INGÉNIERIE MAINTENANCE SYSTÈMES AÉRONAUTIQUE ET TRANSPORTS

université de BORDEAUX

Licence PRO Maintenance Aéronautique IMA

Quelques notions Radio fréquences

Quelques notions

- Notions sur les décibels.
- Notions sur les phénomènes en hyperfréquences.
- Notions sur la polarisation d’une onde.
- Notions sur les antennes.
- Notions sur les modulations.

Notions sur les dB

- Définitions
- Pourquoi ?
- Addition de puissance

Définition du décibel : dB

Le Bel est défini pour deux puissances P_1 et P_2 par :

$$\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \frac{\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{\ln 10}$$

Le décibel vaut 10 fois la grandeur du Bel.

Sa valeur est donnée par :

$$10.\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Définition du décibel : dB

Le retour en valeur linéaire est donné par :

$$\alpha_{dB} = 10.\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \qquad \text{soit} \qquad \frac{P_1}{P_2} = 10^{\frac{\alpha_{dB}}{10}}$$

Le décibel représente donc un écart relatif entre deux valeurs.

Il n'est pas une mesure de puissance !

Définition du dBm

On choisit une puissance de référence appropriée :

Le milliwatt [mW] sur 50 Ω.

La puissance ainsi exprimée est absolue :

$$P_{dBm} = 10.\log\left(\frac{P_1[mW]}{1mW}\right)$$

C’est le nombre de dB par rapport au 0 dBm.

Ex : 10 dBm = 10 dB au dessus du 0 dBm.

Ex : générateur de signaux -140 dBm à +20 dBm émet des puissances de 0,01 fW à 0,1W.

Lien entre tension et puissance

La puissance moyenne P est lié à la tension efficace U par:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Pour 2 puissances possédant la même résistance de référence :

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R} \qquad P_2 = \frac{U_2^2}{R}$$

$$\alpha_{dB} = 10.\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 10.\log\left(\frac{U_1^2}{U_2^2}\right) = 20.\log\left(\frac{U_1}{U_2}\right)$$

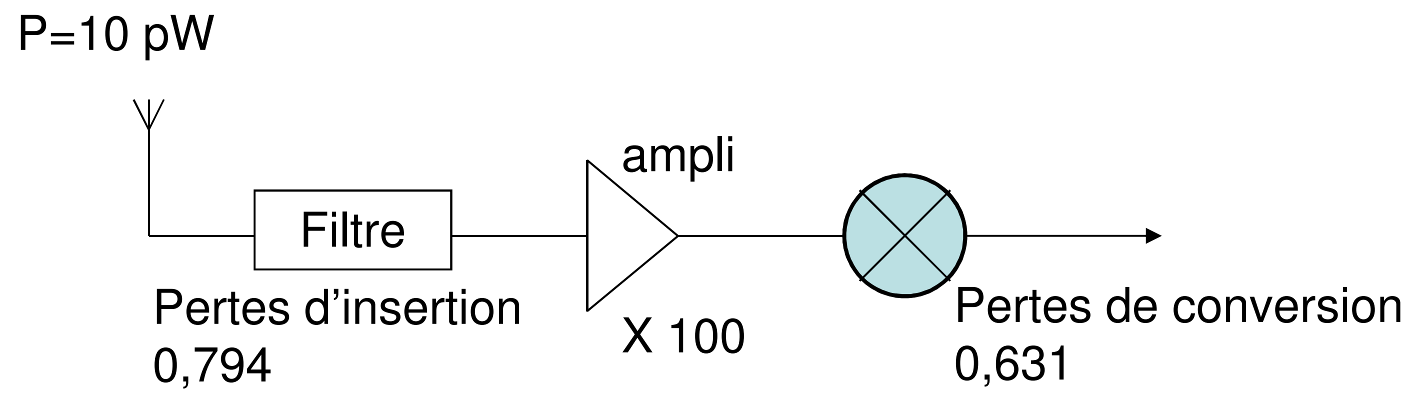
Lorsqu'on exprime les valeurs en <u>linéaire</u>, il faut prendre garde si la grandeur de référence est une <u>puissance</u> (10log(…)) ou une <u>amplitude</u> (20log(…)).

Pourquoi utiliser les dB

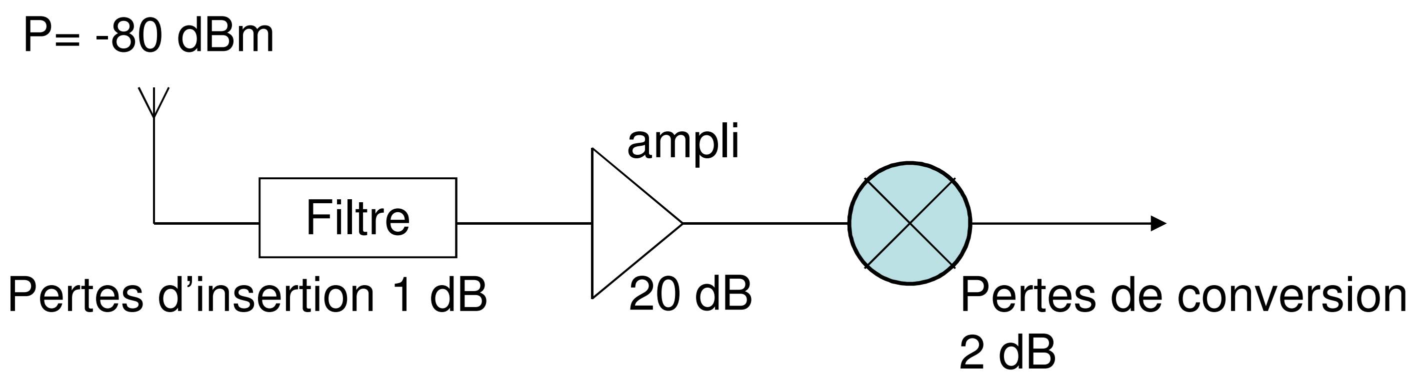
Dans les systèmes électroniques l'amplitude du signal est souvent multiplié ou divisé.

En utilisant les dB, on passe à une addition ou soustraction de valeurs, ce qui rend les calculs plus aisés.

Pourquoi utiliser les dB



Puissance de sortie = 10 x 0,794 x 100 x 0,631 = 501 pW



Puissance de sortie = -80 -1 +20 -2 = -63 dBm

Addition de puissance

0 dBm + 0 dBm = 3 dBm

0 dBm + 0 dB = 0 dBm

10 dBm + 10 dBm = 13 dBm

0 dBm => 1 mW donc 1 mW + 1 mW = 2 mW => 3 dBm

Ceci est vrai seulement si les signaux sont en phase

<u>Propriété des dB</u> : multiplier un signal par deux revient à ajouter 3 dB. Inversement, diviser par deux revient à soustraire 3 dB.

Multiplier par 10 revient à ajouter 10 dB (diviser par 10, on soustrait 10 dB)

Addition de puissance

47 dBm + 53 dBm = 54 dBm

Pour la plupart des cas, il faut repasser les puissances en linéaire. Mais il faut bien garder à l'esprit cette table :

0 dBm = 1 mW	10 dBm = 10 mW
30 dBm = 1 W	50 dBm = 100 W
47 dBm = 50 W	53 dBm = 200 W

Donc 47 dBm + 53 dBm représente 250 W

Or 1 kW = 60 dBm => 500 W = 57 dBm => 250 W = 54 dBm

Notions sur les phénomènes en hyperfréquences

- Phénomènes ondulatoires.
- Impédance caractéristique d’une ligne
- Coefficient de réflexion
- ROS

Phénomènes ondulatoires

On caractérise une onde par :

* Sa fréquence f
* Sa longueur d'onde λ

Reliées toutes les deux par : $\lambda = v / f$

Avec v vitesse de l'onde dans le milieu considéré.

Dès que λ < dimension du système :

$\Rightarrow$ Phénomènes de réflexion, de réfraction et d'interférence.

$f = 50\ \text{Hz} \Rightarrow \lambda = 6000\ \text{km}$

$f = 50\ \text{MHz} \Rightarrow \lambda = 6\ \text{m}$

$f = 5\ \text{GHz} \Rightarrow \lambda = 6\ \text{cm}$

Phénomènes ondulatoires

Une onde électromagnétique est composée :

- d'un champ électrique $\vec{E}$
- d'un champ magnétique $\vec{H}$ (perpendiculaire au champ électrique)

Ces deux champs alternatifs sinusoïdaux sont également perpendiculaire à la direction de propagation $\vec{Z}$ tel que le trièdre ($\vec{E}, \vec{H}, \vec{Z}$) soit direct.

C'est la direction du vecteur $\vec{E}$ qui définit la polarisation d'une onde.

Si ce vecteur est dans le plan vertical contenant l'axe de propagation, on est en polarisation verticale.

Inversement, s'il est dans le plan horizontal, on est en polarisation horizontale.

Phénomènes ondulatoires

Pour simplifier l'étude, on utilise un signal de base élémentaire : **la sinusoïde**.

$\Rightarrow$ $\cos(wt + \varphi)$ avec $w = 2\pi/T$ et φ phase du signal.

On dit que l'on raisonne en régime harmonique.

Cette onde est guidée dans un milieu caractérisé par :

- sa capacité linéique C [F/m].
- son inductance linéique L [H/m]
- ses pertes résistives linéiques R [Ohm/m]
- ses pertes diélectriques linéiques G [Ohm^{-1}/m] (ou conductance en Siemens/m)

Impédance caractéristique

L'impédance caractéristique d'une ligne est fonction de L, C, R et G par la formule :

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$$

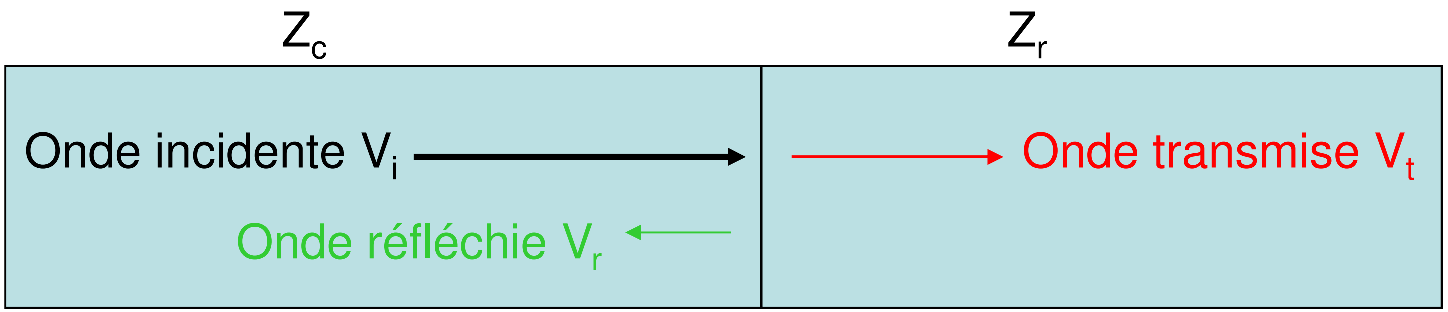
Si R=G=0 dans le cas des lignes sans pertes :

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Attention, le cas des lignes sans pertes est à considérer dans une gamme de fréquence donnée par le constructeur.

Coefficient de réflexion

Comme on l'a dit, en hyperfréquence nous avons des phénomènes de réflexion. Lorsque le signal se propage dans un milieu homogène défini par son impédance caractéristique Z_c, il peut s'atténuer et se déphasage tout au long de son parcours. Lorsque le signal doit franchir un nouveau milieu ayant une autre impédance caractéristique, une partie du signal se transmet dans le nouveau milieu et l'autre partie est réfléchie.



Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est défini par :

$$\Gamma_R = \frac{V_R}{V_I} = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C}$$

$0 \leq | \Gamma_R | \leq 1$

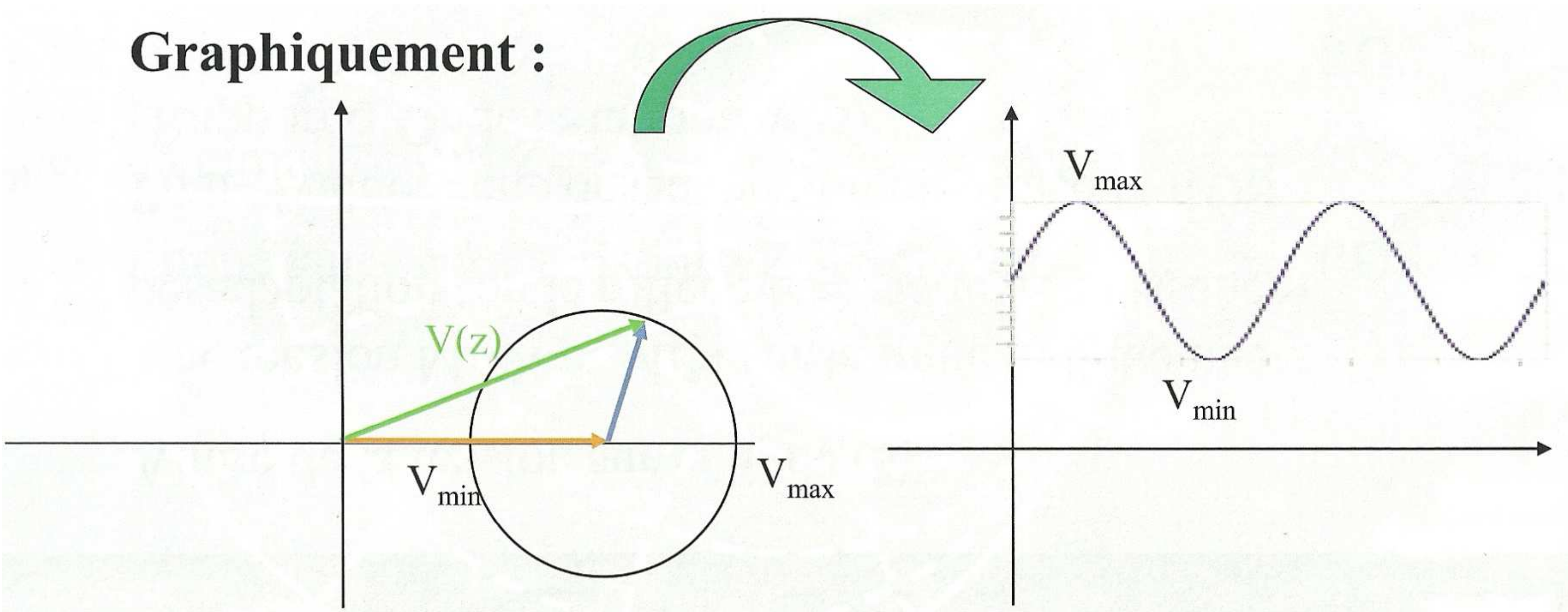
Si Zr est un court circuit $Z_r = 0$ $\Rightarrow \Gamma_R = -1$

Si Zr est un circuit ouvert $Z_r = \infty$ $\Rightarrow \Gamma_R = 1$

Si Zr est l'impédance caractéristique $Z_r = Z_C$ $\Rightarrow \Gamma_R = 0$

Allure de la tension efficace sur la ligne

Le signal sur la ligne est la somme du signal incident et du signal réfléchi. Ce dernier n'est pas en phase avec le signal incident (ça dépend de la valeur de Γ) et donc la valeur efficace du signal sur la ligne va connaître des pics et des creux.



ROS

Une tension MAX et MIN sur la ligne indique une désadaptation (onde réfléchie $\Rightarrow$ perte de puissance).

Pour évaluer cette désadaptation on utilise le ROS (Rapport d'Ondes Stationnaires) :

$$ROS(VSWR) = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1+|\Gamma_R|}{1-|\Gamma_R|}$$

$1 \leq \text{ROS} \leq \infty$

ROS

Applications : $$ROS(VSWR) = \frac{1+|\Gamma_R|}{1-|\Gamma_R|}$$

Z_R est un court-circuit $Z_R = 0$ $\Rightarrow \Gamma_R = -1$ $\Rightarrow ROS = \infty$

Z_R est un court ouvert $Z_R = \infty$ $\Rightarrow \Gamma_R = 1$ $\Rightarrow ROS = \infty$

Z_R est l'impédance caractéristique

$Z_R = Z_C$ $\Rightarrow \Gamma_R = 0$ $\Rightarrow ROS = 1$

$0 \leq \Gamma_R \leq 1$

$1 \leq ROS \leq \infty$

Parfaite ≤ Adaptation ≤ Médiocre

Propagation dans l’air

Lorsqu’une onde se propage dans l’air ou dans le vide, elle s’atténue et se déphase au fur et à mesure de sa progression dans le milieu.

Soit une onde à la sortie d’une antenne :

$$S(t) = E.\cos(\omega t + \varphi)$$

L’équation de cette onde à une distance d de l’antenne :

$$S(t) = \frac{E}{d}.\cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi d}{\lambda}\right)$$

Notions sur la polarisation d’une onde

C’est la direction du champ électrique qui définit la polarisation de l’onde.

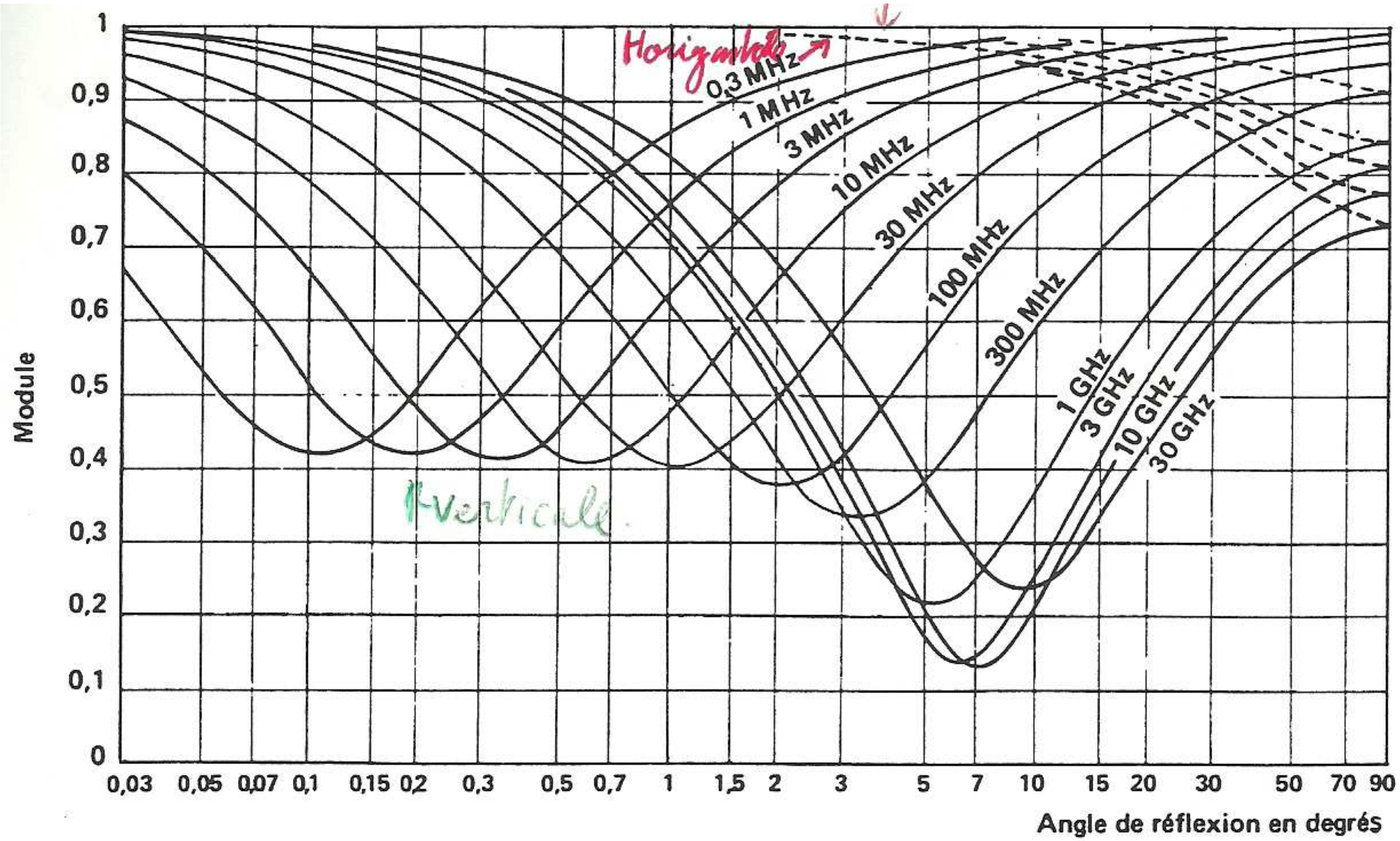
Si ce vecteur est dans le plan vertical contenant l’axe de propagation, on est en polarisation verticale.

Inversement, s’il est dans le plan horizontal, on est en polarisation horizontale.

Nous allons voir les propriétés de chaque type de polarisation lorsqu’elles interagissent avec le sol.

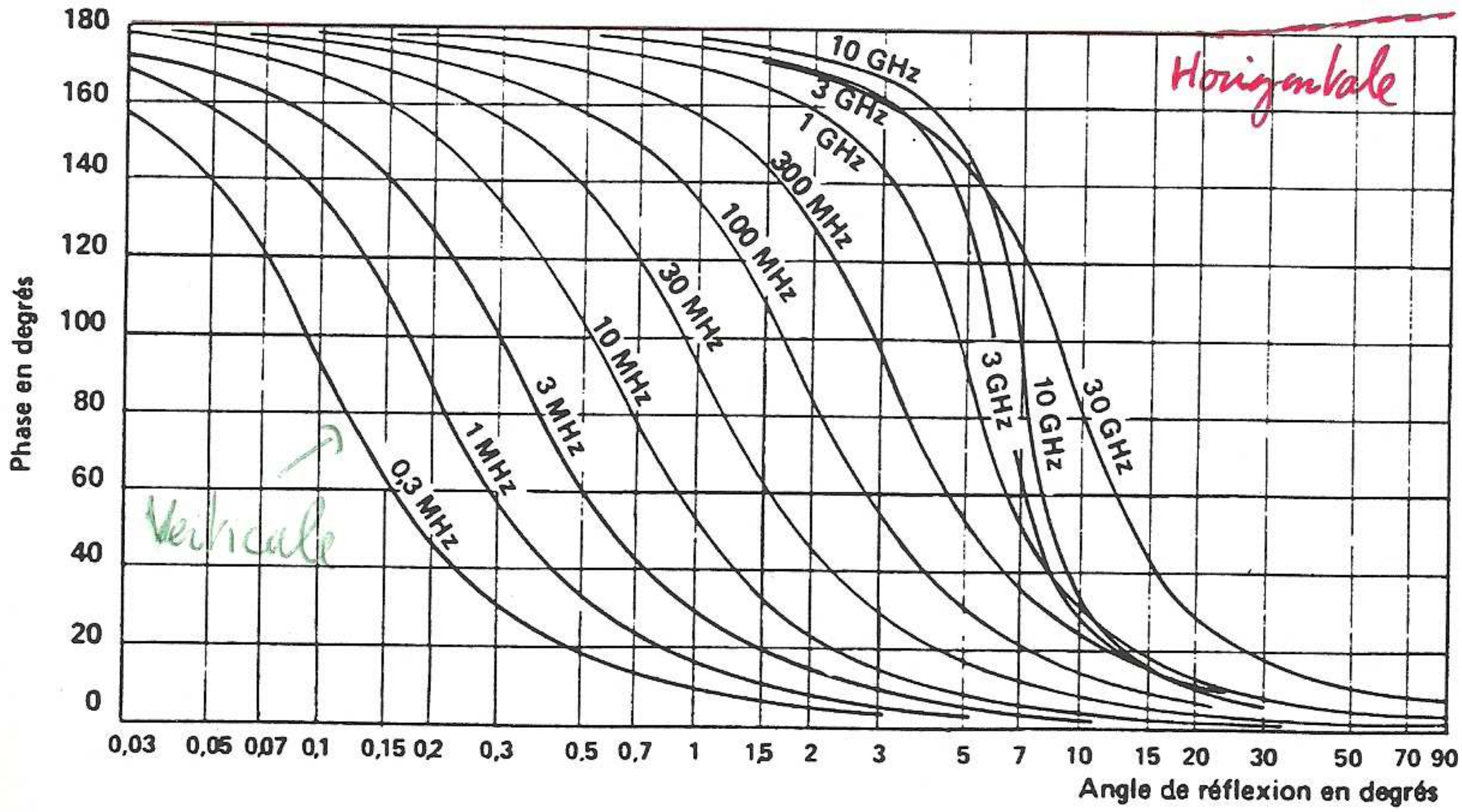
Comparaison polarisation horizontale et verticale

Facteur de réflexion de la mer : Module



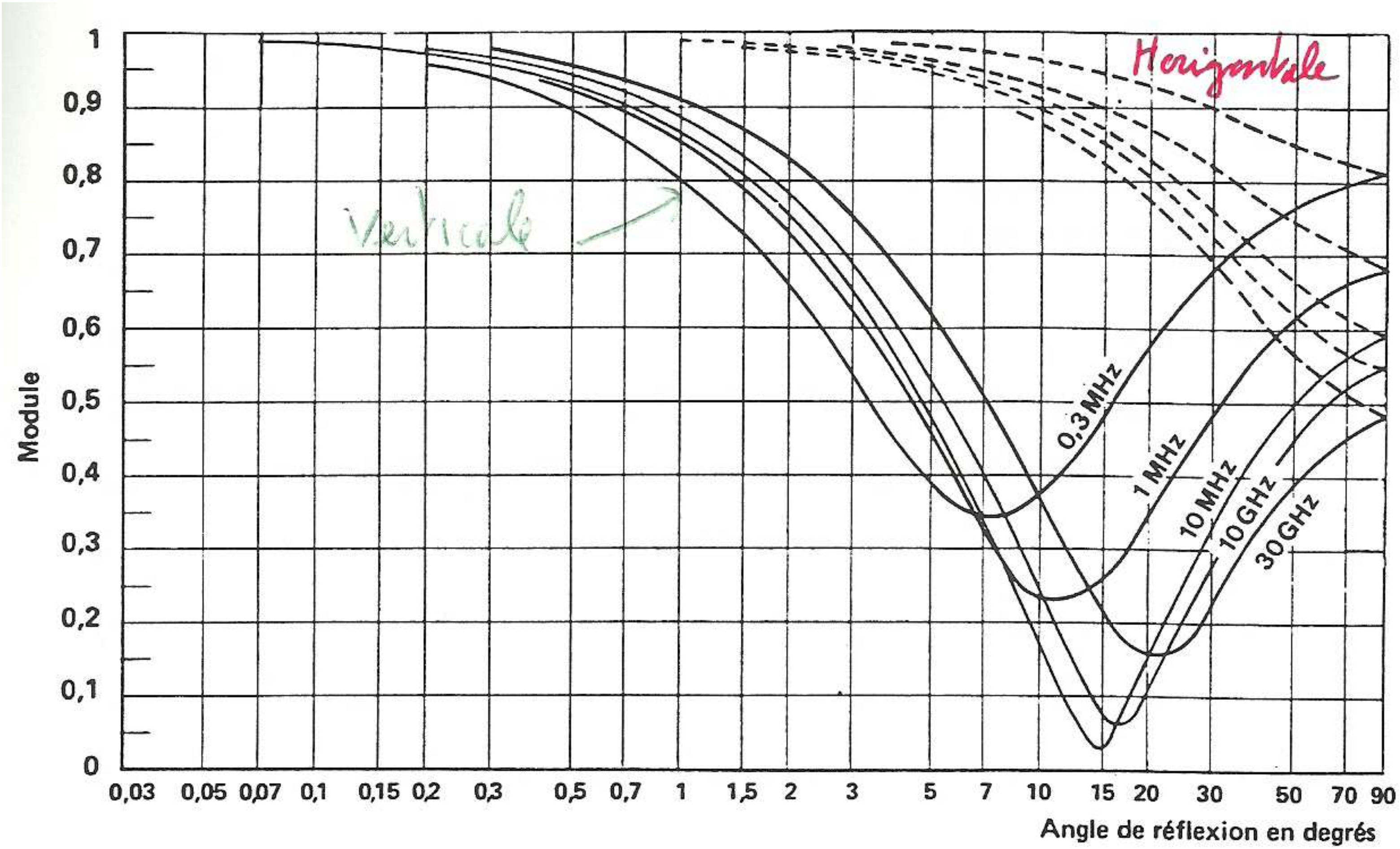
Comparaison polarisation horizontale et verticale

Facteur de réflexion de la mer : Phase



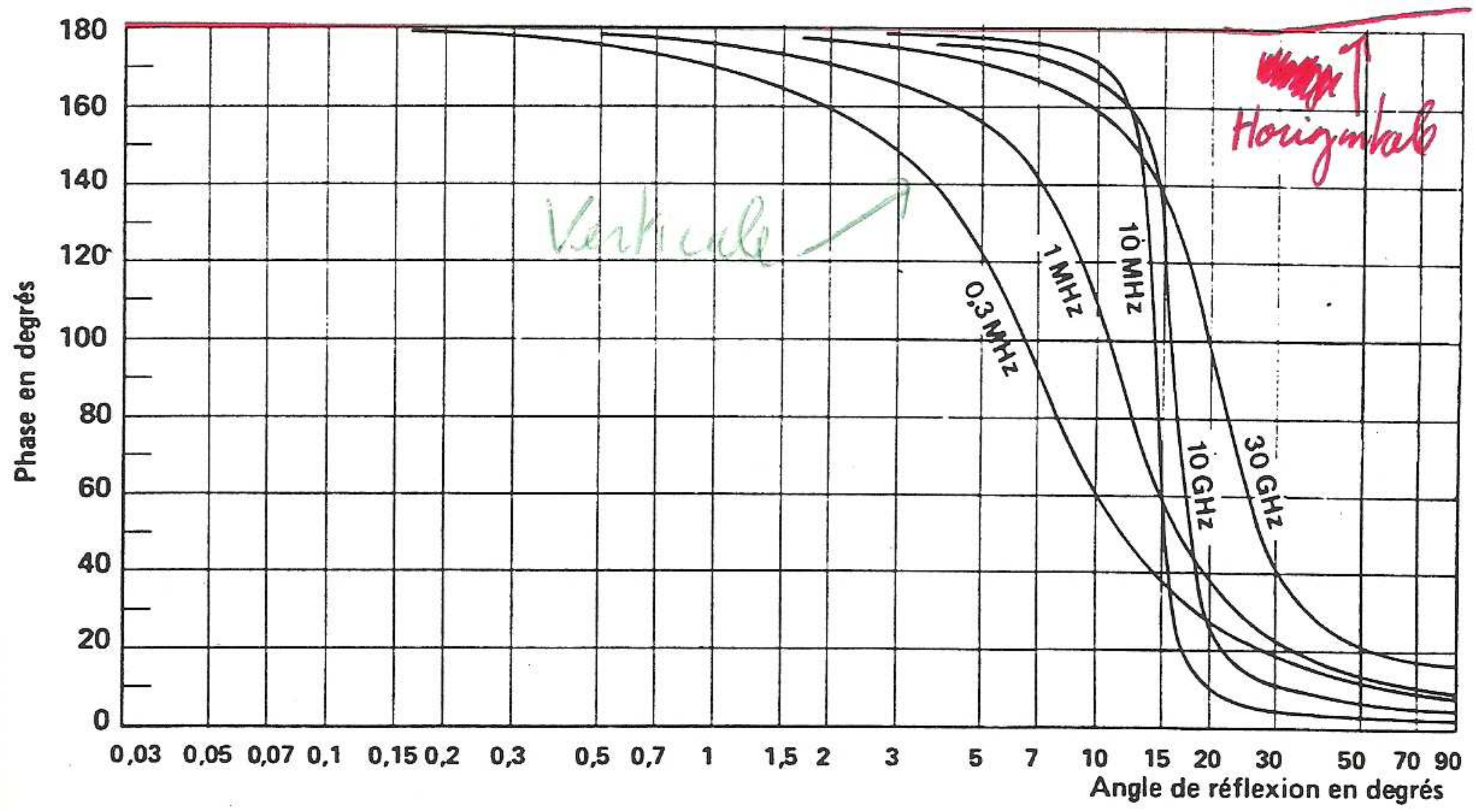
Comparaison polarisation horizontale et verticale

Facteur de réflexion de la terre : Module



Comparaison polarisation horizontale et verticale

Facteur de réflexion de la mer : Phase



Conclusions

En analysant les courbes précédentes on s’aperçoit que pour les angles de site faibles (<5°), l’interaction avec le sol en polarisation horizontale donne des absorptions et des déphases de l’onde plutôt constants quelque soit la fréquence et l’angle de réflexion.

Cette propriété de la polarisation horizontale nous intéressent fortement pour l’aviation civile. En effet, les avions au lointain sont vus sous des angles de site faibles, et les balises au sol interagissent forcément avec le sol. Le fait que l’onde réfléchie aura un comportement ’’constant’’ nous permet de prévoir le résultat final sur le signal que recevra l’avion.

La polarisation horizontale crée une onde réfléchie en opposition de phase avec l’onde directe et par conséquent il y aura création de nul de champ dans le rayonnement. Cela créera un problème pour le VOR notamment, mais nous verrons comment nous en prémunir. Pour le Glide par contre, ces propriétés vont nous être d’un grand secours.

Notions sur les antennes

Le rôle d’une antenne est de pouvoir transmettre un signal circulant dans un câble ou un guide d’onde (ou autres types de support) dans l’air libre.

Une antenne a une fréquence de résonance liée à la dimension de son brin actif. La longueur de celui-ci est proportionnelle à longueur d’onde du signal à transmettre. Typiquement, elle est égale au quart de la longueur d’onde.

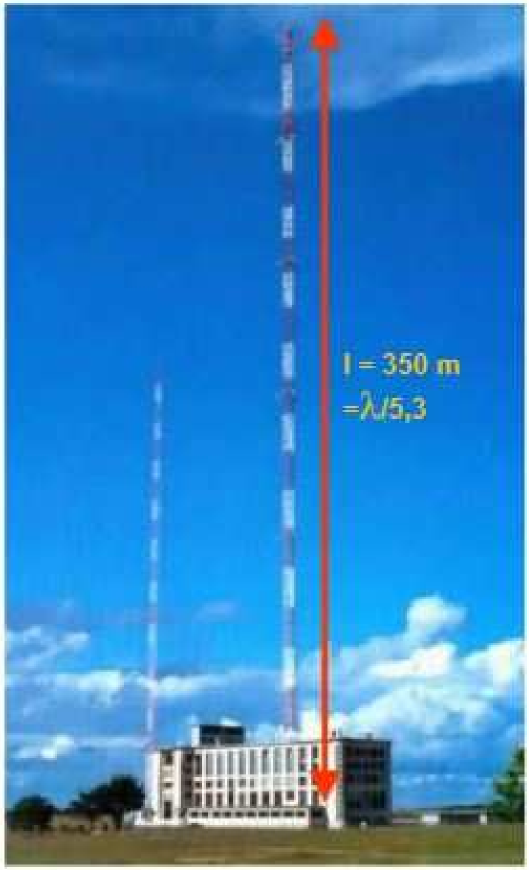
En travaillant à une fréquence élevée, on réduit la taille de l’antenne.

On en déduit donc qu’une antenne est donnée pour une gamme de fréquence d’utilisation. En dehors de celle-ci, elle ne sera plus adaptée et présentera un ROS élevé.

Exemple de taille d'une antenne

Antenne TV-UHF : 400 à 800 MHz et $\lambda \approx 50$ cm

antennes bande FM : 88 à 108 MHz et $\lambda \approx 3$m



Le centre GO d'Allouis utilise deux antennes pylônes de 350m de haut diffusant les programmes de France Inter à 162 kHz (λ= 1852 m).

Diagrammes d'antenne

Une antenne est aussi caractérisée par son diagramme de rayonnement. Il représente la répartition de la puissance rayonnée dans l'espace par l'antenne.

Il y a le diagramme de rayonnement horizontal (répartition de puissance dans le plan azimutal) et vertical (angle de site).

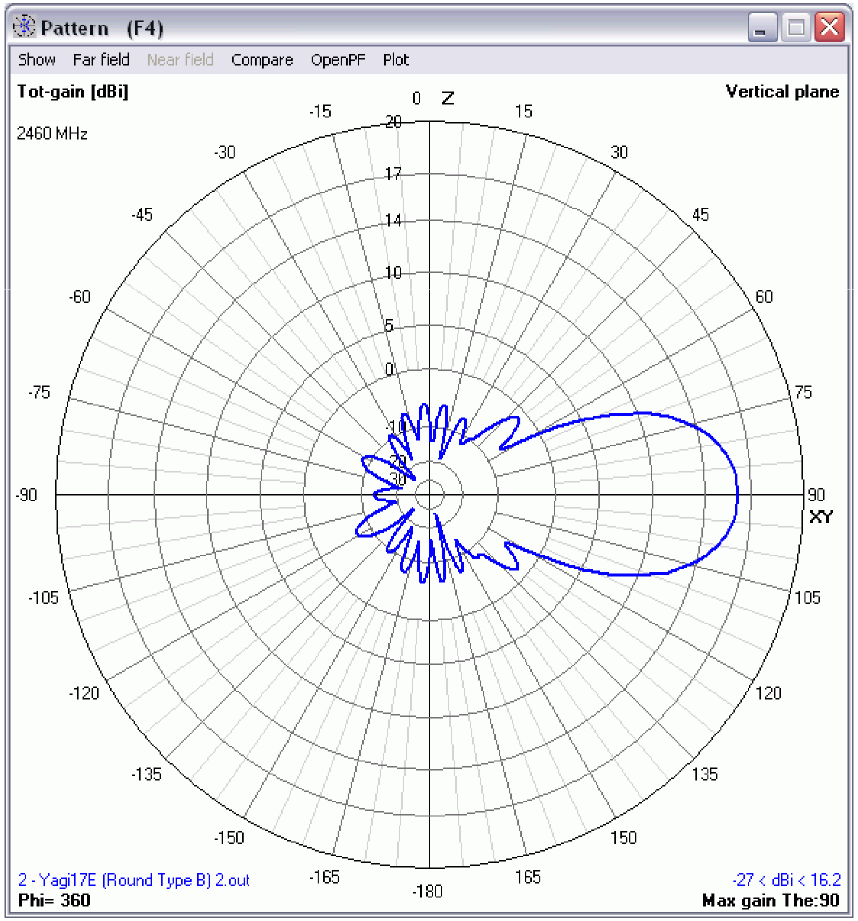
Le résultat de ce diagramme est une comparaison avec une antenne isotrope (qui émettrai la même puissance dans toutes les directions de l'espace).

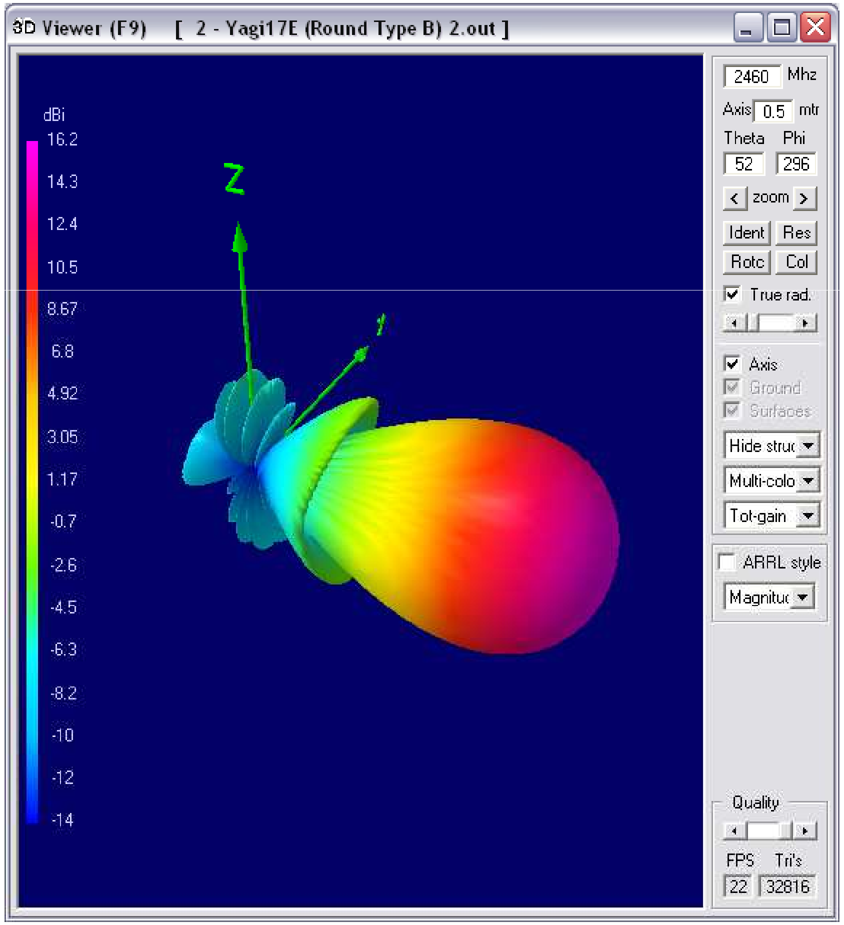
Lorsqu'on dit qu'une antenne a un gain de 3 dB par exemple, c'est par rapport à une antenne isotrope et dans une direction donnée. On dit aussi 3 dBi.

La directivité d'une antenne correspond à la largeur du lobe principal, entre les angles d'atténuation à 3 dB.

Diagrammes d'antenne

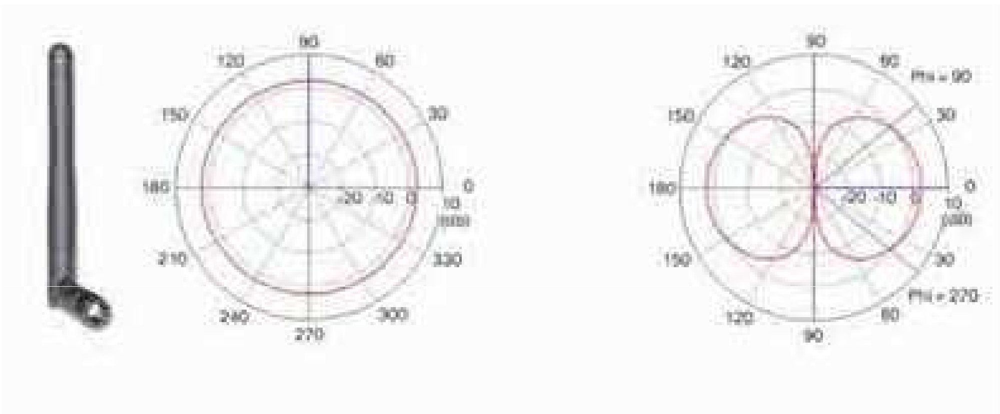
Exemple : antenne Yagi 17 éléments

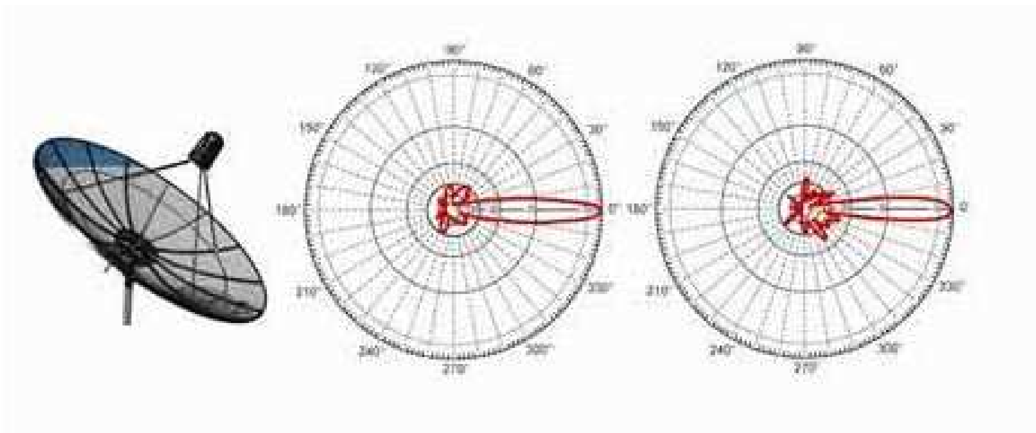




Diagrammes d’antenne

Quelques autres exemples de diagrammes :

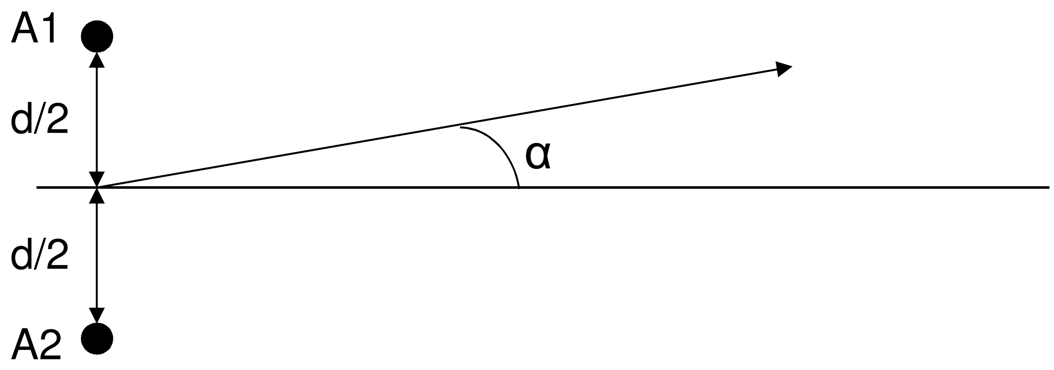




Réseau d'antennes

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes séparées et alimentées de façon synchrone. C'est-à-dire que le déphasage du courant entre les antennes est fixe.

Nous allons considérer ici le cas de deux même antennes espacées d'une distance d et alimentées dans un premier temps en phase, puis en opposition de phase. L'intensité du courant d'alimentation est identique dans les deux antennes.



Réseau d’antennes

Un réseau d’antennes peut être considéré comme une seule antenne qui aurait le même diagramme de rayonnement que ce réseau et situé sur le centre de phase de celui-ci.

On appelle F_g le facteur de directivité du groupement d’antenne. Il représente la résultante de l’action du groupement d’antennes sur le rayonnement.

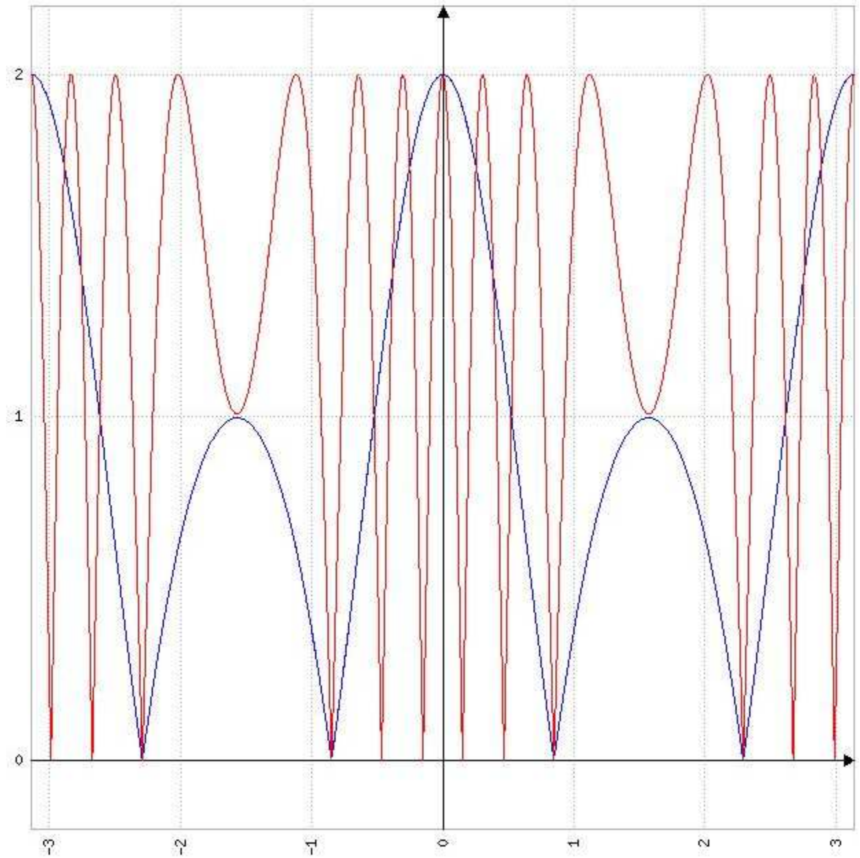
De plus, les antennes ont aussi leur propre diagramme de rayonnement. Dans le résultat final, il faudra donc tenir compte de celui-ci et de F_g, en les multipliant.

Facteur de directivité

- A1 et A2 alimentées en phase avec un courant de même amplitude :

On montre que :

$$F_g = 2.\cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}.\sin\alpha\right)$$



Ex : fréquence 100 MHz.

En bleu d = 2 mètres

En rouge d = 10 mètres

Facteur de directivité

- A1 et A2 alimentées en opposition de phase avec un courant de même amplitude :

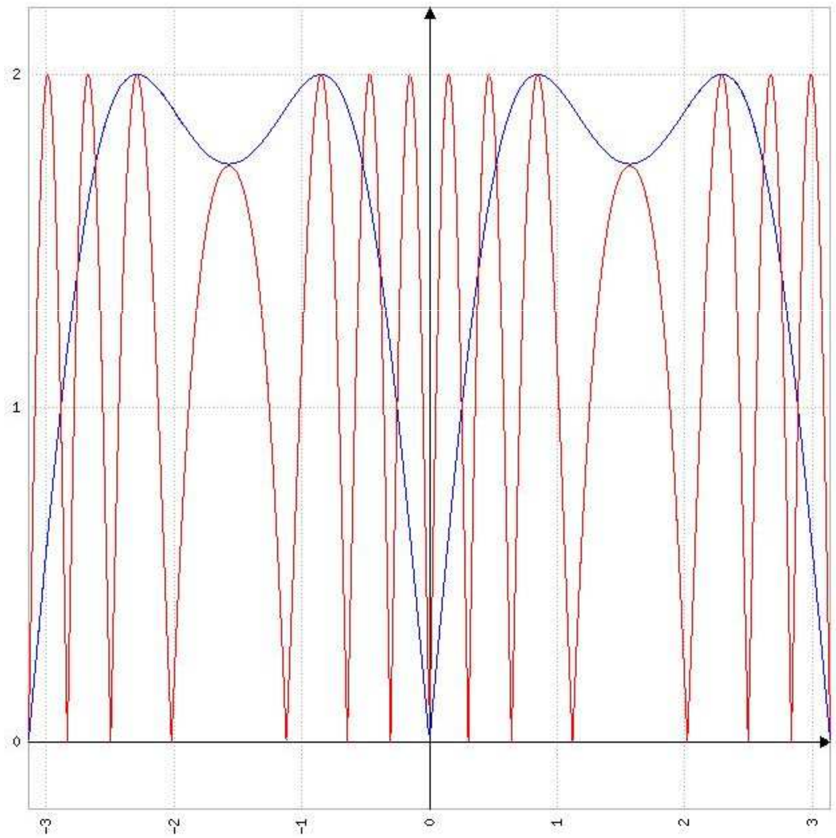
On montre que :

$$F_g = 2.\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}.\sin\alpha\right)$$

Ex : fréquence 100 MHz.

En bleu d = 2 mètres

En rouge d = 10 mètres



Notions sur les modulations

Nous rappellerons ici :

- Pourquoi on module
- La modulation d’amplitude
- La modulation de fréquence

Pourquoi on module

Comme on l’a vu sur le rappel sur les antennes, les dimensions de celles-ci dépendent de la longueur d’onde du signal à transmettre. Pour que les antennes aient des tailles raisonnables pour des applications courantes, il faut que la fréquence porteuse soit élevée. Or en général, l’information à transmettre est plutôt en basse fréquence (exemple la voix : 300 Hz à 3k Hz).

On se sert donc d’une modulation pour pouvoir transmettre l’information (basse fréquence) grâce à une porteuse (haute fréquence) qui servira de support de transmission pour l’information.

Modulation d'amplitude

La modulation d'amplitude consiste à faire varier l'amplitude d'un signal de fréquence élevée dans les même proportions qu'un signal de basse fréquence. Ce dernier est celui qui contient l'information à transmettre (voix par exemple), le premier étant le signal porteur.

L'équation d'un signal modulé en amplitude par une sinusoïde est de la forme :

$$s(t) = E_p.\cos(\omega t).[1 + m.\cos(\Omega t)]$$

Avec : E_p amplitude de la porteuse.

ω pulsation du signal haute fréquence porteuse.

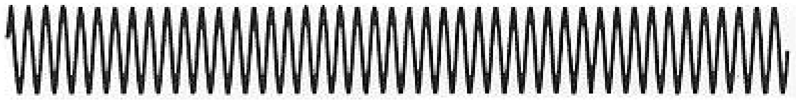
Ω pulsation du signal modulant.

m taux de modulation = E_b/E_p

E_b amplitude du signal modulant.

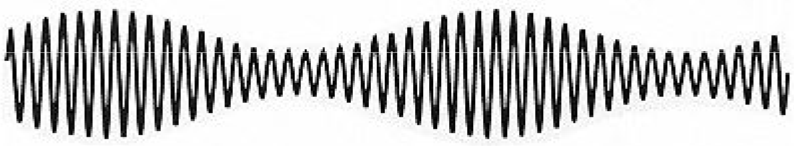
Représentation graphique

- Signal porteuse :



- Signal modulant :

- Modulation d’amplitude :

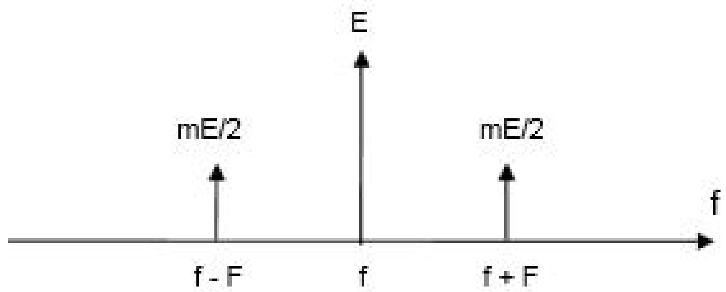


$$m = \frac{E_b}{E_p} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}}$$

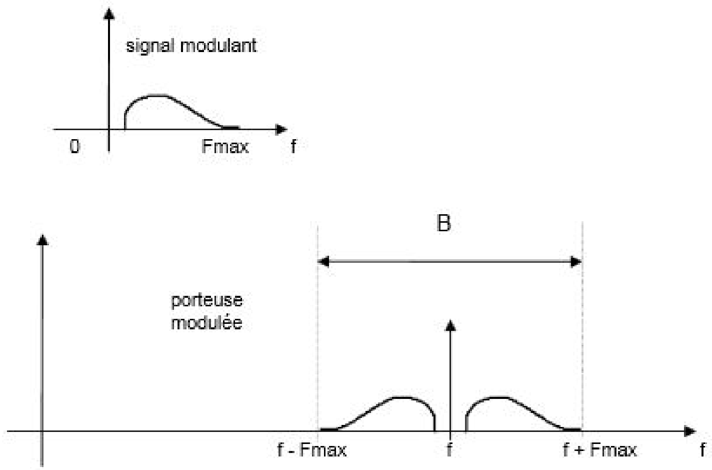
- Si l'amplitude du signal modulant E_b est supérieure à E_p, le taux de modulation est supérieur à 1. On parle de surmodulation. La démodulation ne peut plus restituer correctement le signal transmis (modulant). Il y a donc distorsion de celui-ci.

Spectre

- Si le signal modulant est sinusoïdal (spectre limité à 1 raie), on retrouve cette raie de part et d'autre de la porteuse dans le spectre du signal modulé.
  L'écart entre la porteuse et le signal modulant sera de $\pm$ F.
  L'énergie contenue dans cette raie vaut : $m.E_p/2$



Ce résultat se généralise dans le cas d'un signal modulant s(t) quelconque :



Modulation de fréquence

- En modulation de fréquence, l'information est portée par une modification de la fréquence de la porteuse, et non par une variation d'amplitude. La modulation de fréquence est plus ’’robuste’’ que la modulation d'amplitude pour transmettre un message dans des conditions difficiles.

- Équation d’un signal modulé en fréquence par une sinusoïde :

$$s(t) = E_p.\cos(\omega t + n.\sin(\Omega t))$$

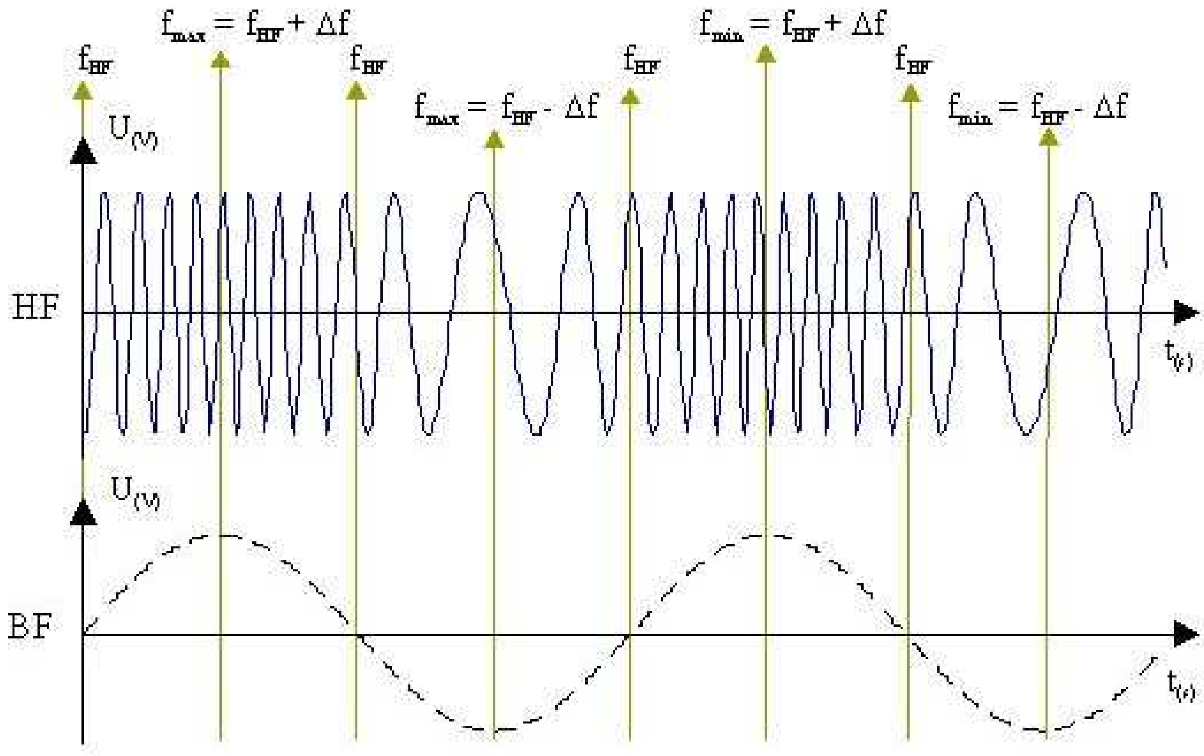
Avec : E_p amplitude de la porteuse.

ω pulsation du signal haute fréquence porteuse.

Ω pulsation du signal modulant.

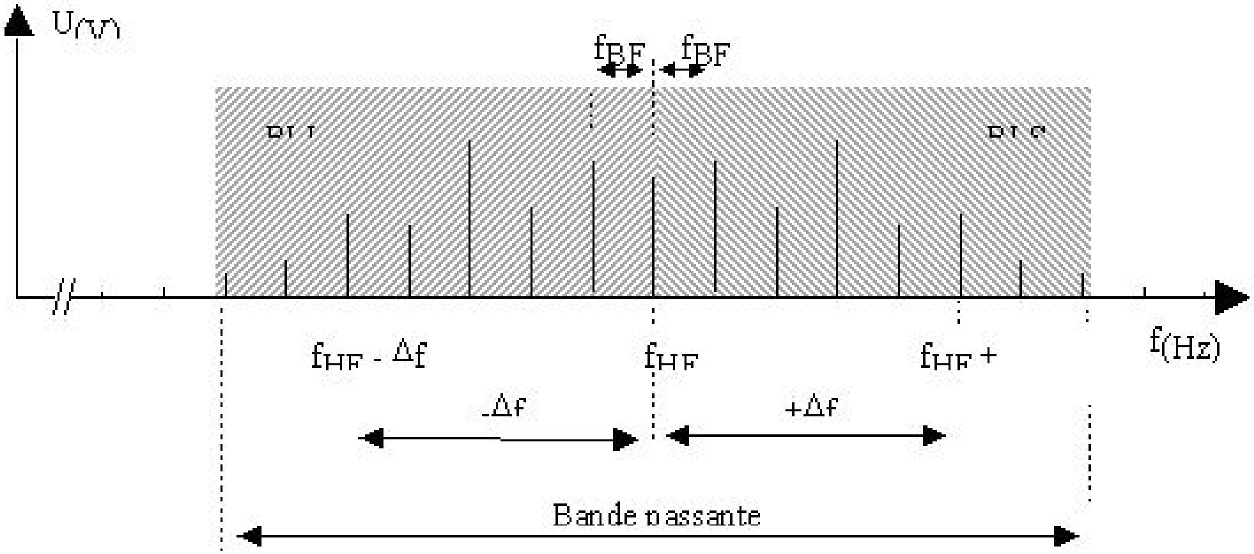
n indice de modulation = $\Delta f/F$ où Δf représente l’excursion en fréquence autour de la fréquence porteuse.

Représentation graphique



On rappelle : $\Delta f = n.F$ où F est la fréquence du signal modulant.

Spectre



Le calcul du spectre d’un signal modulé en fréquence est complexe.

La raie spectrale centrale à la fréquence f n’a pas forcément la plus grande amplitude.

Les diverses raies spectrales sont distantes de F l’une de l’autre.

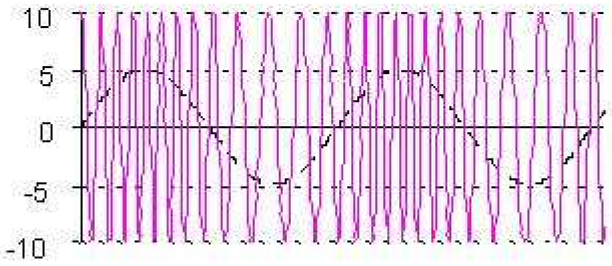
L’indice de modulation définit le nombre de raies spectrales comprises entre f et $+\Delta f$ ou f et $-\Delta f$.

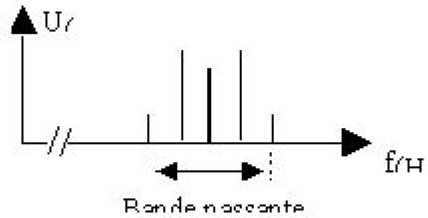
Pour que la qualité de transmission soit bonne, il est nécessaire de laisser passer au moins 2 raies spectrales après $\pm\Delta f$ (règle de Carson).

Exemples de spectre FM (1/2)

$\hat{U}_{HF} = 20$ V
$f_{HF} = 25$ kHz

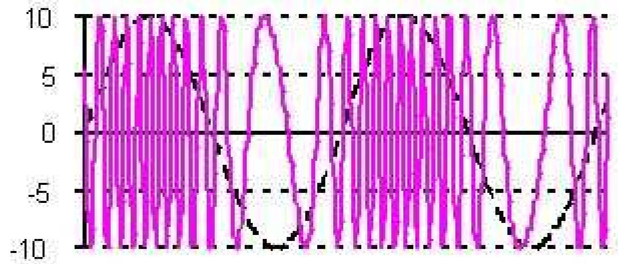
$\hat{U}_{BF} = 10$ V
$f_{BF} = 2$ kHz

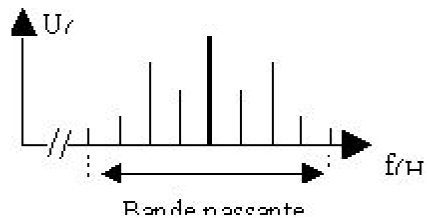




$\hat{U}_{HF} = 20$ V
$f_{HF} = 25$ kHz

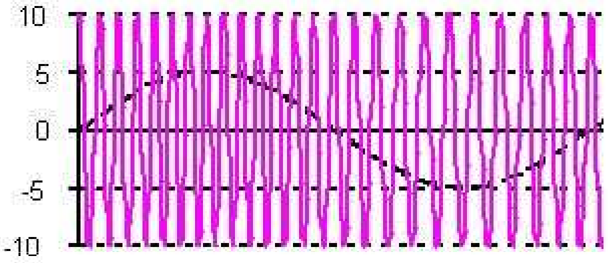
$\hat{U}_{BF} = 20$ V
$f_{BF} = 2$ kHz



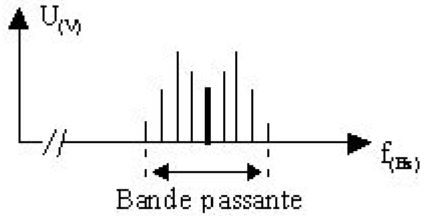


Exemples de spectre FM (2/2)

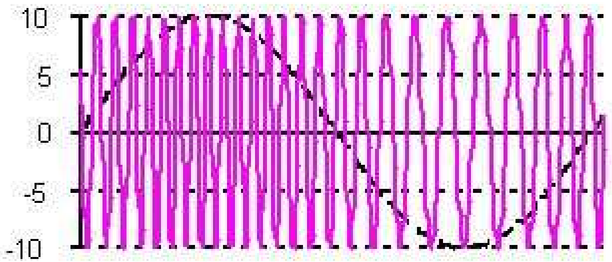
$\hat{U}_{HF} = 20$ V
$f_{HF} = 25$ kHz



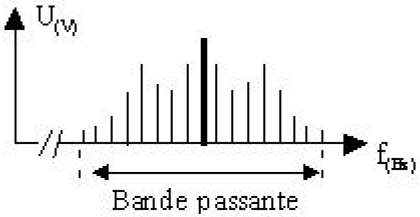
$\hat{U}_{BF} = 10$ V
$f_{BF} = 1$ kHz



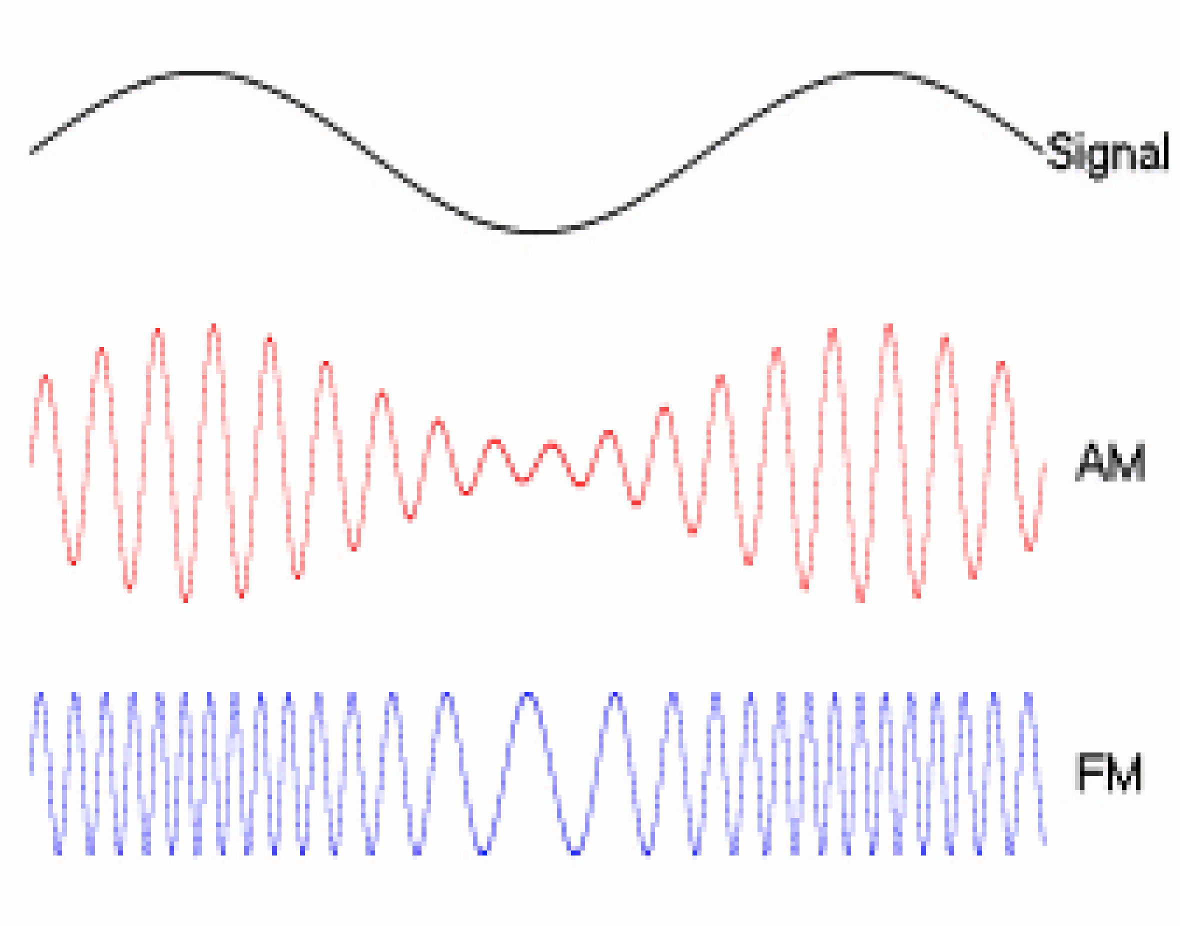
$\hat{U}_{HF} = 20$ V
$f_{HF} = 25$ kHz



$\hat{U}_{BF} = 20$ V
$f_{BF} = 1$ kHz



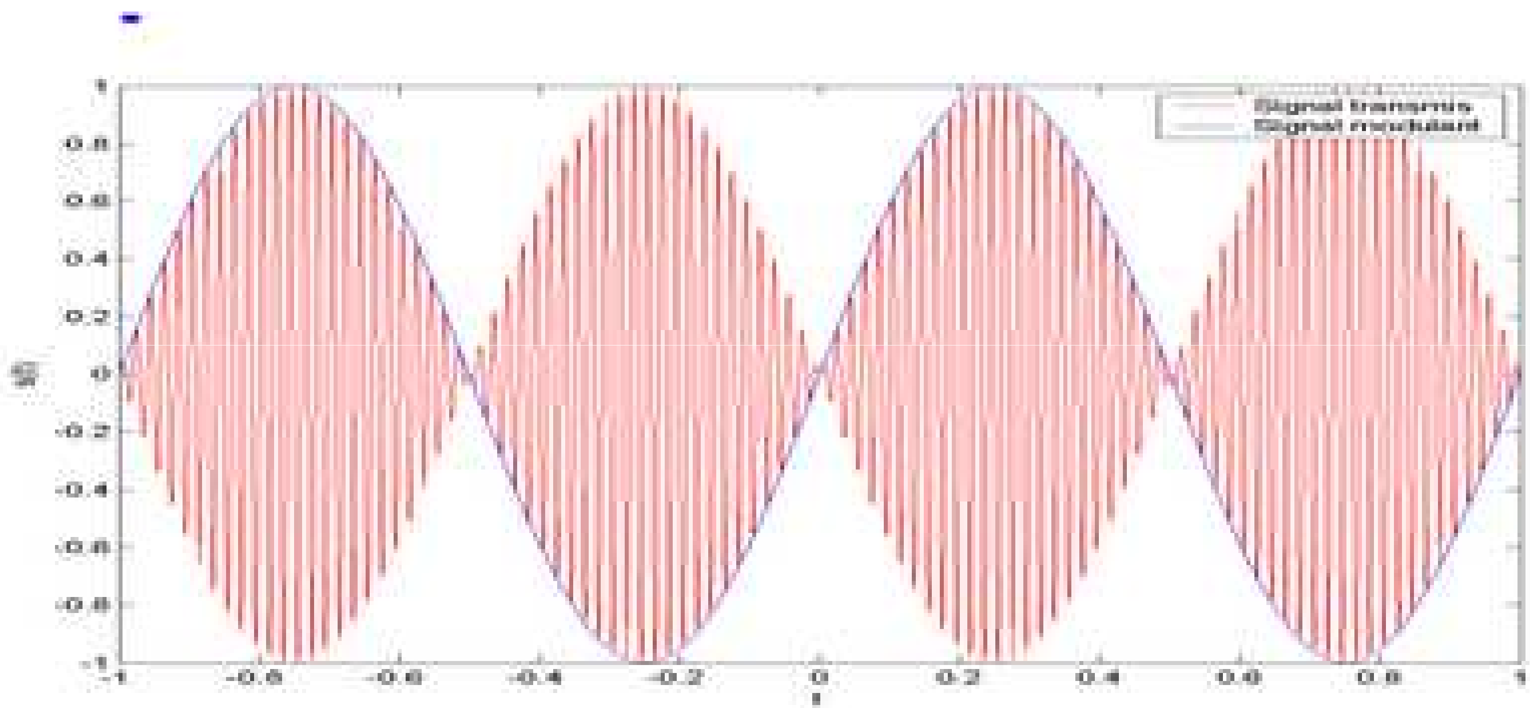
Animation différence entre AM et FM



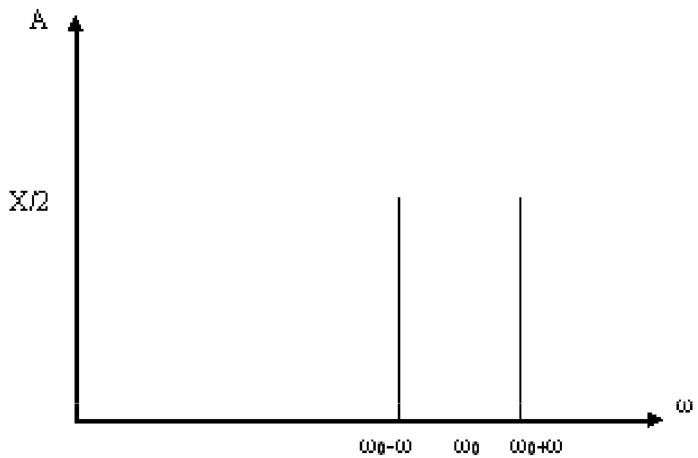
Modulation d'amplitude à porteuse supprimée (ou bande latérale)

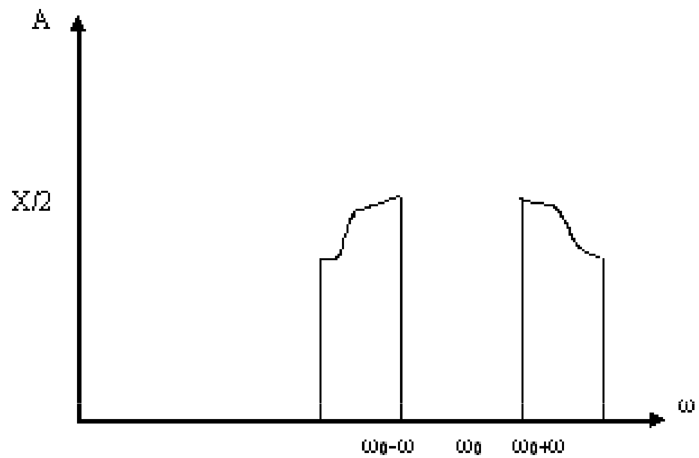
- La modulation d'amplitude à porteuse supprimée consiste à la multiplication de la porteuse par le signal modulant.
- Porteuse : $P(t) = E_P.\cos(\omega_0 t)$
- Signal modulant : $M(t) = E_B.\cos(\omega t)$
- Signal résultant : $S(t) = E_P.E_B.\ \cos(\omega_0 t).\ \cos(\omega\ t)$
- Rappel : $\cos(a).\cos(b) = 0{,}5.\cos(a+b) + \cos(a-b)$
- Donc $S(t) = 0{,}5.X.\cos[(\omega_0 + \omega)t] + 0{,}5.X.\cos[(\omega_0 - \omega)t]$
- Avec $X = E_P.E_B$

Représentation graphique



Spectre





On s'aperçoit dans la représentation spectrale que la raie en ω_0 (donc la porteuse) a disparu.