Comment ça marche ?

Les lignes HF

6 - Rapport d'Ondes Stationnaires

Par le radio-club F6KRK

Nous avons vu dans les précédents "comment ça marche" les potentiels, les courants et leurs relations avec le champ électromagnétique, pour aboutir aux notions de constantes linéiques. Puis nous avons abordé les ondes. Nous allons continuer avec le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS).

ROS, définition.

Nous avons vu qu'une ligne de longueur infinie présentait à la source son impédance caractéristique **Zc** et qu'elle était parcourue par une onde progressive, ce qui veut dire qu'en tout point de la ligne, **U** et **I** étaient constants ($\mathbf{Z_C = U / I}$). Si la ligne n'est pas infinie, mais qu'elle est chargée par son impédance caractéristique ($\mathbf{Z_L=Z_C}$), elle se comporte comme si elle était infinie. Si la ligne est chargée par une impédance $\mathbf{Z_L}$ différente de $\mathbf{Z_C}$, la tension et l'intensité ne sont plus constantes le long de la ligne et présentent des ondulations. Celles-ci peuvent être calculées à partir des équations de propagation.
Soit une ligne **sans pertes** d'impédance $\mathbf{Z_C}$ avec une longueur supérieure à $\boldsymbol{\lambda/2}$.
Soient **V+** et **V−** les tensions maxima et minima le long de la ligne
Soient **I+** et **I−** les courants maxima et minima le long de la ligne
Nous avons :

$$\boxed{\mathbf{ROS} = \frac{\mathbf{U+}}{\mathbf{U-}} = \frac{\mathbf{I+}}{\mathbf{I-}}}$$

Important : Le ROS est une constante tout le long d'une ligne sans pertes.

ROS, comportement.

L'endroit de la ligne où U est maximum est appelé "ventre de tension" et l'endroit où U est minimum, "nœud de tension". Nous avons les mêmes qualificatifs pour le courant.
Toutes les relations que nous allons voir sont obtenues à partir des équations de propagation que l'on simplifie en prenant des conditions particulières.
Supposons que la désadaptation à l'origine du ROS soit due à une résistance pure $\mathbf{Z_L > Z_C}$ (U et I en phase), alors la charge se trouve à un ventre de tension et si $\mathbf{Z_L < Z_C}$, elle se trouve à un ventre de courant. Les calculs montrent qu'en se déplaçant de $\lambda/4$ vers la source, les ventres sont remplacés par des nœuds et inversement. Par ailleurs, à un ventre de tension correspond un nœud de courant, et vice-versa. Aux nœuds et aux ventres, la tension et le courant sont en phase, ce qui n'est plus le cas aux autres endroits. Si l'impédance de la charge est réactive, l'effet est de déplacer les endroits des nœuds et des ventres. Nous y reviendrons.
Voir sur la figure 1 un exemple avec un ROS de 3 ($Z_L > Z_C$).

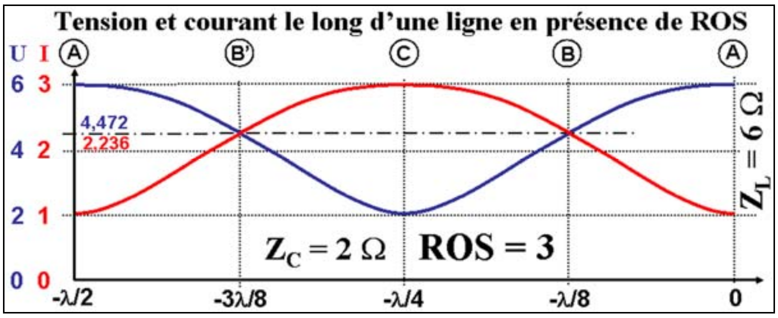

Figure 1 : **Tension et courant dans une ligne en présence d'un RO**S 3

Nous constatons (ligne sans pertes) :

- **ROS =** $\mathbf{U^+ / U^- = I^+ / I^- = 3}$
- Pour $L = -n\lambda/2$, $\mathbf{Z = Z_L}$ (points "A")
- Pour $L = -(2n+1)\lambda/4$, $\mathbf{Z = Z_L / ROS^2}$ (points "C")

En tous ces points, la puissance apparente (**U×I**) est égale à la puissance transmise dans la charge, soit 6W, ce qui n'est pas le cas pour les autres endroits. Aux points médians (B), l'écart entre la puissance apparente et la puissance transmise est maximum. Ici, $P_{(B)} = 4{,}472 \times 2{,}236 = 10$VA. Sachant que la puissance transmise en watts est égale à $P_{(VA)} \times \cos(\varphi)$, nous avons un déphasage entre U et I égal à Arc cos(10/6) = 53°, à partager pour moitié entre une avance de phase de I et un retard de phase de U (point B) et l'inverse pour le point B' **(1)**.

Mesure du ROS en un point

Pour avoir accès aux valeurs U^+ et U^- (ou I^+ et I^-), et compte tenu du déphasage possible dans une charge réactive, il nous faut au moins une longueur de ligne de λ/2. Encore faut-il avoir accès aux mesures (ligne bifilaire), et si elle a des pertes, on n'aura qu'un ROS moyen. La connaissance du ROS est souvent nécessaire au bout de la ligne qui est connecté à l'émetteur. En cet endroit, la mesure est aisée si on peut la faire en un seul point. Il se trouve que c'est possible.

Examinons le point **A** de la figure 1. Nous avons V^+, il nous manque V^-. Or il se trouve que $\mathbf{V^- = I^- \times Z_C}$, ce qui se démontre facilement. En **A**, c'est une tension virtuelle, mais qui permet d'avoir une mesure du ROS représentative de la désadaptation en ce point. Alors, **ROS =** $\mathbf{V^+ / (I^- \times Z_C)}$. Par ailleurs, $\mathbf{V^+ = I^+ \times Z_C}$, et pour le point **C**, nous avons : **ROS =** $\mathbf{(I^+ \times Z_C) / V^-}$.

Pour les points intermédiaires, les complications surgissent car nous avons, non plus une, mais deux valeurs à reconstituer avec un déphasage entre U et I entraînant des multiplications et des divisions trigonométriques. Mais les mathématiciens ont plus d'un tour dans leur sac, et les calculs se simplifient beaucoup en passant par des variables intermédiaires. On obtient :

$$2\overrightarrow{Vi} = \overrightarrow{U} + (\vec{i} \times Z_C)$$

$$2\overrightarrow{Vr} = \overrightarrow{U} - (\vec{i} \times Z_C)$$

$$\text{ROS} = \frac{|Vi| + |Vr|}{|Vi| - |Vr|}$$

Vi est appelée "tension de l'onde incidente" et **Vr** "tension de l'onde réfléchie". Ce sont en fait les deux ondes antagonistes utilisées pour simplifier l'étude de la propagation d'une onde complexe dans une ligne (voir le précédent "Comment ça marche"). Les modules de ces tensions fictives sont constants le long de la ligne, quel que soit le ROS.

En électronique, l'addition vectorielle de deux tensions est facile à faire car elle ne nécessite que deux résistances. Pour l'addition de leurs modules, il faut d'abord obtenir leurs valeurs efficaces par redressement. Nous avons sur la figure 2 une méthode pour réaliser les opérations vectorielles dans un ROS-mètre HF.

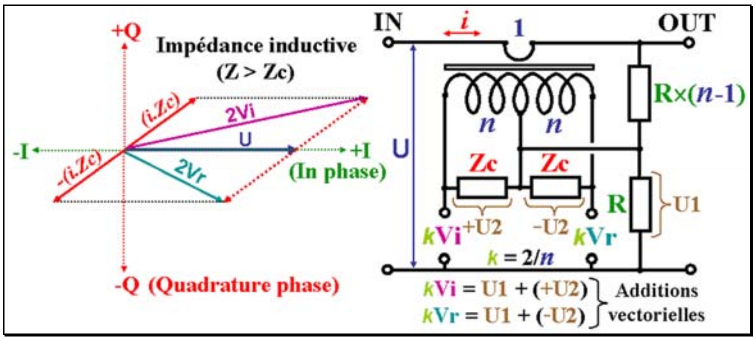

Figure 2. "**Principe du ROS-mètre**"

Noter que grâce au transformateur, les tensions U2 sont flottantes, ce qui permet de les additionner vectoriellement à la tension U1 en les mettant en série. On peut remplacer le transformateur et le diviseur résistif par une ligne couplée qui combine les deux fonctions (le diviseur est alors capacitif).
A partir de *k*Vi et de *k*Vr, on obtient leurs modules par redressement. Ensuite, pas de problème pour les additions, et la division est faite, soit manuellement à l'aide d'un potentiomètre double avec graduation spéciale de l'échelle de lecture, soit par calcul analogique ou numérique. Ces méthodes ont été décrites plusieurs fois dans Radio-REF et nous ne n'y attarderons pas.

Puissance transmise

La puissance transmise en **W**atts (constante le long d'une ligne sans pertes) est égale à $(\mathbf{Vi^2 - Vr^2}) / \mathbf{Z_C}$. Par suite, on appelle couramment $\mathbf{Vi^2/Z_C}$ "puissance directe" et $\mathbf{Vr^2/Z_C}$ "Puissance réfléchie". On a même fabriqué des "Wattmètres directifs" gradués en puissance directe et en puissance réfléchie. Naturellement, ce sont des puissances fictives puisque Vi et Vr sont des tensions fictives (2). Seule leur différence correspond à une puissance réelle. En tout point de la ligne, cette puissance réelle est égale à **U×I×cos(φ)** (tension, courant et leur déphasage au point de mesure). La différence entre la puissance apparente (**U×I**, en **V.A.**) et la puissance réelle en **W**atts (celle qui est transmise) correspond à de l'énergie réactive stockée dans la ligne (puissance réactive exprimée en **V.A.R.** et égale à **U×I×sin(φ)**). Celle-ci n'est pas transmise (donc stationnaire) car elle s'annule tous les quarts d'ondes (points A et C de la figure 1).

Dans le prochain "Comment ça marche", nous verrons (enfin) l'effet des pertes dans une ligne.

La Rubrique "Comment ça marche" est une activité collective du radio-club F6KRK (http://www.f6krk.org). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@orange.fr".

Bibliographie.

[1] "Fonctionnement du ROS-mètre HF", Radio-REF, mars 2003
[2] "ROS-mètre HF, thème et variations", Radio-REF, décembre 2003

Ces articles ainsi que les précédents "Comment ça marche ?" sont également consultables et téléchargeables sur le site de F6KRK : "www.blog.f6krk.org", catégories "Articles membres" puis "F5NB"et "Lignes et ROS-mètre", ou "Bulletins et Gazettes" et "Comment ça marche ?".
[3] "http://f6fqx.chez-alice.fr/articlesF6FQX/article%20054/Lignes_HF_aspects_maths.pdf".

Notes :

1) *La réactance est donc capacitive pour le premier quart d'onde et inductive pour le second, et ainsi de suite. Nous y reviendrons.*
2) *Soient Vi et -Vr les tensions des ondes A et B et U la tension de l'onde réelle C. Nous avons : C = A +(-B) (addition vectorielle) et U = Vi-Vr (modules). Alors la puissance transmise est égale à* U^2/Z_C *(U est constant le long de la ligne), soit encore* $P_T = (Vi-Vr)^2 / Z_C$*. Or, on a tous appris au collège que* $(a-b)^2$ *était égal à* $\{a^2-2ab+b^2\}$*, et en aucun cas à* $\{a^2-b^2\}$*, qui correspond au produit (a+b) par (a-b). Donc non seulement la puissance directe et la puissance réfléchie n'ont pas de sens physique, mais pas de sens mathématique non plus. Un calcul complet de la puissance aboutit à une puissance active transmise (constante) et à une puissance réactive stationnaire (variable)* [3]*.*