

# Comment ça marche ?

## Les lignes HF

### 10 - Impédance (2) : l'abaque de Smith

Par le radio-club F6KRK

*Après avoir vu les équations de propagation dans une ligne et l'expression de l'impédance, nous allons maintenant étudier les relations "complexes" qui les lient avec la charge et qui sont cachées dans l'abaque de Smith.*

#### Ligne transformateur d'impédance

A partir des équations de propagation, nous avons obtenu dans le précédent "Comment ça marche" <sup>[1]</sup> la relation suivante qui permet de calculer l'impédance d'entrée  $Z_L$  d'une ligne (sans pertes) de longueur  $L$  en fonction de son impédance caractéristique  $Z_C$  et de l'impédance de charge  $Z$ , ( $\alpha = 2\pi/\lambda$ ) :

$$Z_L = Z_C \frac{Z + jZ_C \operatorname{tg} \alpha L}{Z_C + jZ \operatorname{tg} \alpha L}$$

$Z_L$  est une impédance complexe ( $Z_L = R_L \pm jX_L$ ). La partie réactive s'annule pour  $L = n\lambda/4$ . Par ailleurs, si  $L = n\lambda/2$ , l'impédance d'entrée  $Z_L$  recopie l'impédance de charge  $Z$ , et si  $L = \{2n+1\}\lambda/4$ , alors  $Z_L = Z_C^2 / Z$ . Par ailleurs, si  $Z = Z_C$  (ROS 1)  $Z_L$  est constamment égal à  $Z_C$  tout le long de la ligne.

Nous avons sur la figure 1 l'exemple suivant :  $Z_C = 1\Omega$ ,  $L = \lambda/2$ ,  $U_0 = 1V$ ,  $i_0 = 3A$  et  $Z = 0,333\Omega + j0$ . Dans ce cas, le ROS est égal à 3.

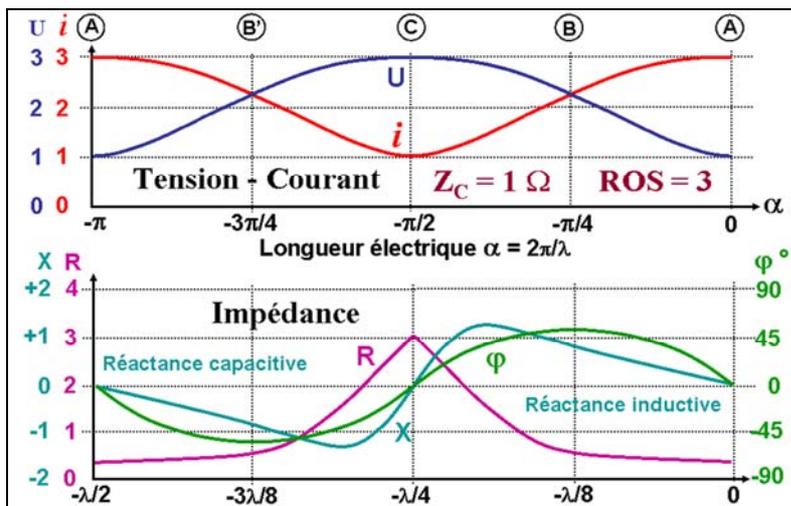


Figure 1 : Tension, courant et impédance complexe pour ROS 3

Noter que les courbes se reproduisent toutes les demi ondes si la ligne n'a pas de pertes et qu'elles seraient plates pour  $ROS = 1$  ( $Z=Z_C$ ).

## Abaque de Smith

Cet abaque génial est un diagramme polaire qui rassemble les particularités suivantes :

- Le cercle représente une longueur électrique de  $\lambda/2$ , soit un angle  $\alpha$  de  $\pi$  radians ( $180^\circ$ ).
- Les valeurs de l'impédance sont normalisées par rapport à l'impédance caractéristique de la ligne (" $1$ " =  $Z_C$ ).
- L'axe horizontal (diamètre du cercle  $\alpha$ ) correspond à  $X=0$ , c'est-à-dire que la charge est résistive pure ( $Z = R$ ). L'échelle est graduée en ROS en partant du centre du cercle avec une progression géométrique de raison 0,5 de telle manière que le cercle extérieur ( $\alpha$ ) corresponde à un ROS infini.
- Pour tous les cercles de ROS possibles et pour tous les angles  $\alpha$  possibles, on calcule la partie réelle **R** et la partie imaginaire **X** de l'impédance à partir de la formule ci-dessus.
- Ensuite on relie ensemble tous les points de mêmes **R** puis tous ceux de mêmes **X**.
- Les **R** constants forment des cercles communs au point  $Z = R = \infty$ .
- Les **X** constants forment des arcs de cercles divergents depuis l'axe des réels avec un point commun au point  $Z = R = \infty$ .

Nous obtenons l'abaque de la figure 2.

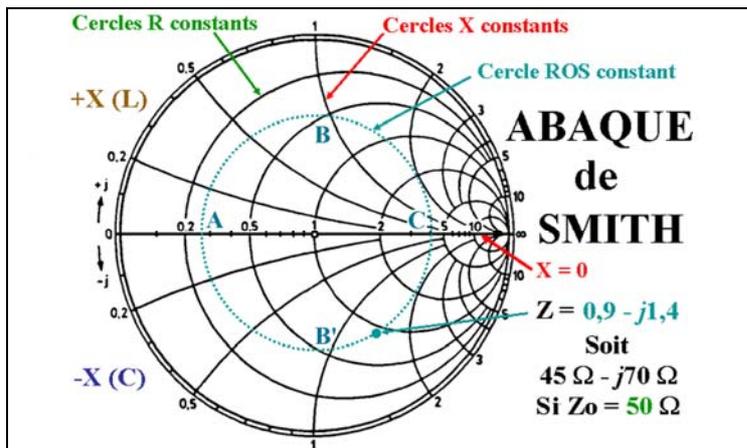


Figure 2 : L'abaque de smith avec exemple de report d'une impédance

N-B : Pour les lignes, l'abaque ci-dessus comporte en plus sur le cercle extérieur des graduations correspondant à  $\alpha$ , en degrés et en lambda.

Par convention, on tourne dans le sens des aiguilles d'une montre quand on "remonte" la ligne de la charge vers l'émetteur. Alors, la moitié supérieure correspond à une réactance inductive et la moitié inférieure à une réactance capacitive <sup>(1)</sup>.

## Utilisations de l'abaque de Smith

Elles sont innombrables et nécessiteraient plusieurs ouvrages pour leurs descriptions. Ici nous nous servons de l'abaque de Smith pour comprendre le rôle de transformateur d'impédance d'une ligne. Mais avant, explicitons quelques notions liées à cet abaque.

### Impédance nominale $Z_0$ .

C'est l'impédance résistive pure pour laquelle on cherche à obtenir un facteur de désadaptation. Cela peut être l'impédance nominale de charge d'un émetteur (cas le plus souvent rencontré par les radioamateurs). Si c'est l'impédance caractéristique d'une ligne, alors le facteur de désadaptation correspond à un ROS virtuel en ce point. Le ROS n'est "vrai" que pour une ligne suffisamment longue et sans pertes <sup>(2)</sup>.

### **Normalisation et dénormalisation**

Les valeurs de l'impédance sur l'abaque de Smith sont normalisées, c'est-à-dire que l'unité  $\Omega$  correspond à  $Z_0$ . Donc pour y reporter une impédance quelconque il faut d'abord la normaliser en la divisant par  $Z_0$ . Et inversement, pour récupérer une impédance, il faut la dénormaliser en la multipliant par  $Z_0$  (exemple sur la fig. 2).

### **Cercle de ROS constant.**

Nous avons vu que la définition du ROS impliquait une longueur de ligne minimum et que la mesure du ROS en un point n'était en fait qu'une mesure de facteur de désadaptation. On peut alors étendre la notion de ROS à toute désadaptation par rapport à une impédance nominale  $Z_0$ . Pour une ligne, nous avons  $Z_0 = Z_C$ . Le cercle de ROS constant réunit toutes les impédances complexes qui entraînent le même ROS. Le centre commun à tous ces cercles correspond au ROS unité, et à  $Z = Z_0$ . Tous les autres cercles coupent l'axe des réels en deux points de valeurs  $R = Z_0 / \text{ROS}$  et  $R = Z_0 \times \text{ROS}$ . En conséquence, pour connaître le ROS équivalent amené par une impédance quelconque  $Z$ , il suffit, après normalisation, de faire passer par le point  $Z$  le cercle de ROS constant puis de lire la valeur normalisée de  $R$  sur l'axe des réels, côté  $R > 1$ .

### **Courbe d'impédance**

C'est une courbe obtenue par interpolation entre des points correspondant à des impédances mesurées (ou calculées) en faisant varier la fréquence <sup>(3)</sup>.

### **Résonance et antirésonance**

Il y a résonance ou antirésonance quand la courbe d'impédance coupe l'axe des réels. Si elle la coupe avec un extremum dirigé vers  $R$  nul, il s'agit d'une résonance (comportement du circuit oscillant série) et si l'extremum est dirigé vers  $R$  infini, il s'agit d'une antirésonance (comportement du circuit oscillant parallèle). Ainsi, si une ligne est le siège d'ondes stationnaires, son impédance d'entrée en fonction de sa longueur est équivalente alternativement (tous les quarts d'ondes) à celles de circuits oscillants séries et parallèles. Le  $Q$  équivalent (sélectivité pour ces endroits de la ligne) est d'autant plus élevé que le ROS est important. Voir une illustration sur la figure 3.

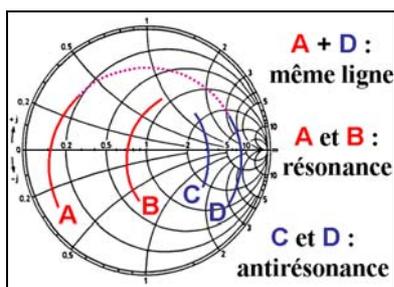


Figure 3 : Résonances (courbes rouges) et antirésonances (courbes bleues)

## Effet des pertes dans une ligne

Pour une ligne sans pertes, l'impédance en fonction de la longueur suit la courbe de ROS constant. Or nous avons déjà vu qu'avec une ligne à pertes, le ROS ramené à la source diminuait en fonction de sa longueur <sup>[1]</sup>. En conséquence, la courbe circulaire de l'impédance ramenée se transforme en une spirale convergeant vers le centre ( $Z_0$ ) d'autant plus vite que les pertes sont importantes <sup>(4)</sup>. Ici la longueur de la courbe représente la longueur de la ligne pour  $F$  constant. Si la courbe représente la fréquence pour une longueur de ligne constante, du fait que les pertes augmentent d'un facteur compris entre racine de  $F$  et  $F$ , la courbe d'impédance se transforme également en une spirale convergeant vers  $Z_0$ , qu'elle approche pour la fréquence la plus élevée. Voir une illustration sur la figure 4.

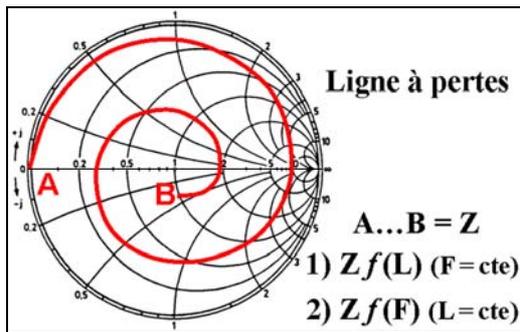


Figure 4 : Impédance d'une ligne à pertes, soit en fonction de la fréquence ( $B > A$ ), soit en fonction de sa longueur ( $B > A$ )

Dans le prochain "Comment ça marche" nous verrons des cas concrets de transformations d'impédances.

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] Revoir dans Radio-REF les précédents "Comment ça marche ?". Ils sont également consultables et téléchargeables sur le site de F6KRK : "[www.blog.f6krk.org](http://www.blog.f6krk.org)", catégories "Bulletins et Gazettes" puis "Comment ça marche ?".

## Notes :

- 1) Une ligne présente une réactance alternative tous les quarts d'ondes. Une ligne ouverte commence par une réactance capacitive et une ligne court-circuitée par une réactance inductive, comme nous pouvons le voir sur l'abaque.
- 2) Revoir les "Comment ça marche" 6 et 7 sur les lignes <sup>[1]</sup>.
- 3) Un  $\Delta L$  correspond à un  $\Delta F$ . Mais si la courbe est compliquée, la lecture de  $F$  n'est pas évidente et on annote la valeur de  $F$  pour certains points.
- 4) C'est pourquoi une longue ligne à pertes semble toujours adaptée du côté source (émetteur), quelle que soit la charge.