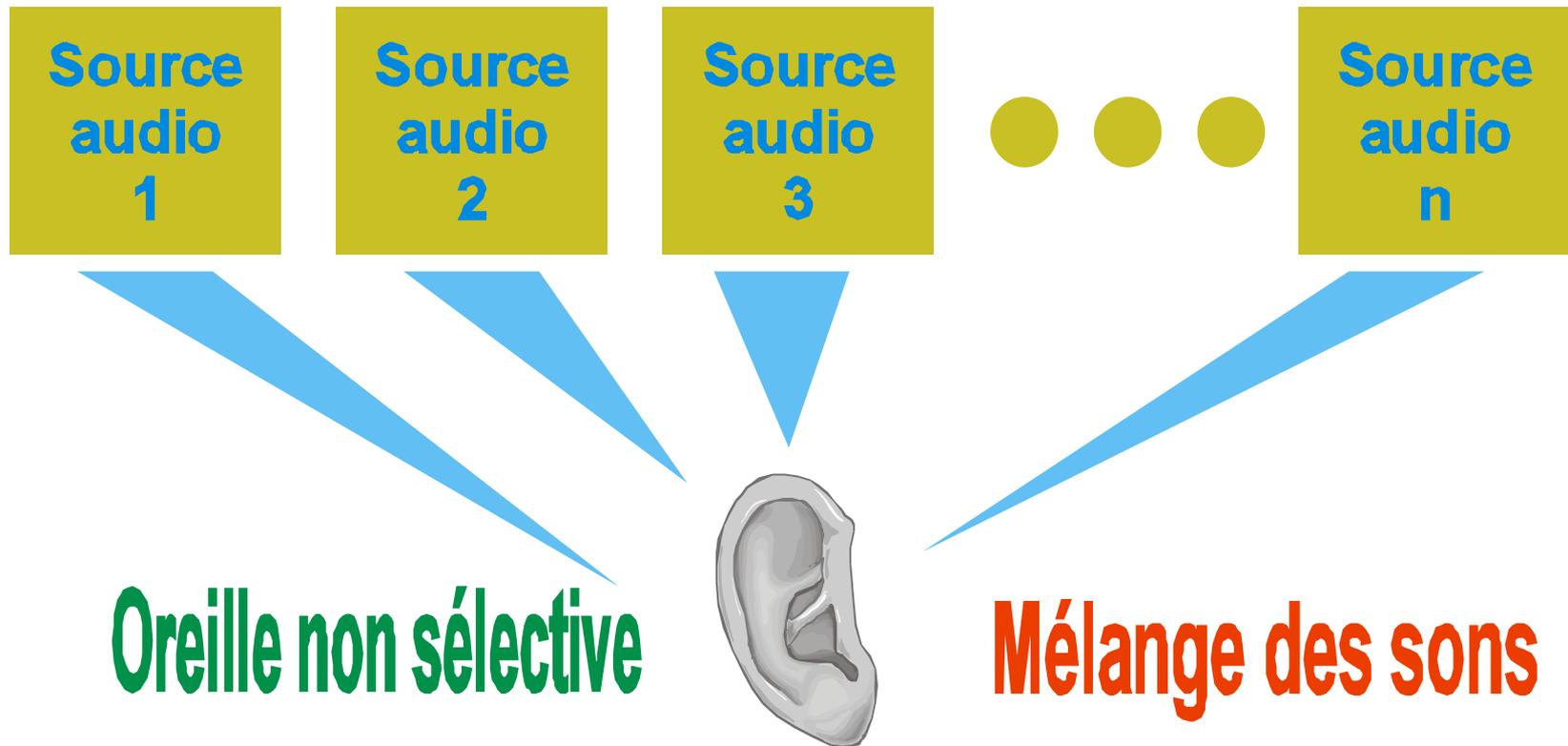
Ω : Onde porteuse (HF)

Signal modulé : celui qui
circule

Bandes de fréquences.

Exemple de signaux audiofréquence :

$F_{\text{mini}} = 10 \text{ Hz}$ - $F_{\text{maxi}} = 22 \text{ kHz}$



Bande de fréquence occupée

$F_{\text{mini}} = 10 \text{ Hz}$ - $F_{\text{maxi}} = 22 \text{ kHz}$

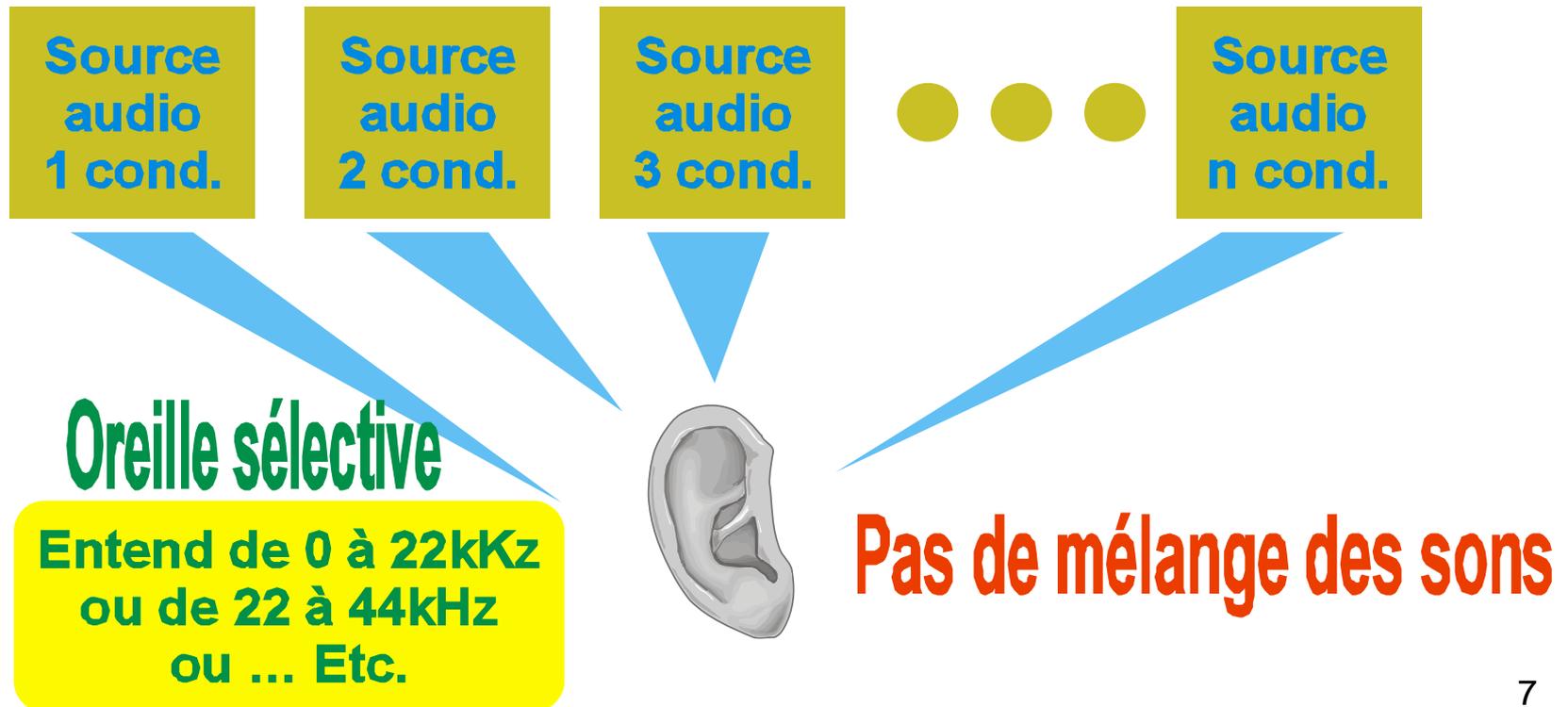


Bandes de fréquences

Exemple de signaux audio conditionnés :

Fmini - Fmaxi : 0-22kHz, 22- 44kHz, 44- 66kHz ...

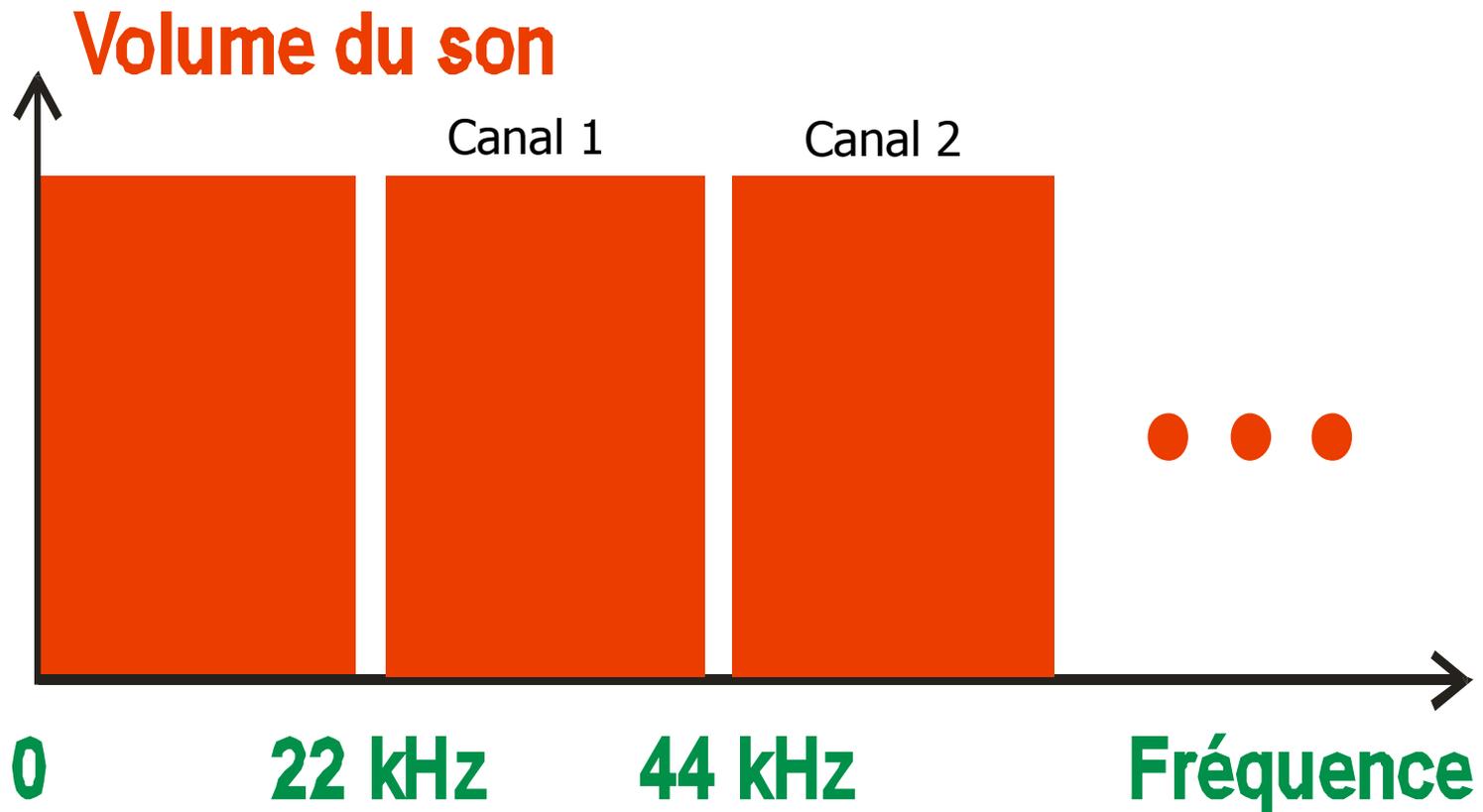
On attribue à chaque émetteur une bande de fréquence particulière



Bande de fréquence occupée.

$$0 \text{ Hz} - 22 \text{ kHz} + 22 \text{ kHz} - 44 \text{ kHz} + \dots = n * 22 \text{ kHz}$$

La juxtaposition de plusieurs canaux de transmission est possible quand la largeur du spectre à transmettre est faible par rapport à la porteuse – les spectres ne se mélangent pas (oreille selective)



II – Modulation d'amplitude

II-1 Définition

A partir de l'expression de la porteuse

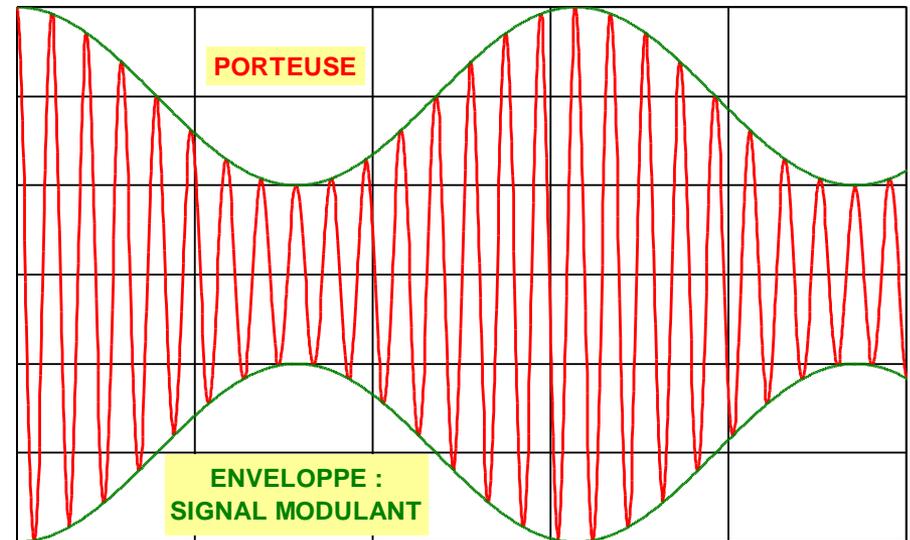
$$e(t) = A \cdot \cos(\Omega \cdot t + \varphi)$$

Plus généralement :

$$e(t) = A \cdot (1 + m \cdot f(t)) \cdot \cos(\Omega \cdot t)$$

m : indice de modulation

f(t) : signal modulant qui véhicule l'information

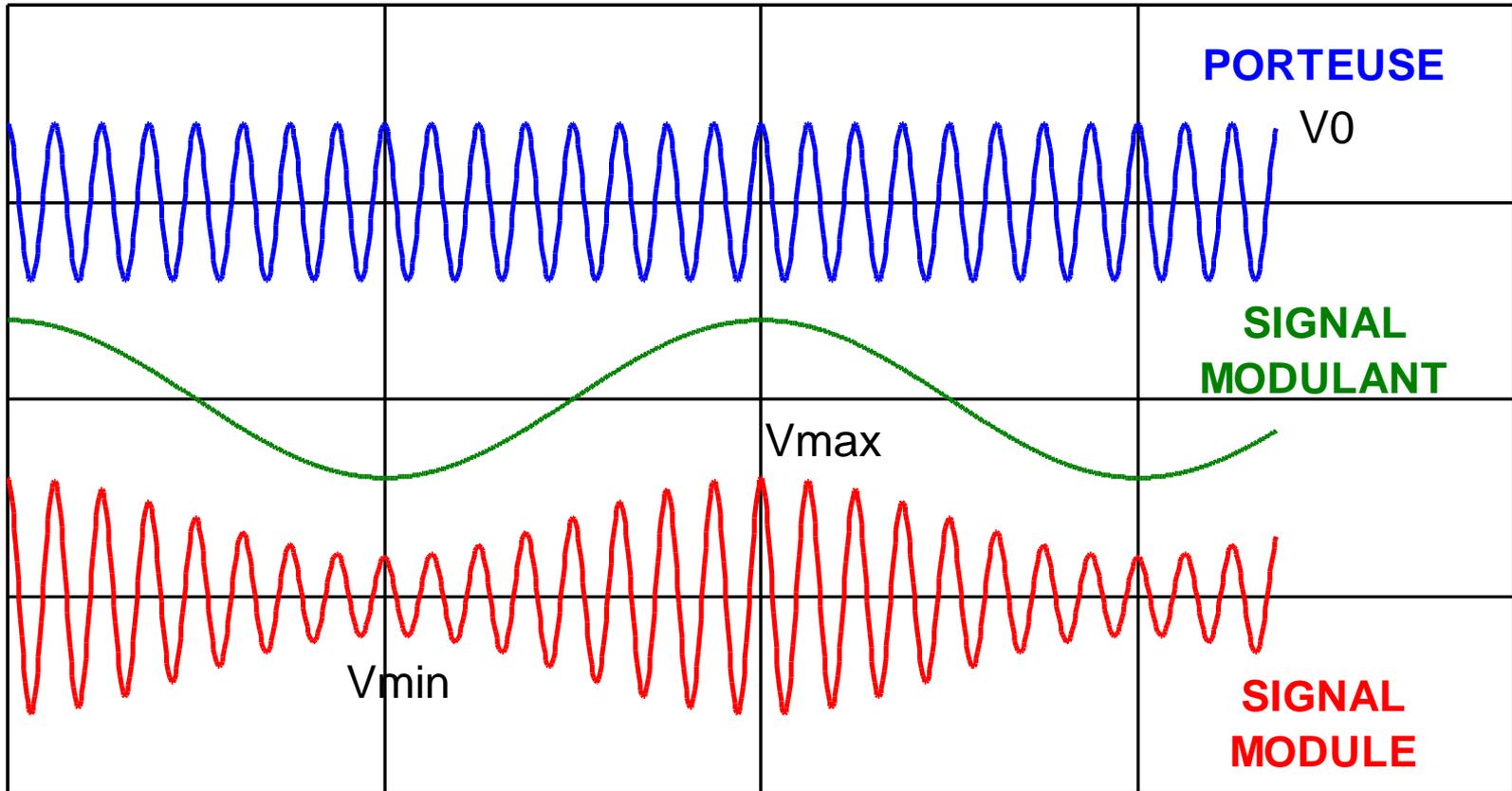


II-2 Indice de modulation

Il traduit l'effet du signal modulant sur la porteuse

a) Représentation temporelle

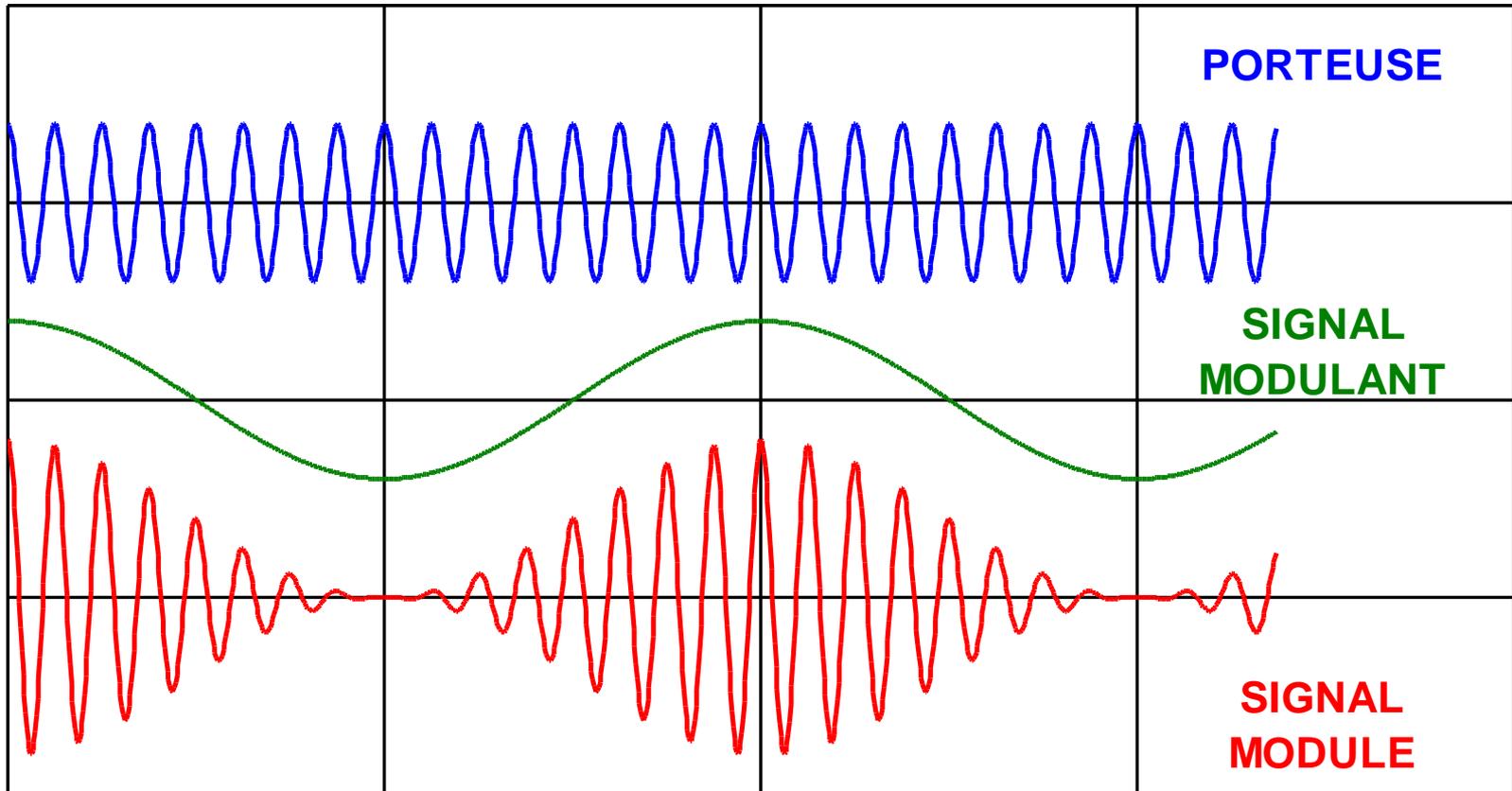
MODULATION D'AMPLITUDE $m = 0,5$



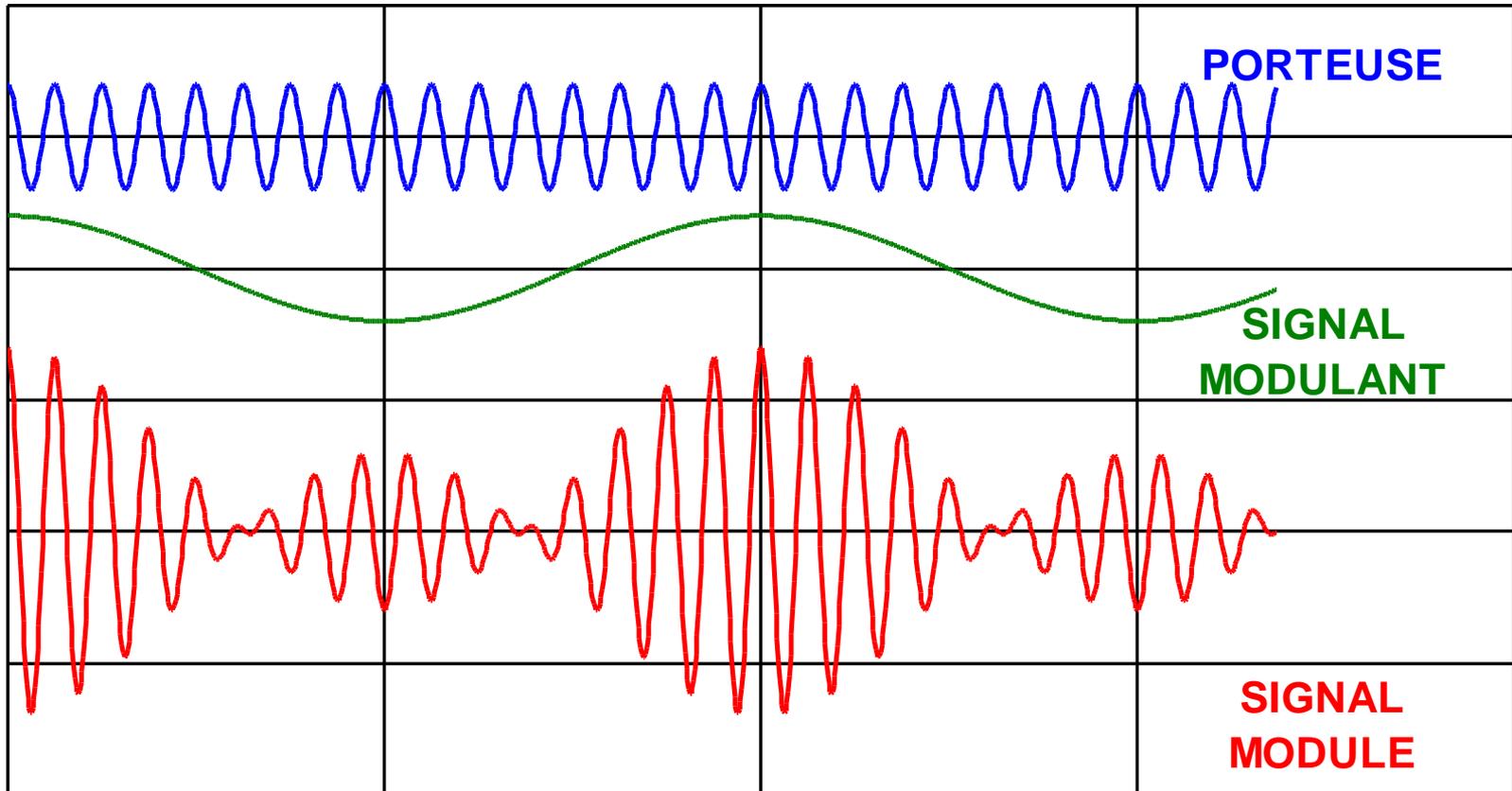
$$m = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}} = \frac{V_{max} - V_0}{V_0}$$

V_0 : amplitude du signal sans
signal modulant
Quand il n'y a pas de signal
modulant
 $V_{max} = V_{min} = V_0$ et donc $m = 0$

MODULATION D'AMPLITUDE $m = 1$



MODULATION D'AMPLITUDE $m = 2,5$

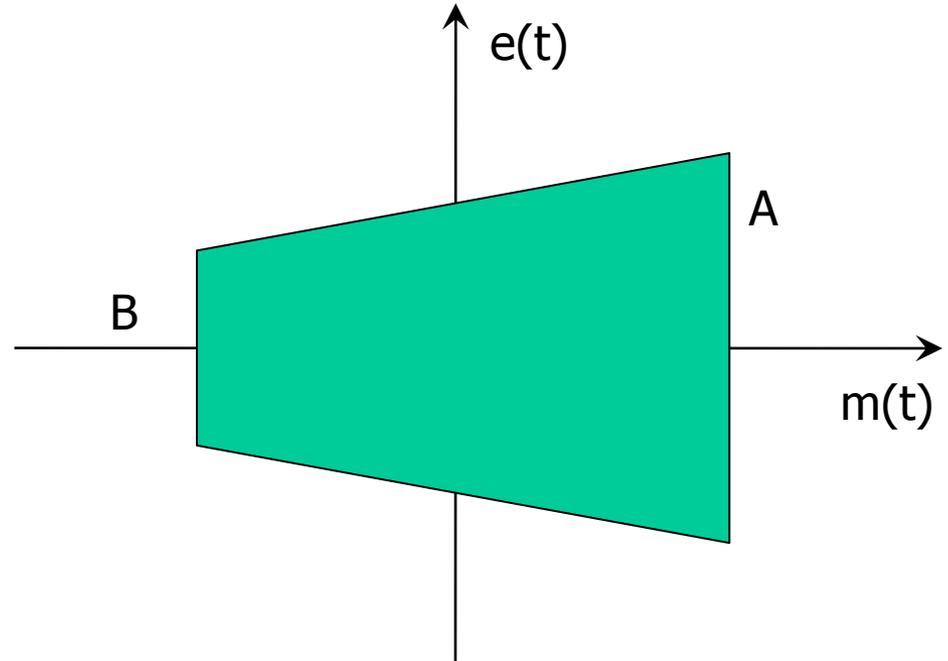
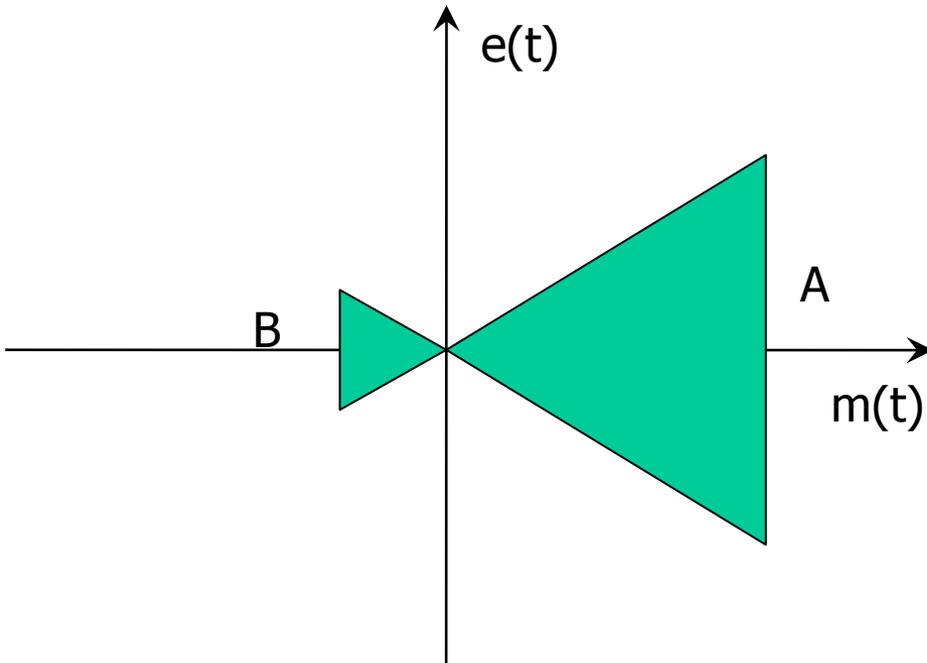


!!! SURMODULATION !!!

Méthodes des trapèzes

En mode XY sur l'oscilloscope, on représente l'onde modulée $e(t)=f(mt)$ en fonction du signal modulant $m(t)$ BF

$$m = \frac{A - B}{A + B}$$



- Pour $m=0.5$, $A=3B$
- Pour $m=1$, $B=0$
- Pour $m=2.5$, $A=2.33B$
- Pour $m>1$, **B est négatif**

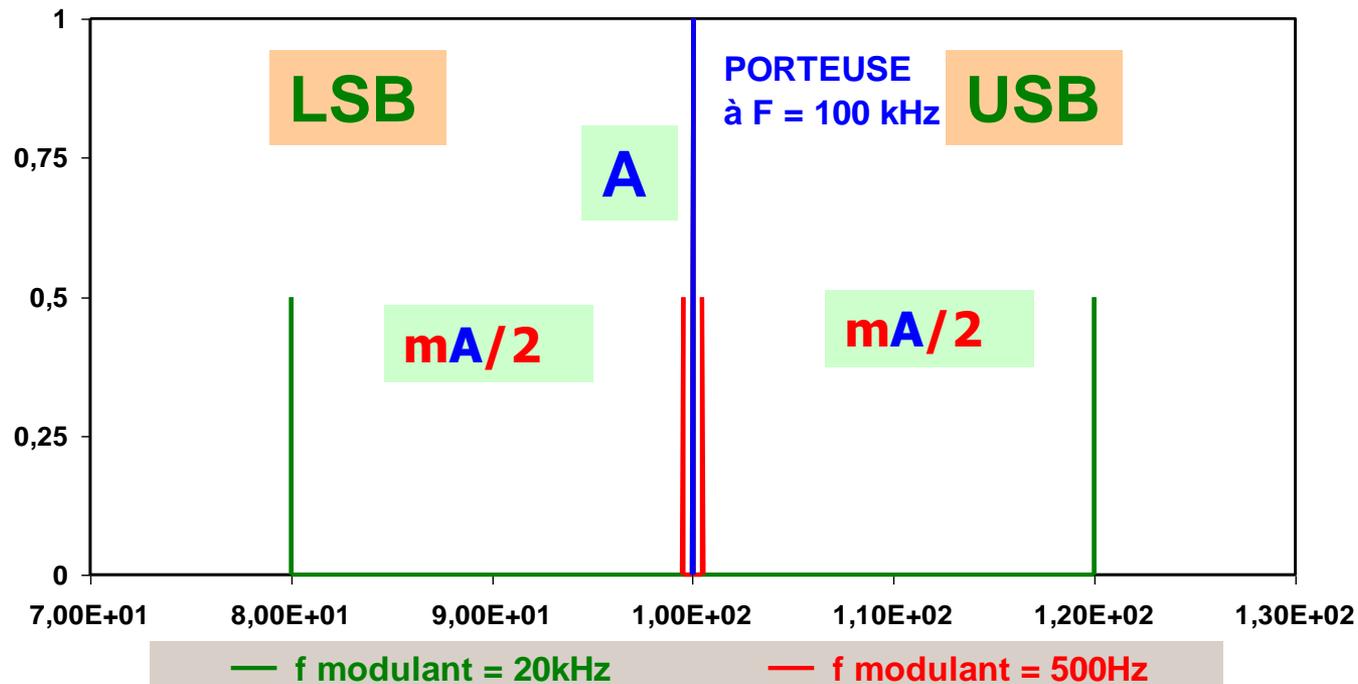
b) Représentation spectrale

Si $f(t) = \cos(\omega t)$ signal modulant on a $e(t) = A \cdot (1 + m \cdot f(t)) \cdot \cos(\Omega \cdot t)$

$$e(t) = A(1 + m \cos \omega t) \cos \Omega t$$

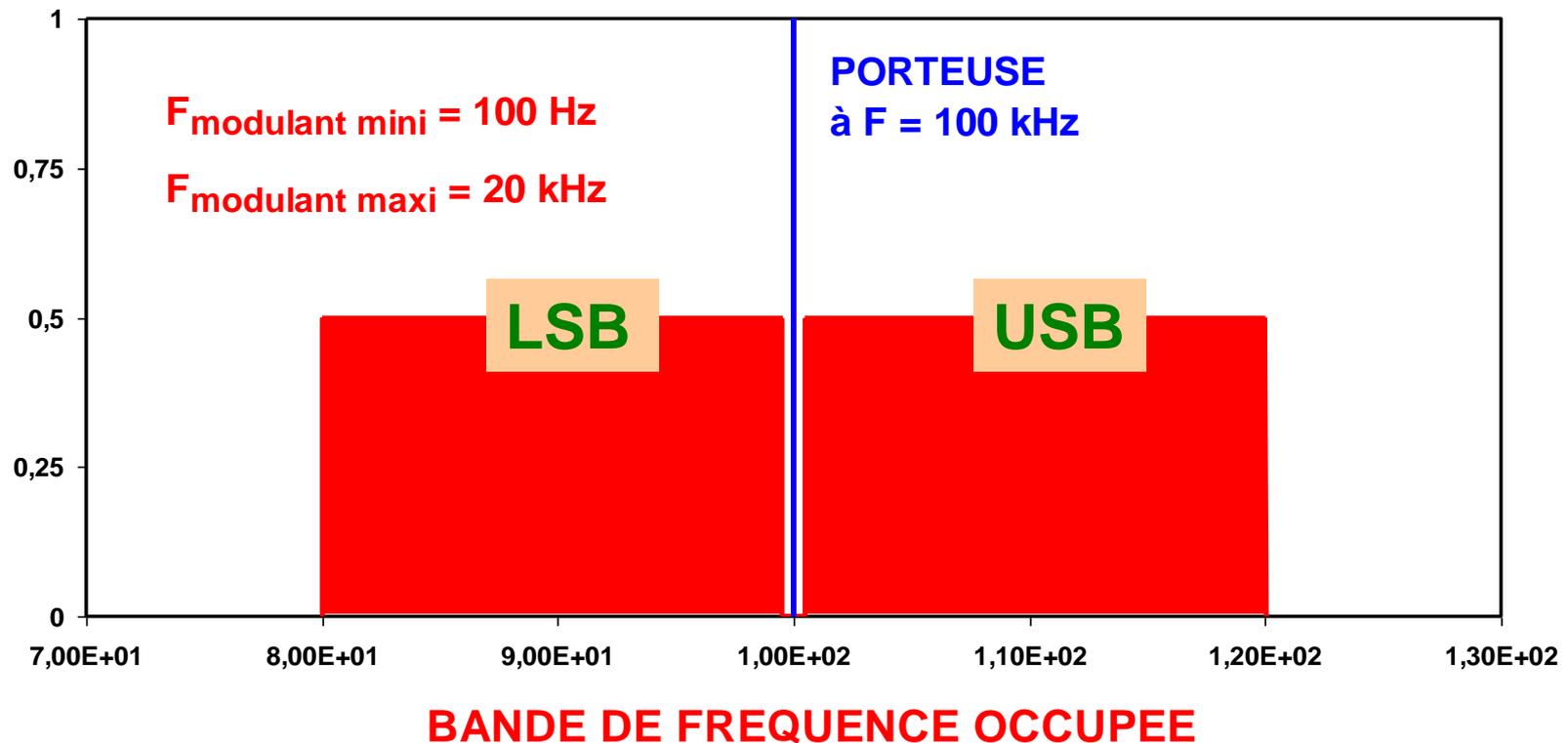
$$e(t) = A \cos \Omega t + \frac{mA}{2} \cos(\Omega - \omega)t + \frac{mA}{2} \cos(\Omega + \omega)t$$

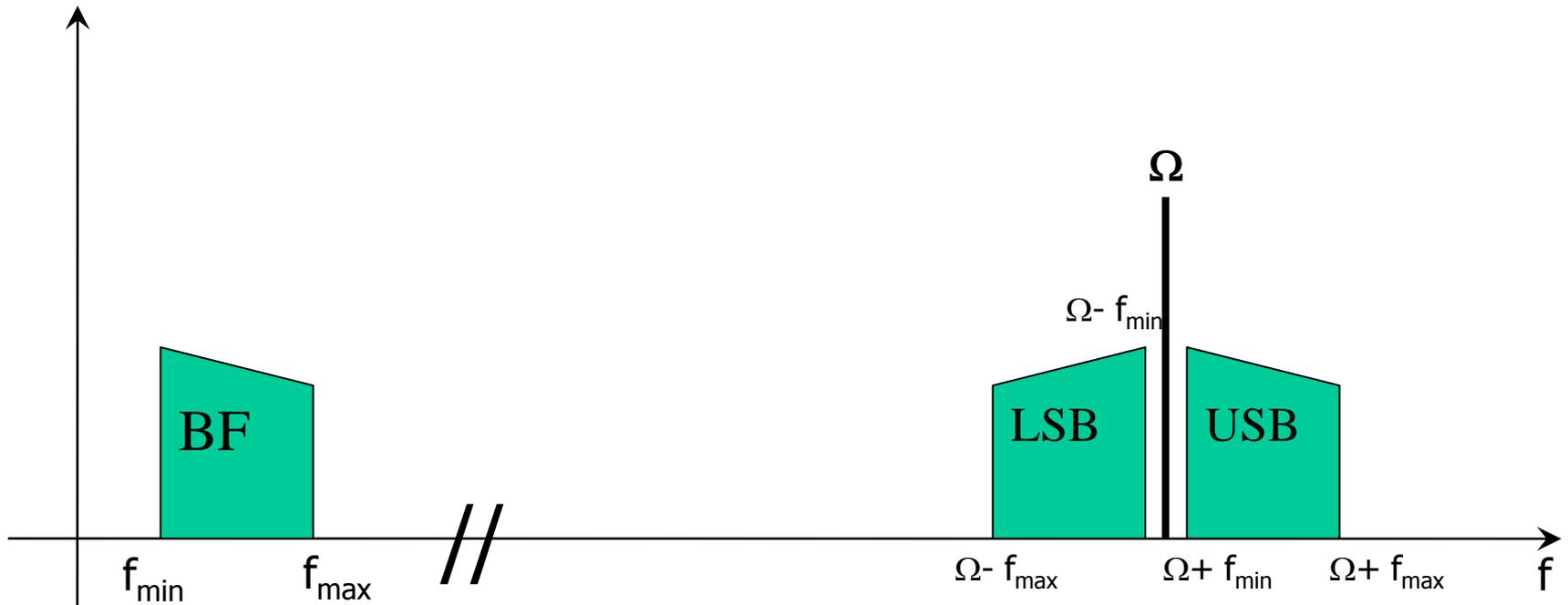
MODULATION D'AMPLITUDE $m = 1$



En réalité, il n'y a pas nécessairement une seule fréquence modulante mais plusieurs comme dans le cas d'une onde modulante audio. La représentation spectrale présente donc **2 bandes de fréquences** situées de part et d'autre de la fréquence de la porteuse

MODULATION D'AMPLITUDE $m = 1$





$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$$

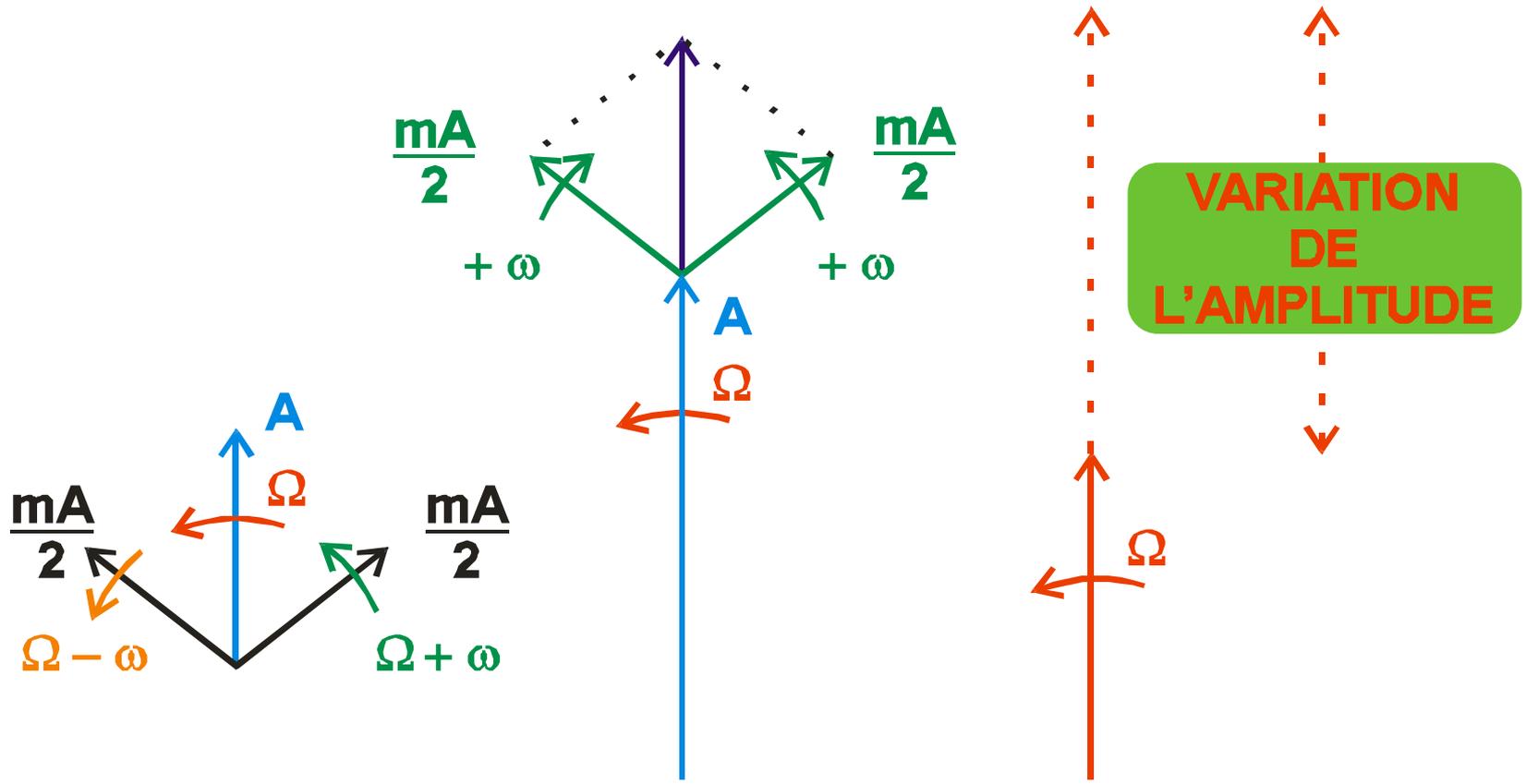
Le signal AM occupe une bande de fréquence $2 * \Delta f =$ largeur du canal de transmission

LSB : Lower Side Band

USB : Upper Side Band

Modulation DSB (Double Side Band)

c) Représentation vectorielle

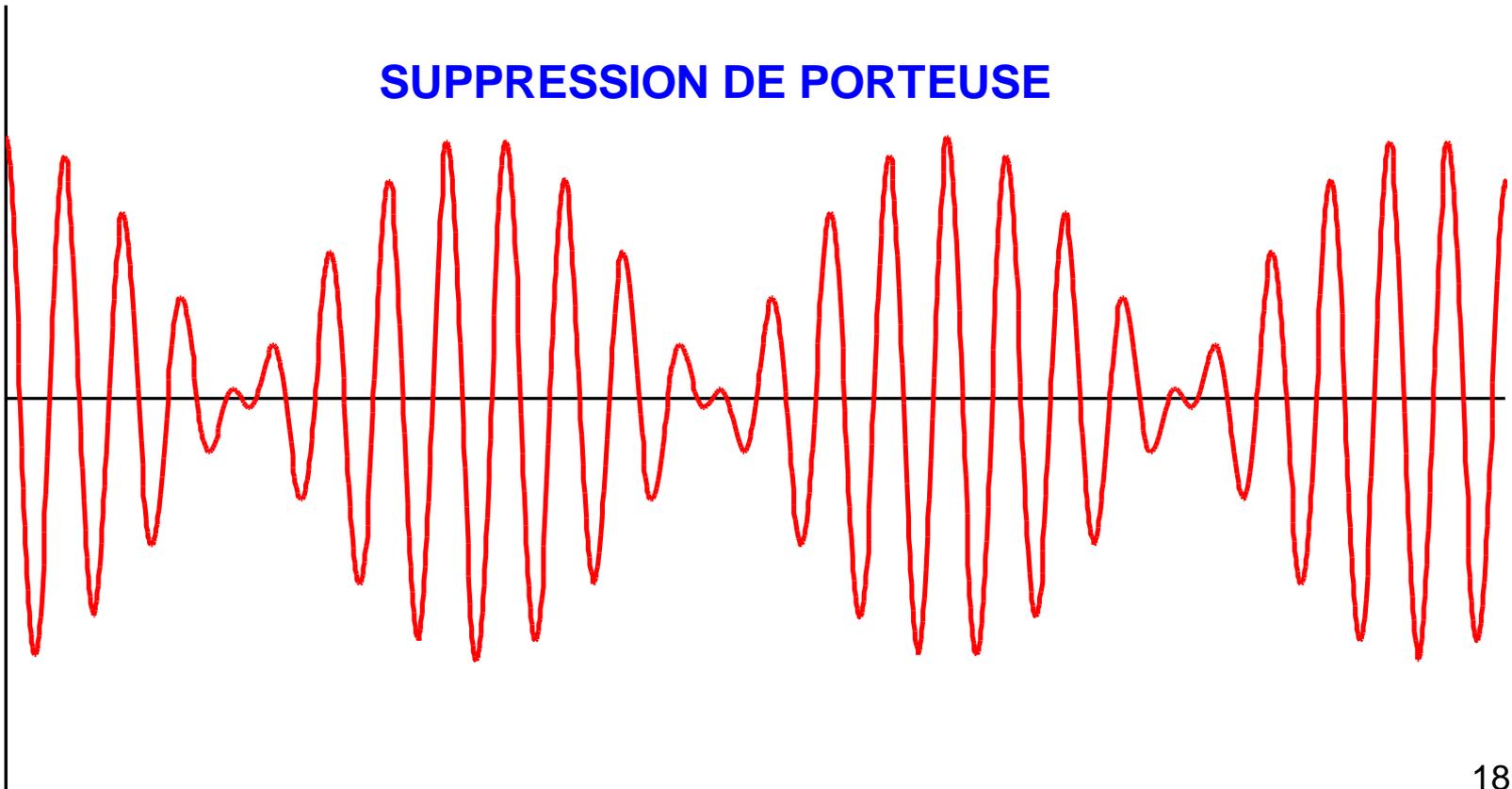


II-3 Modulation d'amplitude – Formes particulières

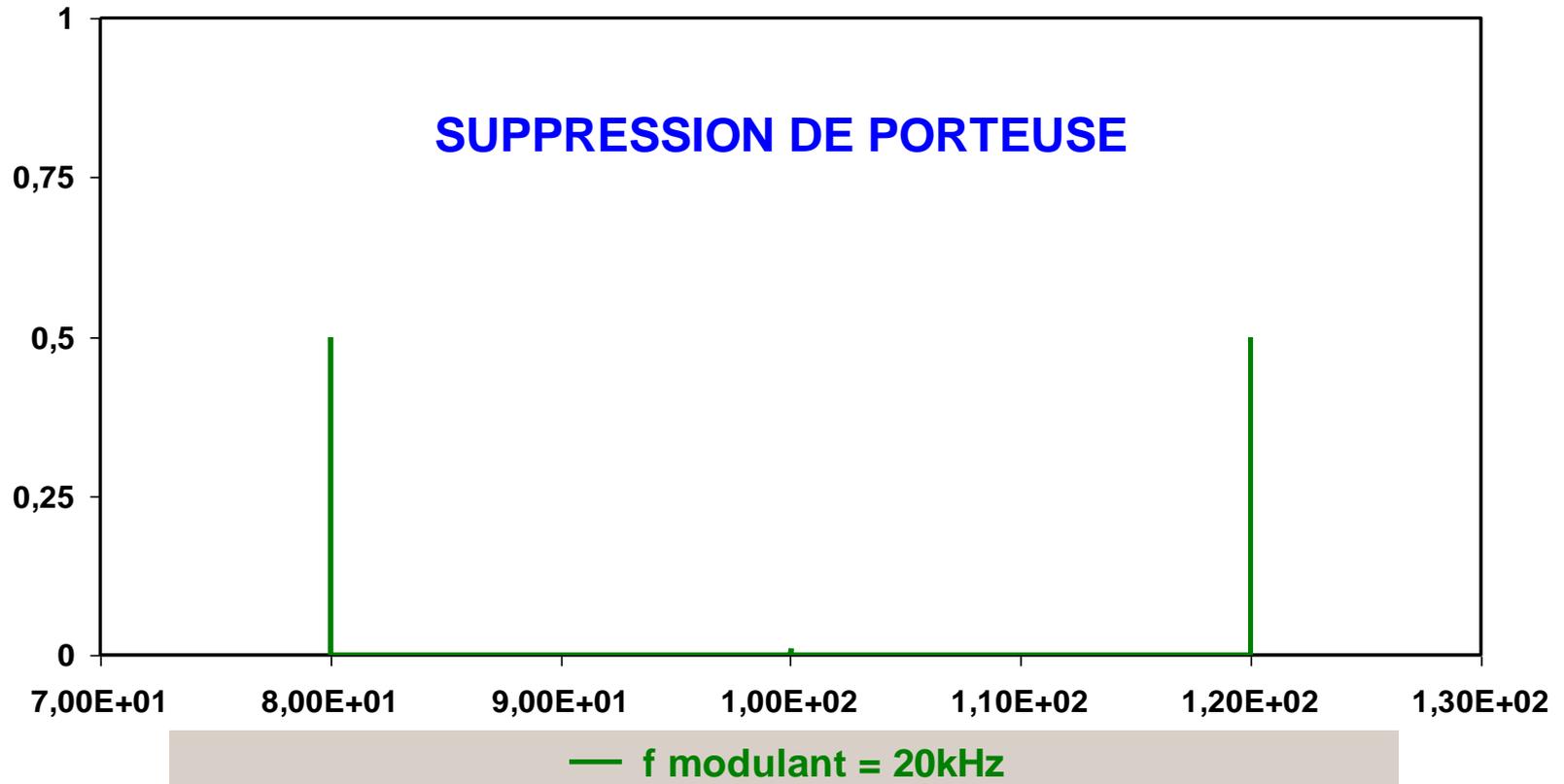
a) Emission DSB-SC (Double Side Band –Suppression Carrier)

MODULATION D'AMPLITUDE $m = 1$

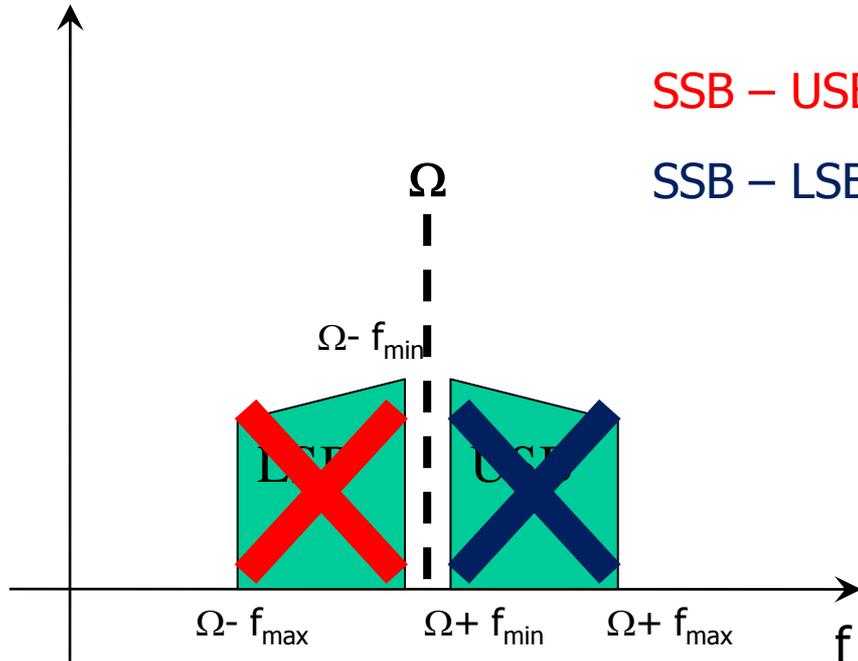
SUPPRESSION DE PORTEUSE



MODULATION D'AMPLITUDE $m = 1$



b) Bande latérale unique (BLU)



SSB – USB : Single Side Band - Upper Side Band

SSB – LSB : Single Side Band - Lower Side Band

Chacune des bandes latérales contient la même information à savoir l'amplitude E et la fréquence ω du message modulant. Nous pouvons donc avec des filtres adéquats supprimer l'une des bandes latérales et émettre en BLU.

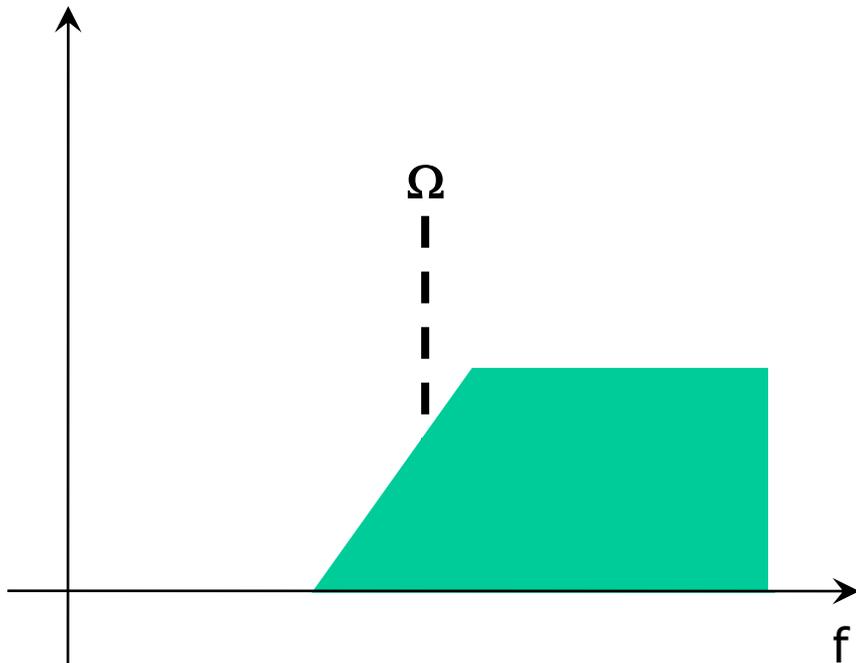
Avantage : possibilité d'émettre deux fois plus de messages car on réduit par deux la largeur de bande.

c) La modulation en bande latérale résiduelle Vestigial Side Band (VSB)

La difficulté d'obtenir des filtres dont les fréquences de coupure sont nettes limite la qualité des émissions SSB. On a recours à une solution intermédiaire : la modulation en bande latérale résiduelle (VSB).

Principe :

Cela consiste à émettre une des deux bandes latérales, la porteuse **ET** une portion de la bande latérale restante.



Avantage :

On a réduit la bande de fréquence / AM tout en utilisant des circuits de démodulation AM qui sont d'une simplicité remarquable (Cf. suivant)

d) Critères de comparaison entre divers moyens de modulation

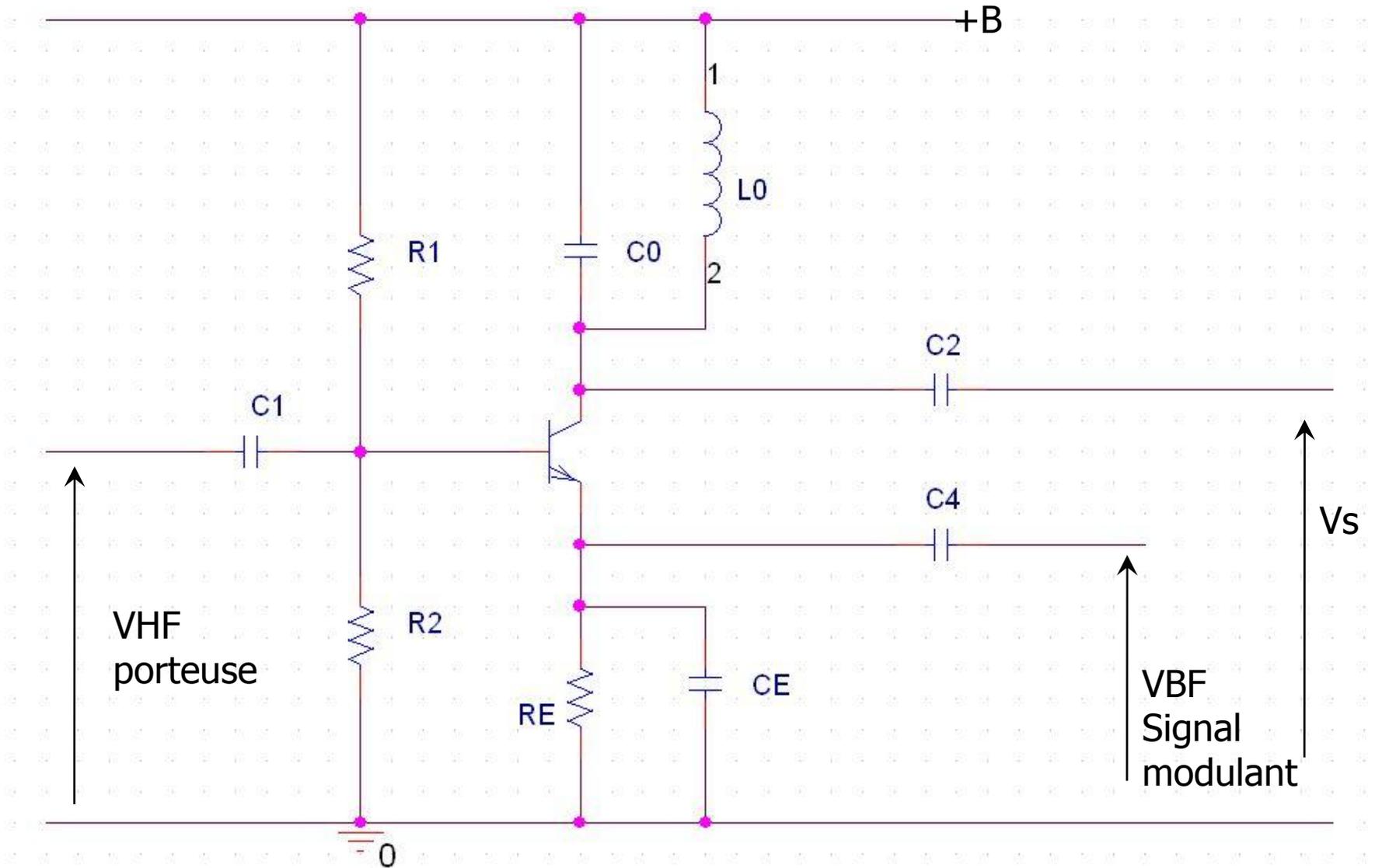
Principaux critères de comparaison :

- Bande de fréquence occupée
- Rendement en énergie
- La complexité des circuits de l'émetteur et du récepteur
- L'immunité relative aux perturbations
- Le rapport signal sur bruit à la sortie et à l'entrée du circuit de démodulation.

	Bande de fréquence W	Complexité des circuits	$\frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{OUT}}{\left(\frac{S}{N}\right)_{IN}}$	Sensibilité aux interférences	Remarque démodulation
AM	$\approx 2f_M = 2\Delta f$	Minime	2 si $(S/N)_{IN} \gg 1$ $\ll 1$ si $(S/N)_{IN} \approx 1$	Grande	Détection d'enveloppe
DSB – SC m=1	$\approx 2f_M = 2\Delta f$	Grande	2	Moyenne	Démodulation synchrone
SSB BLU	$\approx f_M = \Delta f$	Moyenne	1	Petite	Démodulation synchrone
VSB	$f_M < W < 2f_M$	moyenne	Entre 1 et 2	\approx nulle	Détection d'enveloppe

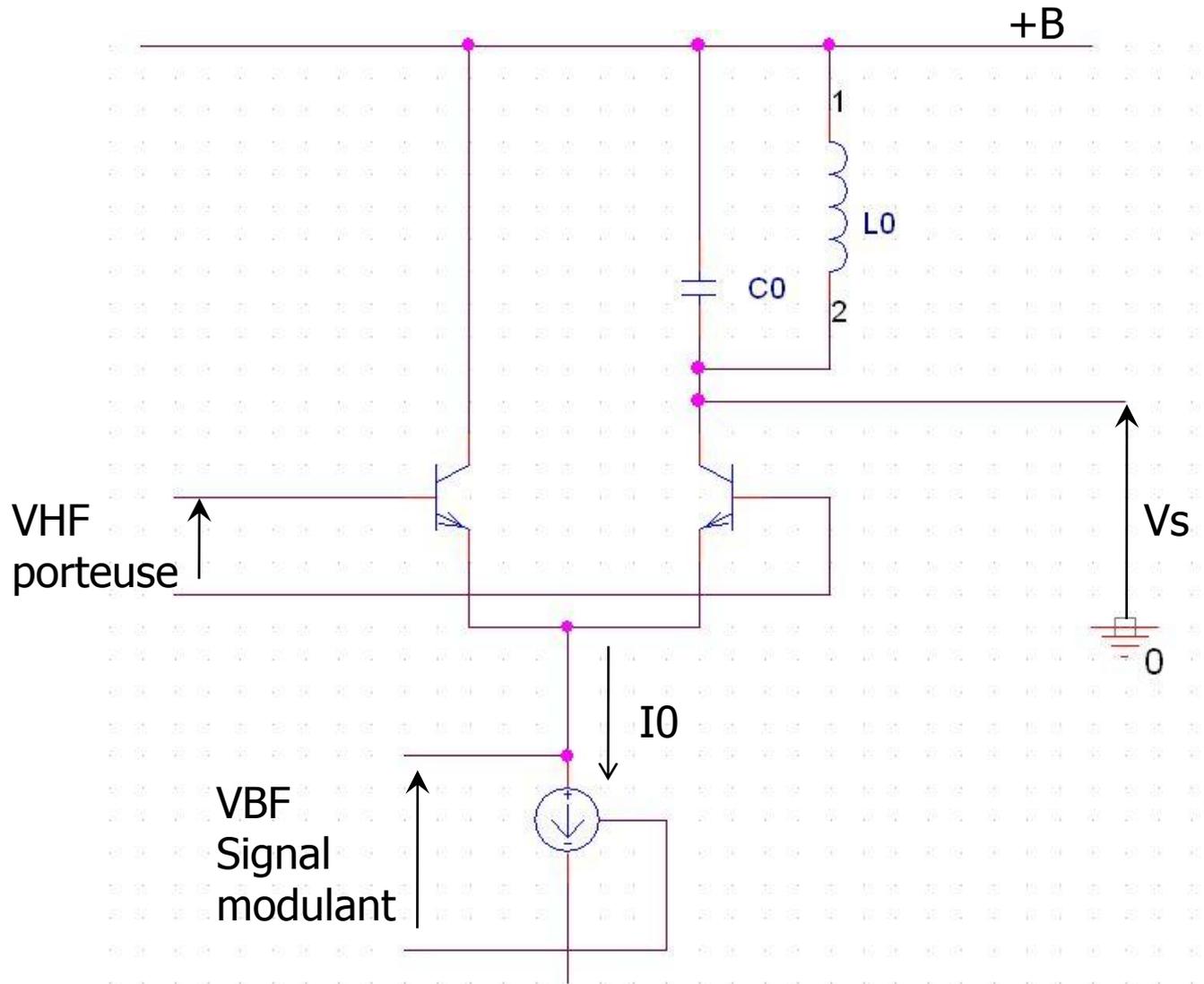
II-4 Exemples de modulateurs d'amplitude

a) Etage à un transistor (*exemple vu en TD*)



II-4 Exemples de modulateurs d'amplitude

b) Etage différentiel (exemple vu en TD)



III – Démodulation d'amplitude

III-1 Généralités

La démodulation consiste à extraire le signal informatif (cad le signal modulant BF) à la réception du signal AM

Il existe deux méthodes de démodulation :

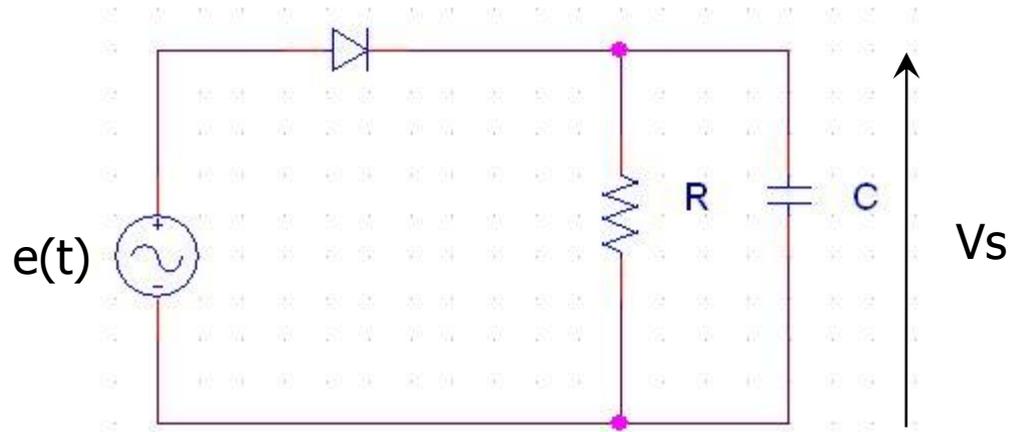
- Par détection d'enveloppe (via des éléments non linéaires : diodes, transistors utilisées en classe B, association AOP+diodes)
- Par détection synchrone (PLL)

En général, la démodulation est obtenue par **détection d'enveloppe** du signal reçu si celui-ci a un niveau suffisant.

Dans le cas où ce niveau est trop faible, le signal se trouve noyé dans le bruit, rendant inutilisable ce mode de détection, on a alors recours à la **détection synchrone ou détection cohérente** qui consiste à multiplier le signal reçu par un signal de référence de même pulsation que celle de la porteuse.

III-2 Démodulation par détection d'enveloppe

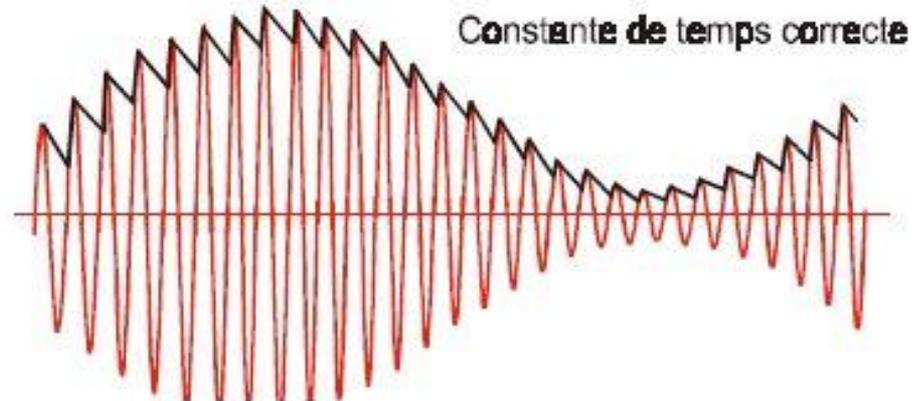
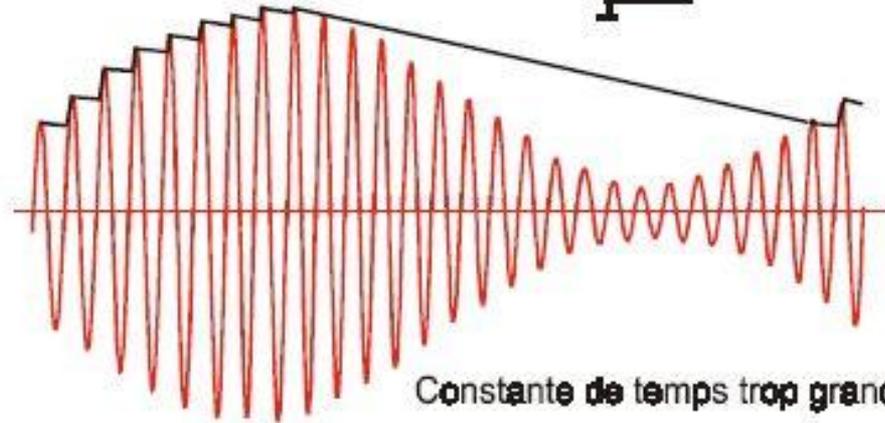
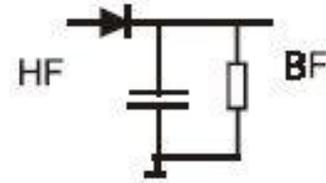
Cela consiste à réaliser une détection d'enveloppe grâce à un redresseur à diode associé à un circuit RC.



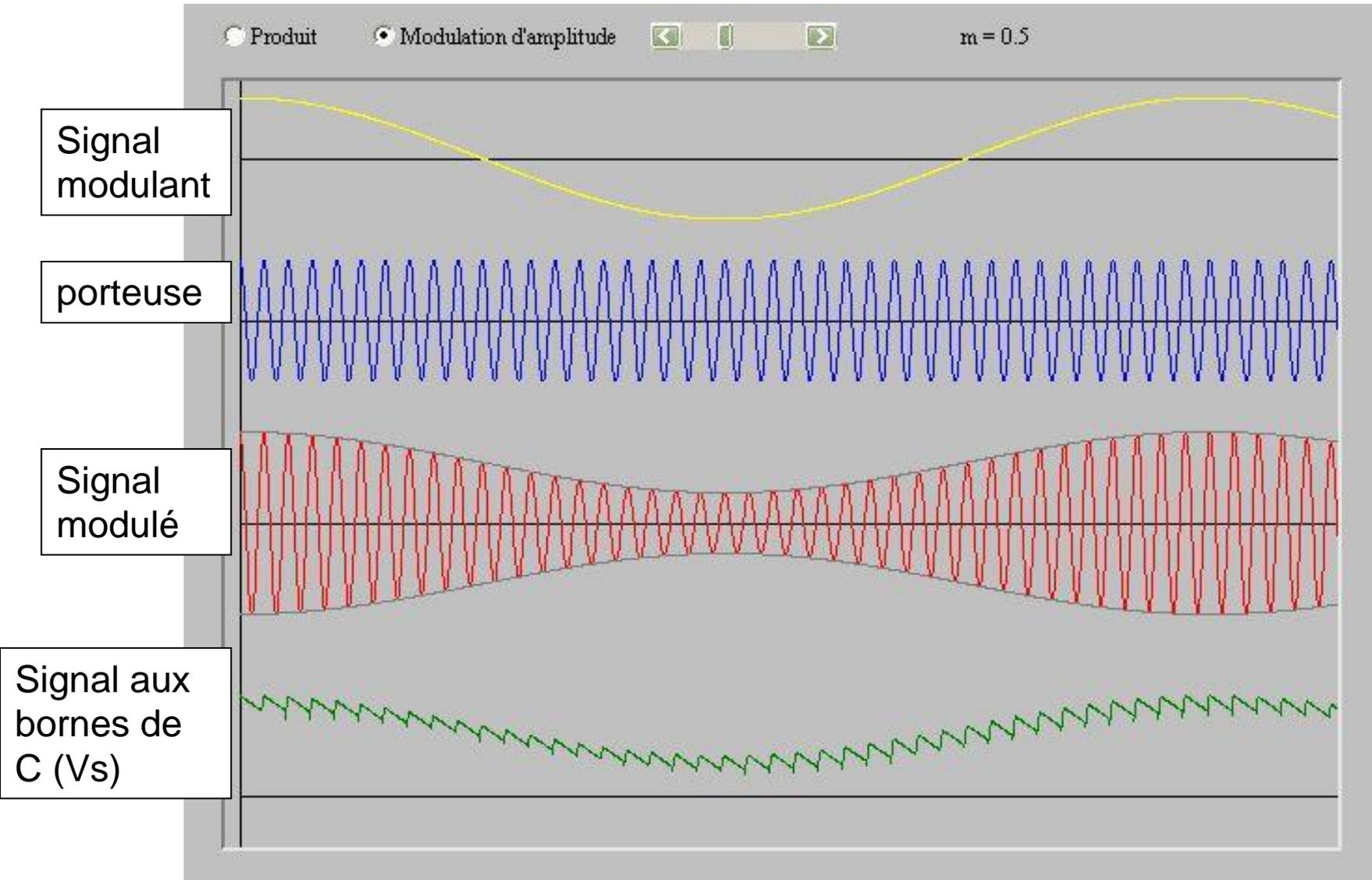
1^{er} cas : le signal HF $e(t)$ n'est pas modulé : *(à compléter)*

2^{ème} cas : le signal HF $e(t)$ est modulé : (à compléter)

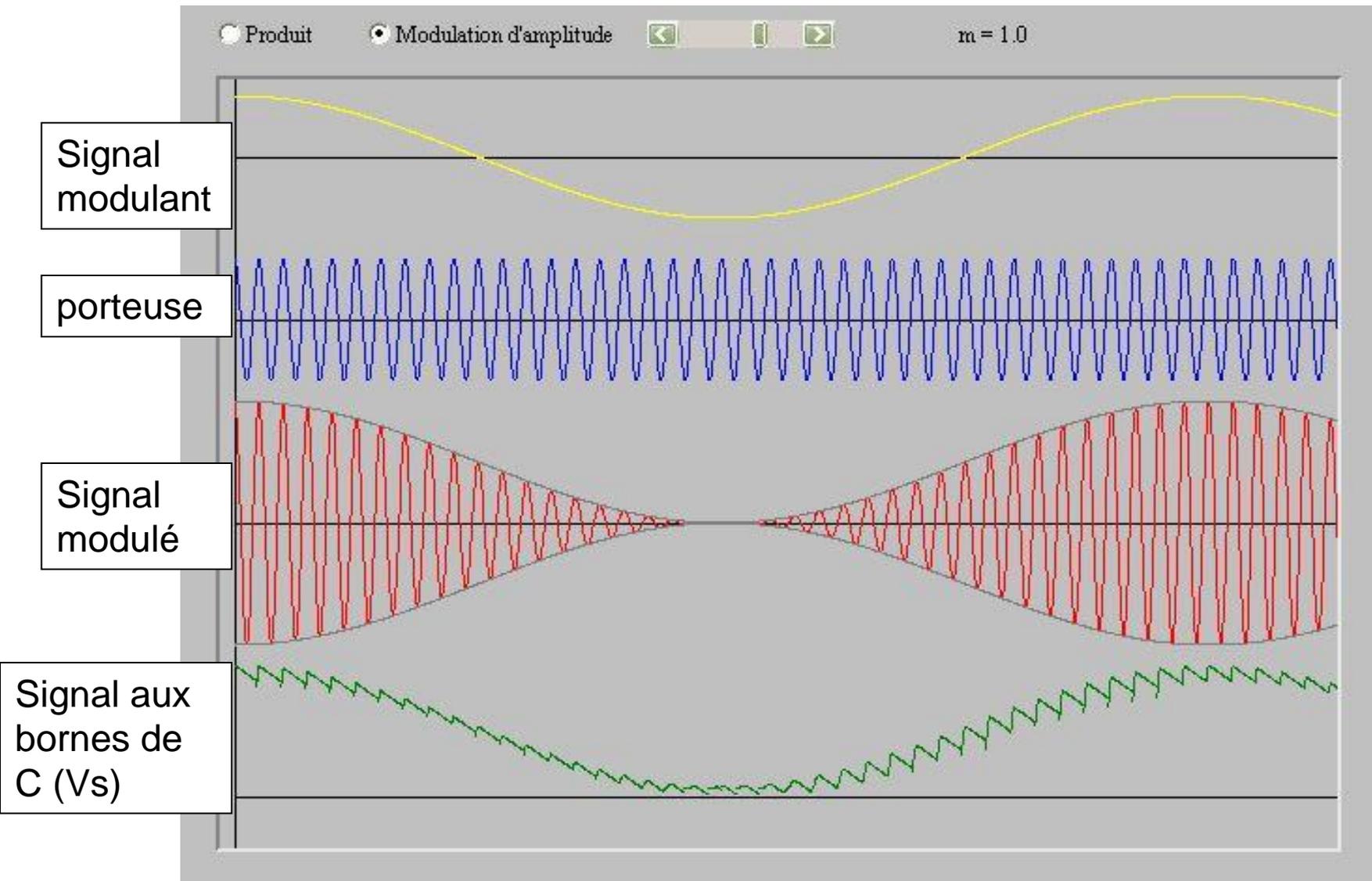
Détection par diode .



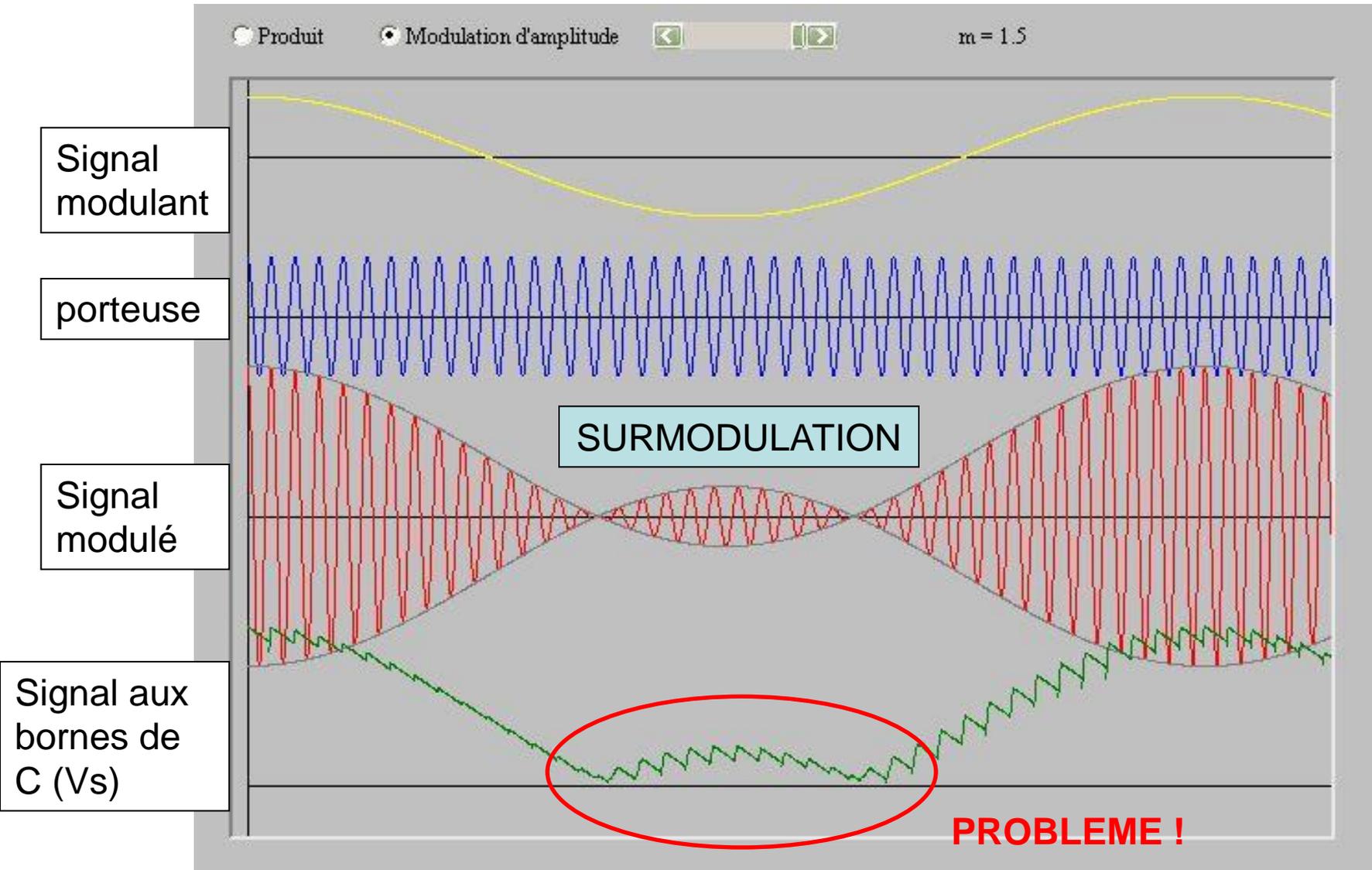
Modulation d'amplitude $m=0.5$



Modulation d'amplitude $m=1$



Modulation d'amplitude $m=1.5$



III-3 Les caractéristiques de la détection série *(à compléter)*

- a) Seuil de détection
- b) Tension V_D de la diode
- c) Signal de sortie
- d) Générateur d'entrée : attaque de la détection
- e) Impédance d'entrée du détecteur

III-4 La démodulation synchrone

- a) Principe
- b) Les caractéristiques de la détection synchrone

IV – Modulations angulaires

IV-1 Généralités

$$e(t) = A * \cos(\Omega * t + \varphi)$$

Modulation de fréquence

$$\Omega = \Omega_0 + \Delta \Omega_M$$

$\Delta \Omega_M$: variation
possible de fréquence
de la porteuse

(en radians / seconde)

Modulation de phase

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta \varphi_M$$

$\Delta \varphi_M$: variation
possible de phase de
la porteuse

(en radians)

MODULATIONS ANGULAIRES

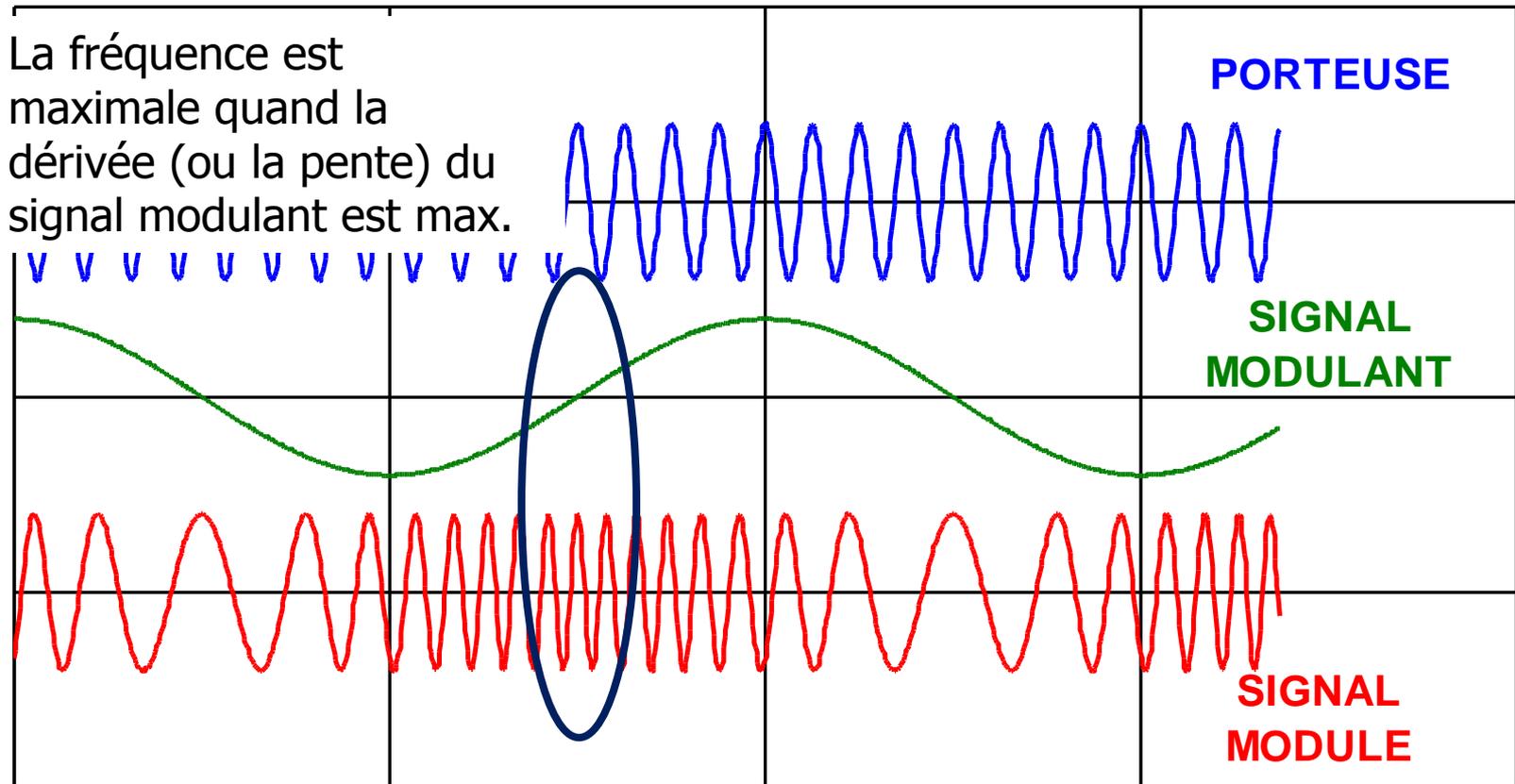
si ω est la pulsation du signal modulant :

$$\Delta\varphi_M = m = \frac{\Delta\Omega_M}{\omega}$$

Avec m : indice de modulation

a) Modulation de phase

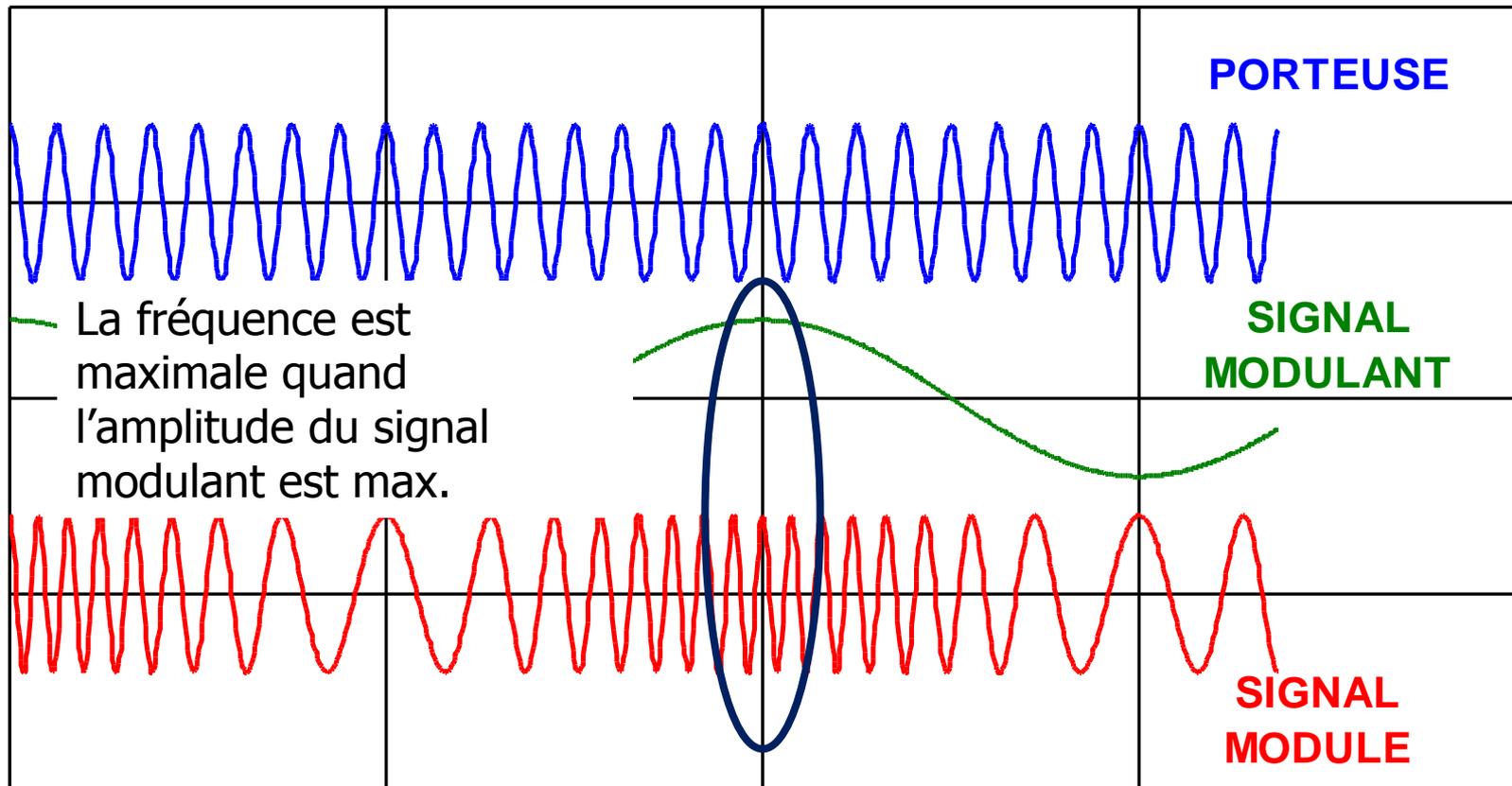
MODULATION DE PHASE



$$e(t) = A \cos(\Omega_0 t + \varphi_0 + m \cos(\omega t))$$

b) Modulation de fréquence

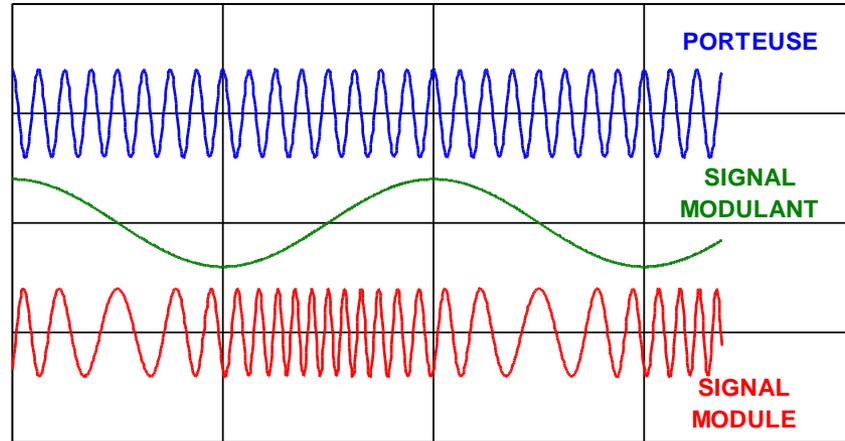
MODULATION DE FREQUENCE



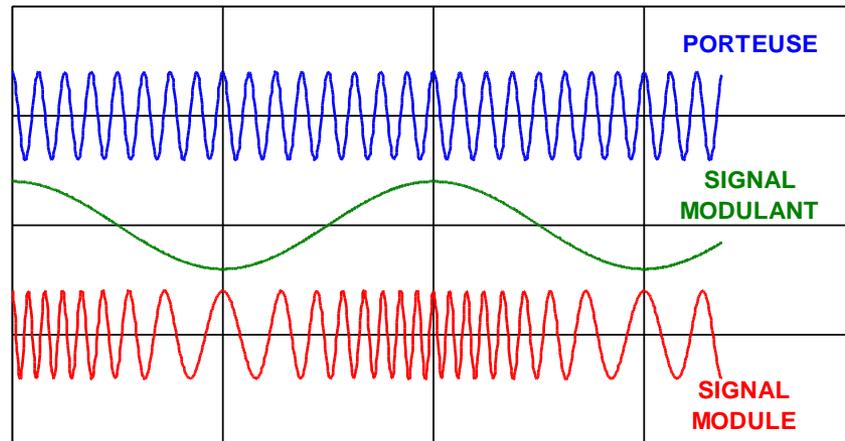
$$e(t) = A \cos(\Omega_0 t + \varphi_0 + m \sin(\omega t))$$

**Déphasage
de $\Pi / 2$
entre les
deux signaux
modulés**

MODULATION DE PHASE



MODULATION DE FREQUENCE



c) Passage FM \leftrightarrow PM

$$a \cos(\omega t)$$

$$\text{Dérivateur} \\ a\omega \sin(\omega t)$$

Modulateur FM

$$e(t) = A \cos(\Omega_0 t + k a \cos(\omega t))$$

Equivalent PM

$$\text{Intégrateur} \\ a/\omega \sin(\omega t)$$

Modulateur PM

$$e(t) = A \cos(\Omega_0 t + k a / \omega \sin(\omega t))$$

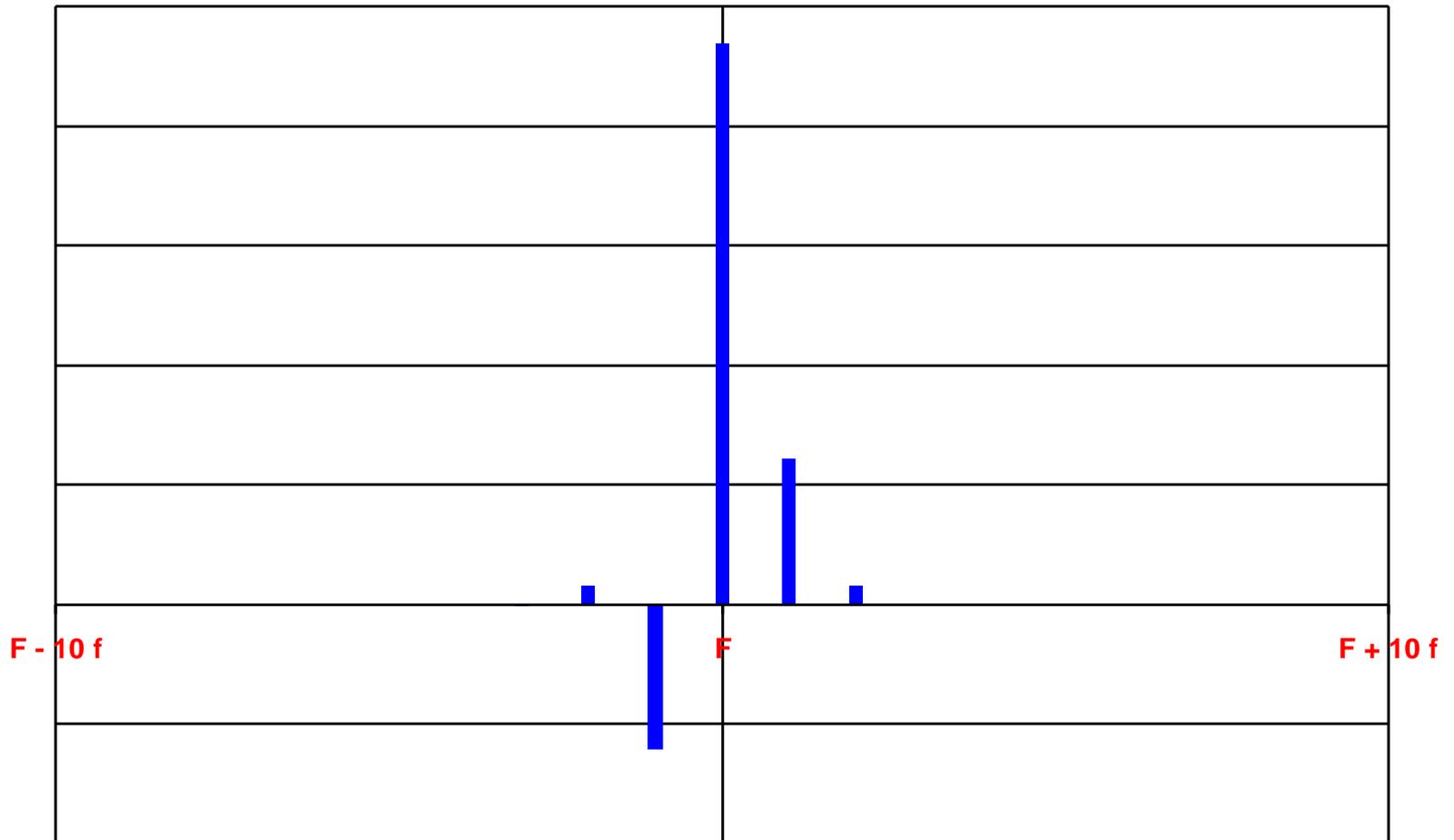
Equivalent FM

IV-2 Caractéristiques spectrales de l'onde FM

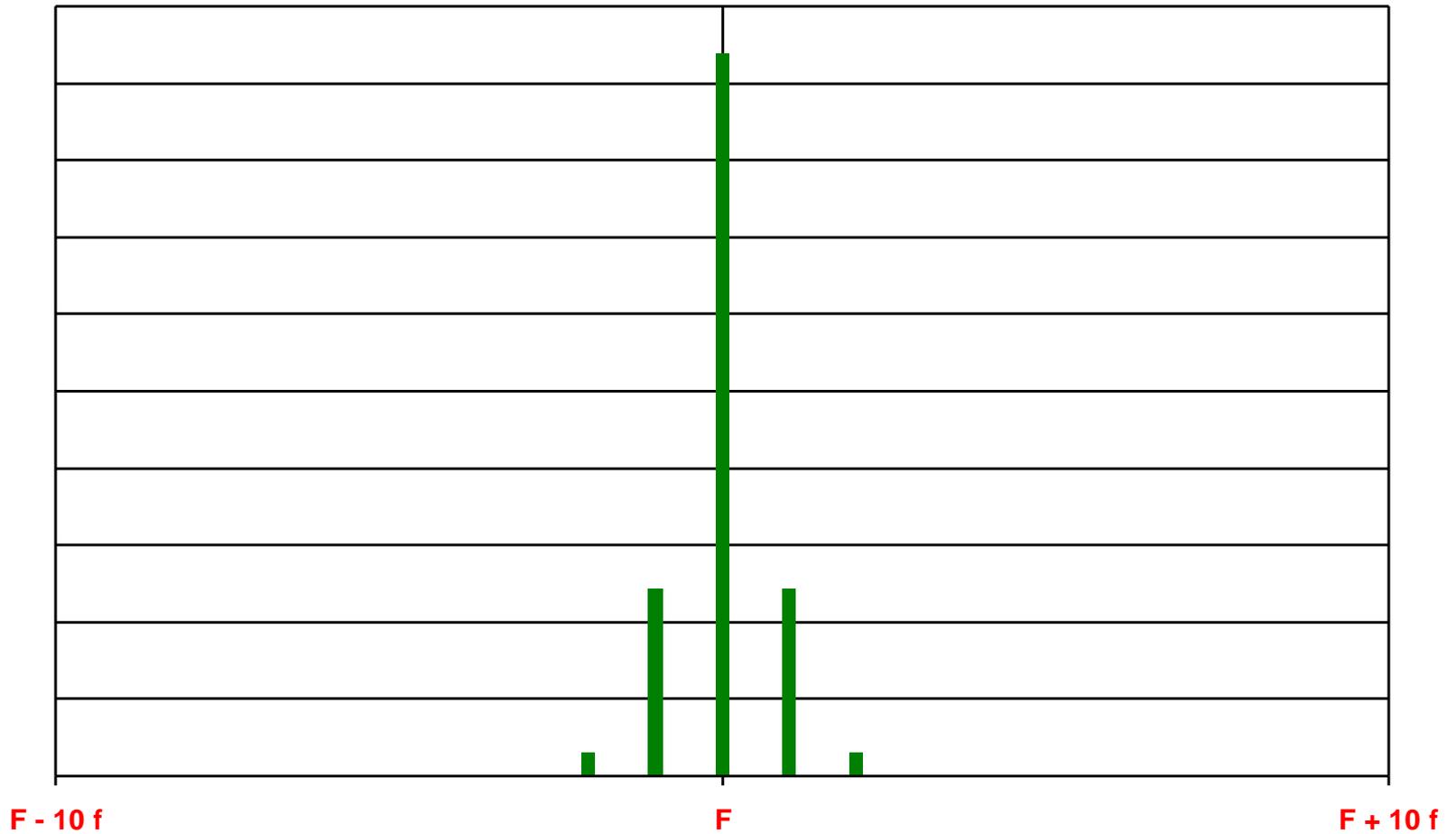
MODULATIONS DE FREQUENCE

m petit

MODULATION DE FREQUENCE $m = 0,5$



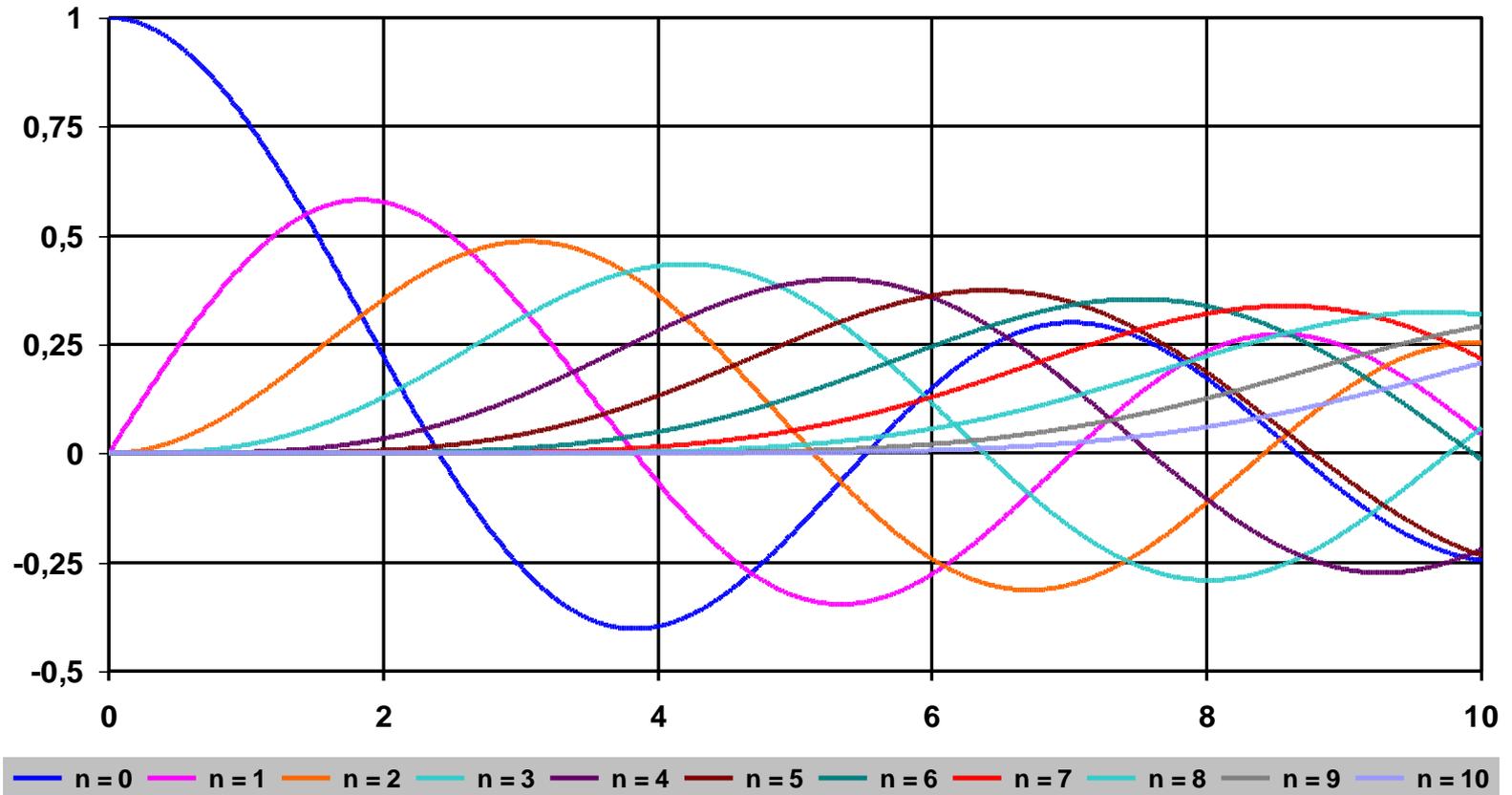
MODULATION DE FREQUENCE $m = 0,5$



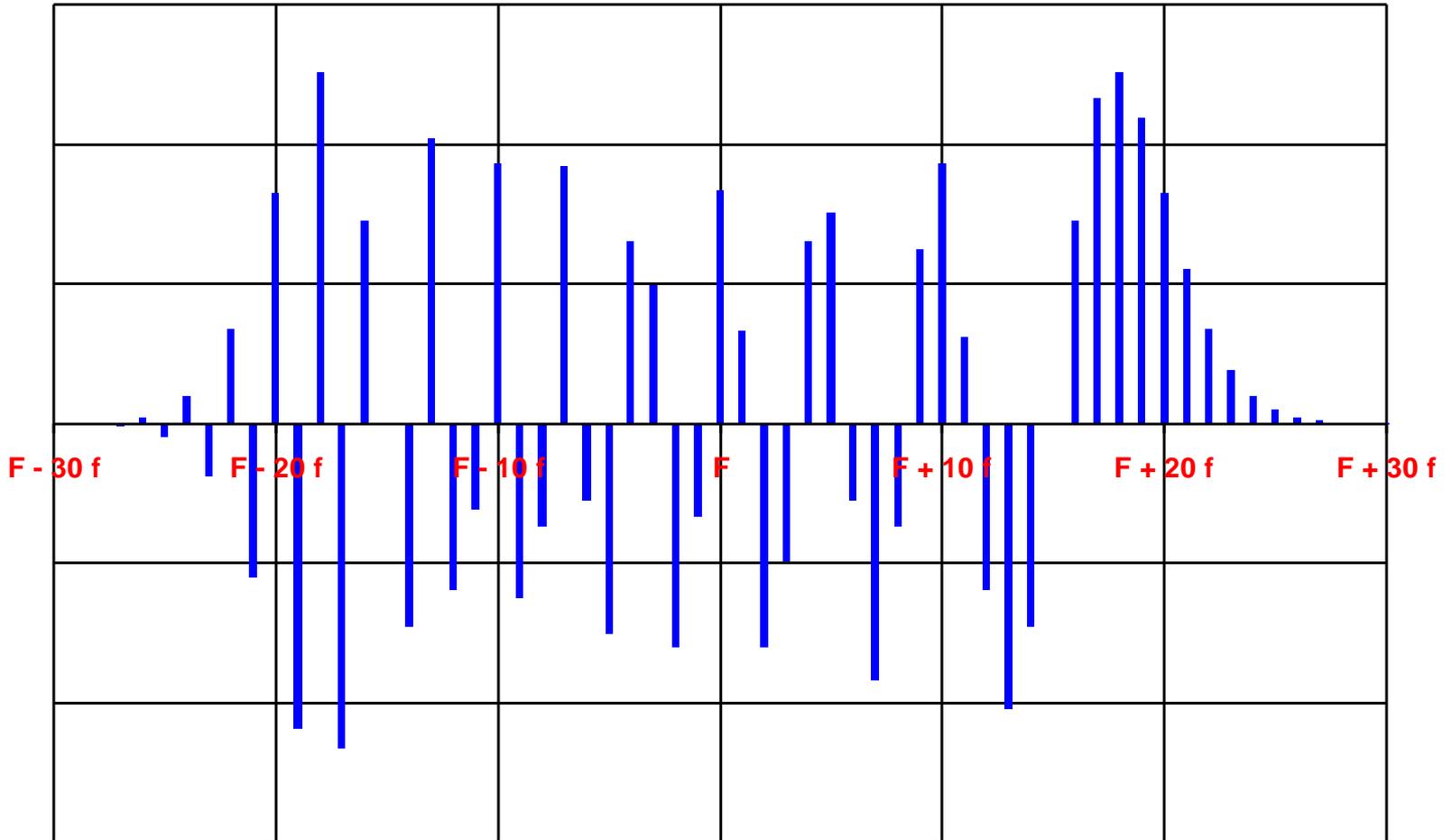
MODULATIONS DE FREQUENCE

m quelconque

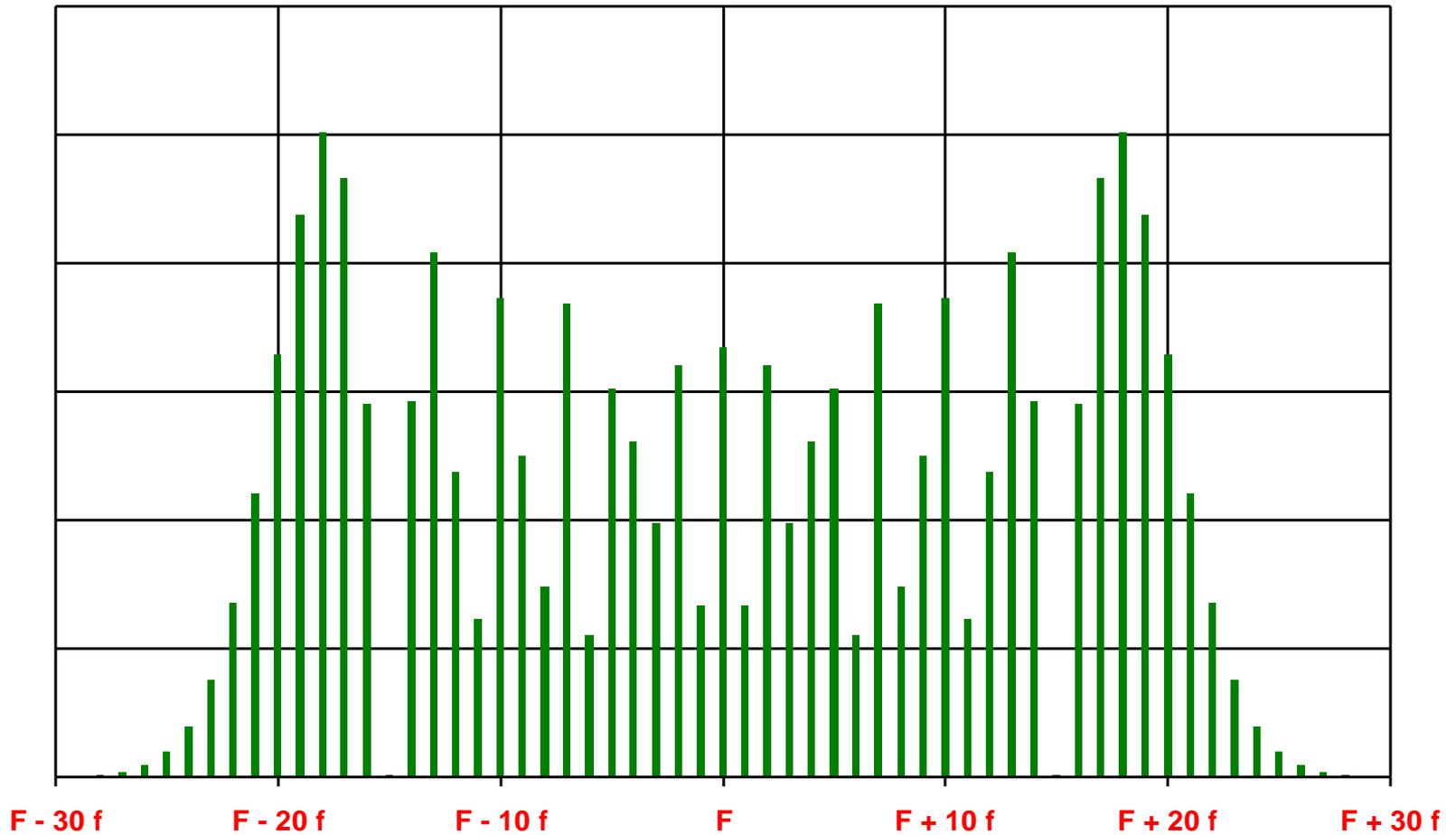
FONCTIONS DE BESSEL $J_n(x)$



MODULATION DE FREQUENCE $m = 20$



MODULATION DE FREQUENCE $m = 20$



IV-3 Dispositifs FM et PM *(à compléter)*

- a) Modulation directe d'un oscillateur
- b) Modulation FM à partir de la PM – modulateur Armstrong

IV-4 Dispositifs de démodulation *(à compléter)*

- a) Discriminateurs
- b) Démodulation par PLL

V – Comparaison des modes AM et FM

(à compléter)