Ondes et antennes

Plan de cours

- Définition d'une onde électromagnétique
- Propriétés des OEM
- Spectre des OEM
- Différents types d'antennes
- Champ créé par une antenne
- Bilan de puissance d'une liaison HF

Exercices

- Bilan d'une liaison radio
- Antenne de Marconi (quart d'onde)
- Antenne dipôle pour la TV
- Diagramme de rayonnement d'une antenne

Introduction : Fréquence et longueur d'onde

L'unité de mesure de la **fréquence** est le **Hertz (Hz)**.

Sa **période** est exprimée en **secondes (s)** est égale à 1/f

A ne pas confondre avec sa **longueur d'onde** exprimée en **mètres (m)**.

Introduction : Fréquence et longueur d'onde

Les ondes radio se propagent à la vitesse de la lumière, c à d: 3.10^5 Km/s.

La longueur d'onde λ en mètres est égale à :«λ = **3.10^8/f** (avec f = fréquence en Hz) ou encore :«λ = **300/f** (avec f = fréquence en MHz)

➔Plus la fréquence sera élevée, plus la longueur d'onde sera courte.

Introduction : Fréquence et longueur d'onde

Rappel :

1 GHz = 1000 MHz
= 1000 000 KHz
= 1000 000 000 Hz

1 MHz = 1000 KHz
= 1000 000 Hz

1 KHz = 1000 Hz

Définition de l'onde électromagnétique

Une onde électromagnétique (OEM) est constituée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B qui varient au même rythme que le courant qui leur a donné naissance.

C'est le physicien Maxwell qui a étudié les rapports entre les deux champs, établissant des équations connues sous le nom d'équations de Maxwell.

Définition de l'onde électromagnétique

On peut remarquer que :

➔ toute circulation de charges dans un conducteur produit une OEM

➔ lorsque cette émission est voulue, le conducteur s'appelle «antenne d'émission»

➔ lorsque l'émission n'est pas voulue, elle est dite «parasite»

➔ une OEM crée dans tout conducteur des courants induits (antenne de réception)

Définition de l'onde électromagnétique

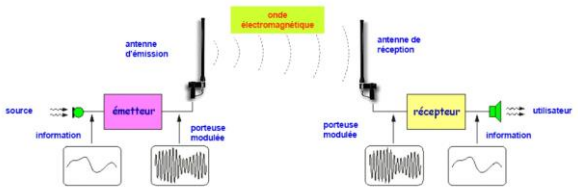


Figure 1. Rôle des antennes

Définition de l'onde électromagnétique

Les champs E et B produits par l'antenne se répandent dans tout l'espace environnant l'antenne, en s'atténuant. A une certaine distance de l'antenne d'émission :

➔les vecteurs E et B sont perpendiculaires entre eux

➔ les vecteurs E et B sont perpendiculaires à la direction de propagation

➔ E et B sont déphasés (en retard) par rapport au courant qui les a créé

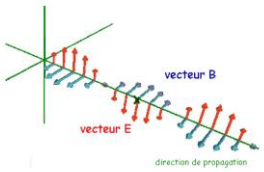


Figure 2. Champs E et B en un point

Définition de l'onde électromagnétique

L'onde électromagnétique se propage en ligne droite, à la vitesse de la lumière :

⍰⍰ vitesse de propagation dans le vide ou l'air : $c = 3.10^8\ m/s$

⍰⍰ dans un matériau diélectrique de permittivité relative ε_r (isolant de câble coaxial, par exemple) la vitesse de propagation est inférieure à celle de la lumière : $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{c}{n}$

Propriétés de l'onde électromagnétique

⇒ fréquence :

⍰⍰ la fréquence d'une OEM est la fréquence des champs E et B qui la composent

⍰⍰ c'est aussi la fréquence du courant circulant dans l'antenne

Exemple : un signal sinusoïdal de f = 100 MHz appliqué à une antenne d'émission produira des champs E et B variant sinusoïdalement à la fréquence de 100 MHz.

⇒ longueur d'onde :

La longueur d'onde λ est le trajet parcouru par l'onde durant une période T :

$\lambda = \frac{c}{f} = cT$

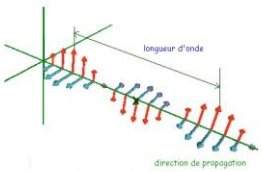


Figure 3. Définition de la longueur d'onde

Propriétés de l'onde électromagnétique

⇒ polarisation :

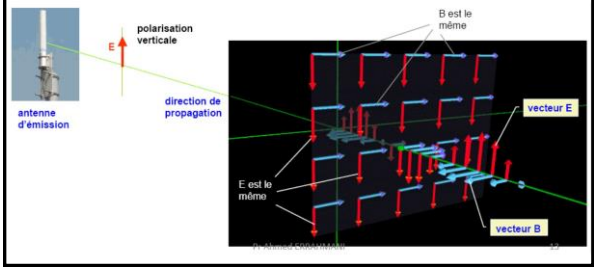
La polarisation d'une OEM est la direction de son champ électrique E.

➔si E garde une direction constante, on dit que la polarisation est rectiligne (le plus courant)

➔ le plus souvent, E est horizontal (polarisation horizontale) ou vertical (polarisation verticale)

➔ à grande distance de l'antenne, E est toujours perpendiculaire à la direction de propagation

➔ il existe aussi des polarisation circulaire et elliptique



Propriétés de l'onde électromagnétique

⇒ propagation :

Les ondes radio se propagent de l'antenne d'émission à l'antenne de réception de diverses manières :

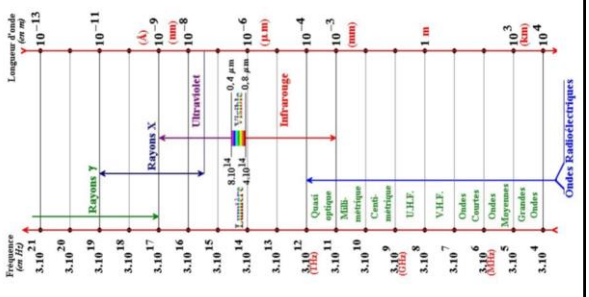
➔ par onde directe, partant de l'émetteur et arrivant sur le récepteur sans rencontrer d'obstacles naturels (montagnes, couches atmosphériques) ou artificiels (immeubles, lignes à THT)

➔ par onde réfléchie, lorsque l'onde rencontre un obstacle et est renvoyée dans sa totalité, ou en partie, dans une direction différente.

Les couches ionisées de l'atmosphère peuvent constituer des surfaces de réflexion si f < 30 MHz.

Spectre des ondes électromagnétique

Le tableau suivant indique les applications des ondes électromagnétiques courantes :



Les différents types d'antennes

Pour les liaisons radio, on utilise une très grande variété d'antennes selon leurs propriétés :

➔pour champ B (bobine, cadre par ex.) ou champ E (la plupart des antennes)

➔ directives ou omnidirectionnelles

➔ à gain faible ou à fort gain

➔ impédance normalisée de 50 Ω, ou autre valeur

➔ antenne filaire (télescopique par ex.) ou à réflecteur (parabole par ex.) etc…

Remarque : les dimensions de l'antenne sont toujours liées à la fréquence de travail (souvent λ/4 ou λ/2)

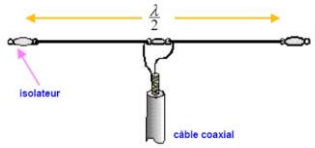
Quelques exemples d'antennes

Antenne dipôle

➔ Économique

➔ Rayonne perpendiculairement au brin

➔ Impédance 75 Ω



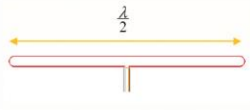
Quelques exemples d'antennes

Antenne «dipôle replié»

➔ Impédance 300 Ω

➔ Plus robuste que le dipôle

➔ Associée à des brins directeurs et réflecteurs, donne l'antenne Yagi très utilisée en TV



Quelques exemples d'antennes

Antenne quart-d'onde

➔ Nécessite un plan de masse

➔ Omnidirectionnelle dans le plan horizontal

➔ Moins encombrante que le dipôle

➔ Impédance 36 Ω

Quelques exemples d'antennes

Antenne Ground-plane

➔ Omnidirectionnelle dans le plan horizontal

➔ Ne nécessite pas de plan de masse

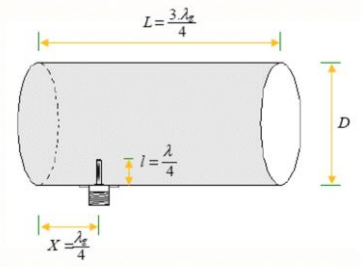
➔ Impédance 50 Ω

Quelques exemples d'antennes

Antenne (guide d'onde)

➔ Directive

➔ Gain élevé



λ_c = 1,706 . D

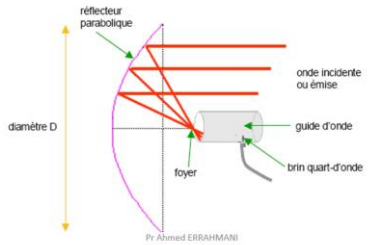
$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}$$

Quelques exemples d'antennes

Antenne parabolique

➔ Gain élevé lié au diamètre du réflecteur

➔ Très directive

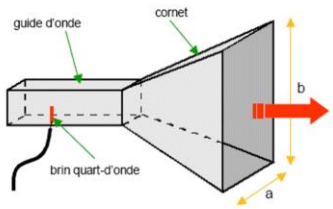


Quelques exemples d'antennes

Antenne cornet

➔ Très directive

➔ Gain élevé



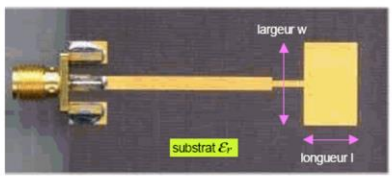
Quelques exemples d'antennes

Antenne patch

➔ Résonance si l=λ/2

➔ w joue sur l'impédance à la résonance

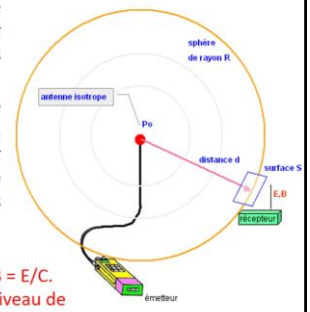
➔ Peu directive



Champ créé par une antenne isotrope

Une antenne isotrope rayonne la puissance P_0 de l'émetteur uniformément dans toutes les directions.

On ne sait pas réaliser une telle antenne en pratique, mais elle est commode pour les calculs et pour servir de référence aux antennes réelles.



Question :

Sachant que : $E = \sqrt{120\,\pi\,P}$ et $B = E/C$.

Calculer les champs E et B au niveau de l'antenne du récepteur ?

AN : P_0 = 10 watt et d = 5 km

Champ créé par une antenne isotrope

- la surface S de la sphère de rayon d s'écrit : $S = 4\pi d^2$ *en* m^2
- la puissance émise Po se répartit sur cette sphère, une surface S reçoit donc une densité depuissance P : $P = \frac{P_0}{S} = \frac{P_0}{4\pi d^2}$ *en* W/m^2
- on montre que le champ électrique E au niveau du récepteur s'écrit : $E = \sqrt{120\pi P}$ *en* V/m
- et le champ magnétique B : $B = \frac{E}{c}$ *en Tesla*

Application : un émetteur de 10W muni d'une antenne isotrope produirait à 5 km :

$P = \frac{P_0}{4\pi d^2} = 31{,}8\ nW/m^2$ $\quad E = \sqrt{120\pi P} = 3{,}46\ mV/m$ $\quad B = \frac{E}{c} = 11{,}5\ pT$

Bilan de puissance d'une liaison HF

Une liaison radio est établie au moyen d'un émetteur de puissance P_0 équipé d'une antenne directive de gain G_1 par rapport à une antenne isotrope.

Le récepteur est équipé d'une antenne directive de gain G_2, pointée vers l'émetteur.

Bilan de puissance d'une liaison HF

Si on néglige l'influence des obstacles, difficiles à évaluer, on peut calculer la puissance reçue P_r à l'entrée du récepteur grâce à la formule de Friis :

$$P_r = g_1\, g_2\, P_0\, [\lambda / 4\,\pi\, D\,]^2$$

avec :

P_0 et P_r en watt, d et λ en mètres , g_1 et g_2 sans unité (amplification en puissance)

Bilan de puissance d'une liaison HF

Si on exprime la puissance en dBm et les gains en dB, la formule de Friis devient, après simplification :

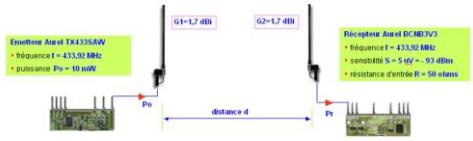
$P_r = P_0 + G_1 + G_2 - 20 \log (f) - 20 \log (d) + 147.5$

avec :

P_0 et P_r en dBm, d en mètres, f en Hz et G_1 et G_2 en dBi

Bilan de puissance d'une liaison HF

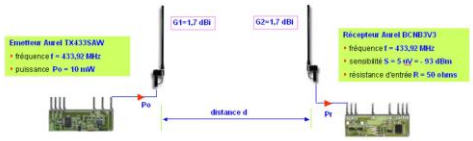
Exemple d'une liaison par modules Aurel :



Question : une liaison sur une distance de 1 km est-elle possible ?
Réponse : le niveau à l'entrée du récepteur vaut :

Bilan de puissance d'une liaison HF

Exemple d'une liaison par modules Aurel :



Voir commentaire ci dessous

Question : une liaison sur une distance de 1 km est-elle possible ?
Réponse : le niveau à l'entrée du récepteur vaut :

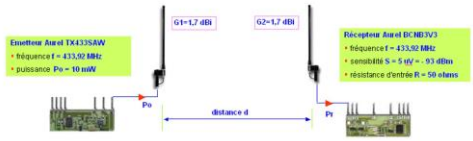
$Pr = 10 \text{ dBm} + 1,7 \text{ dBi} + 1,7 \text{ dBi} - 20\log(433,92.10^6) - 20\log(1000) + 147,5$

$Pr = -71,8 \text{ dBm}$

Ce niveau est supérieur à la sensibilité du récepteur, la puissance d'émission est donc suffisante et la liaison possible.

Bilan de puissance d'une liaison HF

Exemple d'une liaison par modules Aurel :



Question : Quelle est la portée (distance) maximale au dessus de laquelle la liaison ne peut plus fonctionner ?

Réponse :

$-93 = 10 + 1,7 + 1,7 - 20.\log(433,92 . 10^6) - 20.\log(d) + 147,5$

$20.\log(d) = 81,15181$

➔ $d = 10^{(81,15181/20)} = 11,418$ Km

bels et décibels - Rappel

Si on appelle X le rapport de deux puissances P_1 et P_0, la valeur de X en bel (B) s'écrit :

$$X_B = \log_{10}\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$$

Un décibel étant égal à un dixième de bel. X en décibel (dB) : $X_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$

Si le rapport entre les deux puissances est de 10^2, cela correspond à **2 bels ou 20 dB**.

bels et décibels

À titre d'exemple :

- la puissance double environ tous les 3 décibels (à montrer ???)
- 130 décibels correspondent à une puissance 1000 fois plus importante que 100 décibels (à montrer ???).

bels et décibels

dBm (parfois **dBmW**) est une abréviation du rapport de puissance en décibels (dB) entre la puissance mesurée et un milliwatt (mW).

Elle est utilisée dans les réseaux radio, micro-ondes et fibre optique comme une mesure commode de puissance absolue en raison de sa capacité à exprimer à la fois des valeurs très grandes et très petites sous une forme abrégée. Il existe aussi les dBW, qui sont un rapport à un watt (1000 mW).

bels et décibels

Comme cette unité est référencé au watt, c'est une unité de mesure absolue. Par comparaison, le décibel (**dB**) est une unité sans dimension propre, utilisée pour quantifier le rapport entre deux valeurs, telles que signal par rapport au bruit.

Le Décibel dB, dBm

Le décibel est une unité de mesure très employée. Le principal avantage de cette unité est de simplifier les calculs de gain ou d'atténuation, qui se transforment alors en additions ou en soustractions.

Il faut distinguer le gain en puissance et en tension/courant :

Gain dB en puissance = 10 x Log (P_1 / P_2)

Gain dB en tension = 20 x Log (U_1 / U_2) (à montrer ???)

Remarque: sur la calculatrice, utiliser la touche log et non ln

Le Décibel dB, dBm

P(dBm) **= 10 . log (P**(mw)**) ;** *(avec P en milliwatt)*

ou encore :

$P_{(mW)}$ = invlog(dBm / 10)

et sachant que $P = U^2 / R$:

$U_{(V)}$ = SQR [R . invlog(dBm /10) / 1000]

(avec R en Ohms, exemple : 50, 75 ou 600 Ohms).

Le Décibel dB, dBm

Le décibel par rapport au milliwatt est noté dBm.

Il exprime une puissance par rapport à une référence.

Cette référence est 1 milliwatt sur une impédance bien précise.

Attention donc à manipuler le dBm avec précaution

(A montrer les valeurs suivantes ???) :

- En téléphonie 1 mW correspond à 0 dBm sur 600 Ohms, soit 775 mV.
- En radio 1 mW correspond à 0 dBm sur 50 Ohms, soit 224 mV.
- 1 mW correspond à 0 dBm sur 75 Ohms, soit 274 mV.

Gain d'une antenne

Une antenne isotrope n'a pas de gain, donc = 0 dB. C'est une antenne imaginaire qui rayonne uniformément dans toutes les directions.

Une antenne dipôle possède un gain de 2,15 dB par rapport à l'antenne isotrope. On dit aussi qu'elle a un gain de 2,15 dBi.

Le gain d'une antenne est exprimé plus généralement en dBd, c'est à dire par rapport au dipôle demi-onde.

En résumé :

gain en dBd = gain en dBi - 2,15 dB

gain en dBi = gain en dBd + 2,15 dB

Puissances PAR et PIRE

La puissance HF d'un émetteur s'exprime généralement en **Watts (W)** ou en dBm.

PAR : Puissance Apparente Rayonnée (ERP Effective Radiated Power). Puissance rayonnée par l'antenne en tenant compte de son gain en dBd.

PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (EIRP Equivalent Isotropic Radiated Power). Puissance rayonnée par l'antenne en tenant compte de son gain en dBi.

PAR_{dBd} = $PIRE_{dBi}$ - 2,15 ou plus simplement : **PIRE = PAR x 1,64**

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Le **ROS** (**SWR** Standing Wave Ratio ou **VSWR** Voltage Standing Wave Ratio) est le **R**apport d'**O**ndes **S**tationnaires exprimé par un chiffre sans unité de 1 à l'infini. Ce rapport est très utilisé en radio.

Le **TOS** est le **T**aux d'**O**ndes **S**tationnaires exprimé en %, de 0% à 100%.

Attention, il y a très souvent confusion entre les deux !!!!

Le ROS est un déséquilibre de l'impédance de la charge (antenne) par rapport à celle de la source (émetteur).

Le TOS est la conséquence de cette désadaptation.

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Ces valeurs sont basées sur un calcul incluant la mesure de puissance directe et de puissance réfléchie.

Puissance directe ou Puissance incidente (Forward Power) est la puissance que l'émetteur envoie vers l'antenne.

Puissance réfléchie (Reflected Power) est la puissance non émise qui retourne vers l'émetteur. Dans le meilleur des cas elle doit être nulle.

Dans la pratique, il y a souvent un retour dû aux câbles, connecteurs ou à l'antenne qui n'est pas parfaite.

Pour mesurer la puissance directe et réfléchie, il faut insérer un wattmètre entre l'émetteur et l'antenne

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Calcul du ROS à partir de la puissance directe et réfléchie.

Si vous possédez un wattmètre réflectomètre digne de ce nom, il vous indiquera la puissance directe et réfléchie. Pour déterminer le ROS, appliquez la formule ci-après :

Pr = puissance réfléchie en W

Pd = puissance directe en W

$$ROS = \frac{1+\sqrt{\frac{Pr}{Pd}}}{1-\sqrt{\frac{Pr}{Pd}}}$$

Puissance émise = Pd - Pr

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Autres définitions du ROS :

Le ROS (**R**apport d'**O**ndes **S**tationnaires ou SWR ou VSWR (**V**oltage **S**tanding **W**ave **R**atio). On peut l'exprimer de différentes manière comme nous allons le voir :

$$ROS = \frac{V\,\max}{V\,\min} = \frac{Vi + Vr}{Vi - Vr}$$

V_i représente la tension incidente tandis que V_r représente la tension réfléchie.

$$ROS = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{Z_{charge}}{Z_{source}} = \frac{Z_{source}}{Z_{charge}}$$

C'est l'application mathématique de ce que nous venons de voir. Comme le ROS est toujours supérieur ou égal à 1, on utilisera la formule qui met l'impédance la plus élevée au numérateur.

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Le coefficient de réflexion ρ ou k vaut :

ρ = k = V réfléchie/V incidente

C'est toujours une valeur complexe

On notera que, connaissant le ROS on pourra en tirer le coefficient de réflexion :

$$ROS=(1+ \rho)/(1- \rho)$$

Ce qui nous amène tout naturellement à déterminer le ROS partant du coefficient de réflexion par :

$$\rho = k = (ROS-1)/(ROS+1)$$

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Calcul du TOS taux d'ondes stationnaires.

On parlait autrefois de taux d'ondes stationnaires. Cette unité qui désigne toujours la même chose, à savoir la réflexion n'est plus guère utilisée sauf à contre sens (dire qu'on a un TOS de 3 n'a pas de sens).

Le TOS est le rapport de la tension réfléchie / la tension incidente x 100. C'est un nombre sans unité.

$$TOS\ \% = «100\ V_r/V_i = «100\ V_r/V_d$$

Aussi, le TOS se calcule par la formule suivante :

$$TOS\ \% = 100\ P_r / P_i = 100\ P_r / P_d$$

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Calcul du perte de retour ou return loss :

On peut exprimer d'une autre manière l'adaptation d'un système vis à vis d'un autre par une mesure appelée "return loss«ou perte de retour.

Le RL exprimé en dB représente le rapport de la puissance incidente sur la puissance réfléchie, c.à.d. la puissance non consommée par la charge du fait de la désadaptation.

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Plus RL sera important, meilleure sera l'adaptation. Réciproquement, plus le RL sera faible, plus mauvaise sera«l'adaptation puisque la réflexion croît.

$$RL = 10\log\left(\frac{Pi}{Pr}\right) = 20\log\left(\frac{Ei}{Er}\right) = 20\log\left(\frac{ROS+1}{ROS-1}\right) = 20\log\left(\frac{1}{\rho}\right)$$

Partant du RL, il nous sera facile (ou presque) de calculer le ROS avec la formule ci-contre.

$$ROS = \frac{10^{\frac{RL(dB)}{20}} + 1}{10^{\frac{RL(dB)}{20}} - 1}$$

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Calcul des pertes de désadaptation ou Mismatch Loss :

Elles ont loin d'être aussi importante que ce que l'on pense habituellement.

la perte de désadaptation (ML : Mismatch Loss) indique de combien est atténuée la puissance incidente par la désadaptation. Cette valeur est affichée en dB, comme toujours.

$$ML(dB) = 10\,log_{10}(1-\rho^2)$$

$$ML(dB) = 10log_{10}\left[1-\left(\frac{ROS-1}{ROS+1}\right)^2\right]$$

Feuille calcul

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Exemple : On mesure **à l'émetteur,** la puissance directe est de **11,31 W** et la puissance réfléchie est de **0,45 W.**

ROS = ?, Conclure ?

Le calcul nous donne un TOS de 3,97% et un **ROS de 1,5** (ce qui est un peu limite...)

➔ Si l'émetteur et l'antenne sont **proches** avec un câble coaxial très court et donc presque **sans perte**, on considèrera que l'installation est acceptable.

ROS =	1,50	
TOS =	3,98	%
k =	0,20	
Return Loss (dB) =	14,00	
Mismatch Loss =	-0,18	

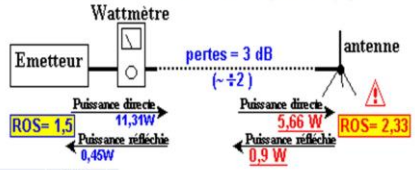
Maintenant, imaginons que l'antenne est connectée sur l'émetteur avec un câble coaxial de **50 mètres** de longueur qui nous provoque **3dB de pertes**

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Donner alors la mesure du ROS sur l'antenne ?

Puissance directe (= **5,66 W)** / Puissance réfléchie (= **0,9 W)**

➔ Un TOS de 16% et un **ROS de 2,33** (ce qui trop élevé : l'antenne ne fonctionne pas correctement) et pourtant, tout semble correct au niveau de l'émetteur (ROS = 1,5)...



ROS =	2,33	
TOS =	15,90	%
k =	0,40	
Return Loss (dB) =	7,99	
Mismatch Loss =	-0,75	

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

Explications :

Dans cet exemple, les pertes du câble sont de 3 dB, ce qui divise la puissance par 2. L'émetteur envoie 11,31 W. Il ne reste donc plus que la moitié à l'antenne, soit environ 5,66 W.

L'antenne réfléchit 0,9 W (le ROS est de 2,33). Cette réflexion subit aussi les pertes du câble, la mesure à l'émetteur correspond donc à la moitié, c'est à dire 0,45 W (ROS est alors de 1,5).

Pour s'affranchir des problèmes, la meilleure solution est donc de réaliser une mesure directement sur l'antenne.

ROS, TOS, coefficient de réflexion...

La mesure du ROS à l'émetteur permet de s'assurer que ce dernier est correctement chargé, ce qui peut éviter sa destruction.

La mesure du ROS à l'antenne permet de s'assurer qu'elle est correctement adaptée à la fréquence utilisée.

Attention, un ROS proche de 1, n'indique pas que l'antenne rayonne correctement. Cela prouve uniquement que l'antenne est correctement adaptée à la bonne impédance.

Exemple : une **charge de 50 Ohms** (antenne fictive) possède un ROS très proche de 1 mais ne rayonne pas !.