

Comment ça marche ?

Les lignes HF

11 - Impédances (3)

Par le radio-club F6KRRK

Après avoir vu les impédances le long d'une ligne et les relations "complexes" qui les relient avec la charge, nous allons examiner les effets de certaines combinaisons ligne / composants L-C en nous aidant de l'abaque de Smith.

La figure 1, qui est une synthèse des figures 1 et 2 du précédent "Comment ça marche", va faciliter la poursuite de notre analyse.

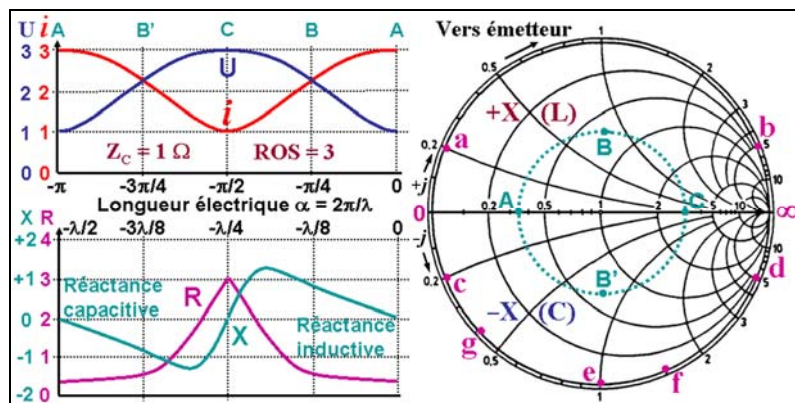


Figure 1 : Impédance le long d'une ligne avec ROS et son report sur l'abaque de Smith

Modèle comportemental d'une ligne

A partir de la figure 1, nous obtenons le modèle comportemental de la figure 2.

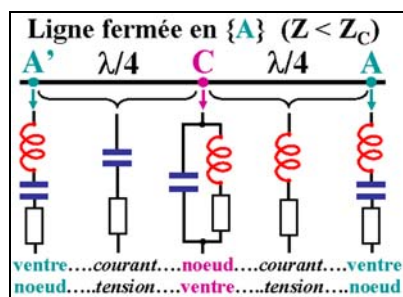


Figure 2 : Modèle comportemental d'une ligne

N-B : L et C sur ce modèle sont des composants virtuels utilisés pour montrer le comportement réactif en un point de la ligne si l'on fait varier la fréquence. Les valeurs réelles de L et C augmentent continûment avec la longueur (égales aux constantes linéiques multipliées par la longueur).

Ligne quart d'onde

Sa longueur ($\alpha L=90^\circ$) correspond à un demi cercle de l'abaque de Smith.

Si la ligne est ouverte à son extrémité, l'impédance ramenée est théoriquement nulle et en réalité égale à une résistance équivalente de pertes \mathbf{R} . Par ailleurs, nous avons vu que le comportement réactif était celui d'un circuit série (cf. fig. 2) et son coefficient de surtension est proportionnel à Z_0 / R , donc au ROS.

Si la ligne est fermée à son extrémité (en c/c), l'impédance ramenée est théoriquement infinie et en réalité égale à une résistance équivalente de pertes \mathbf{R}' . Par ailleurs, nous avons vu que le comportement réactif était celui d'un circuit parallèle (cf. fig. 2) et son coefficient de surtension est proportionnel à R' / Z_0 , donc au ROS.

Si la ligne est fermée sur une impédance quelconque \mathbf{Z} , l'impédance ramenée à une distance de $\lambda/4$ est l'impédance \mathbf{Z}' conjuguée de \mathbf{Z} , selon la formule : $\mathbf{Z}' = \mathbf{Z}_0^2 / \mathbf{Z}$ ⁽¹⁾. Si \mathbf{Z} est capacitif, \mathbf{Z}' est inductif, et inversement. La ligne qui relie \mathbf{Z} à \mathbf{Z}' est un diamètre du cercle de ROS constant passant par \mathbf{Z} et \mathbf{Z}' .

Ligne ouverte + bobine en série

Considérons une ligne ouverte de longueur $\{\infty\dots\mathbf{c}\}$ (cf. fig.1). Elle est plus petite que le quart d'onde. Prenons une bobine avec une self-induction \mathbf{L} telle que $X_L = 0,2 Z_0$. Elle a une longueur $\{\mathbf{0}\dots\mathbf{a}\}$ ⁽²⁾. Mettons la bobine en série avec la ligne au point \mathbf{c} . On obtient une ligne de longueur électrique $\{\infty\dots\mathbf{c}\} + \{\mathbf{0}\dots\mathbf{a}\} = \{\infty\dots\mathbf{0}\}$, soit exactement le quart d'onde ⁽³⁾. Mais attention, il s'agit d'une longueur électrique, pas physique. Il faudra s'en souvenir si la ligne est une antenne filaire ouverte. Electriquement, la réactance de $+0,2.Z_0$ de la bobine a compensé la réactance de $-0,2.Z_0$ que présentait la ligne et l'ensemble est à la résonance au point " $\mathbf{0}$ " où est connectée la source, mais seulement à la fréquence pour laquelle les réactances sont conjuguées.

Coupons maintenant notre ligne en deux longueurs, $\{\infty\dots\mathbf{f}\} + \{\mathbf{e}\dots\mathbf{0}\}$. Alors le segment $\{\mathbf{e}\dots\mathbf{f}\}$ correspond à une réactance de $-0,5.Z_0$. Donc si on insère une bobine à cet endroit, elle aura une self-induction 2,5 fois plus élevée qu'à l'extrémité fermée de la ligne. On voit ainsi que la valeur de la bobine tend vers l'infini quand on se rapproche de l'extrémité ouverte de la ligne (cf. Fig. 1).

En résumé : L'insertion d'une bobine en série avec une ligne a pour effet d'**allonger électriquement** la longueur de la ligne. Mais cet effet dépend de l'emplacement de la bobine. Il est d'autant plus faible que l'on se rapproche d'un **nœud** de courant.

Ligne ouverte + condensateur en série

Reprenons notre ligne ouverte de longueur $\{\infty\dots\mathbf{c}\}$. Prenons un condensateur avec une capacité \mathbf{C} telle que $X_C = -0,2 Z_0$. Il a une longueur $\{\mathbf{0}\dots\mathbf{c}\}$. Mettons le condensateur en série avec la ligne au point \mathbf{c} . On obtient une ligne de longueur électrique $\{\infty\dots\mathbf{c}\} - \{\mathbf{0}\dots\mathbf{c}\} = \{\infty\dots\mathbf{g}\}$, plus petite que la ligne physique $\{\infty\dots\mathbf{c}\}$. Si nous avions eu une ligne de longueur $\{\infty\dots\mathbf{a}\}$ la mise en série du condensateur aurait eu pour effet d'obtenir la résonance au point " $\mathbf{0}$ " ($\{\infty\dots\mathbf{a}\} - \{\mathbf{0}\dots\mathbf{c}\} = \{\infty\dots\mathbf{0}\}$).

Comme pour une bobine, la réactance à compenser tend vers l'infini quand on se rapproche du nœud de courant. Donc la valeur du condensateur tend vers zéro.

En résumé : L'insertion d'un condensateur en série avec une ligne a pour effet de **diminuer électriquement** la longueur de la ligne. Mais cet effet dépend de l'emplacement du condensateur. Il est d'autant plus faible que l'on se rapproche d'un **ventre** de courant.

Exemples pratiques

Nous en avons trois sur la figure 3 (monopôles perpendiculaires à un plan de sol parfait).

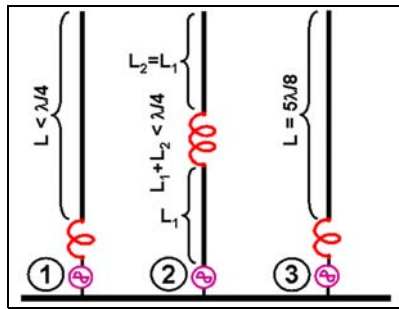


Figure 3 : Trois méthodes d'allongement électrique d'une ligne ouverte

En (1) nous avons un fouet vertical avec self à la base. En (2), nous avons un fouet avec self au centre et en (3) nous avons un fouet $5\lambda/8$ avec self à la base. Les trois systèmes sont à la résonance. Mais s'ils présentent une résistance pure à la source, elle n'est pas la même pour les trois ⁽⁴⁾ [1] [2].

A suivre dans le prochain "Comment ça marche" avec les combinaisons de composants L-C en parallèle.

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 le "Comment ça marche ?" sur la hauteur effective.

[2] "L'antenne HF très courte en émission", Radio-REF Juin 2005

Cet article 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 "Antennes", ou "Bulletins et Gazettes" puis "Comment ça marche ?".

Notes :

- 1) Exemple (ligne sans pertes) : soit $Z_0=1$ et $Z=1+j1 = 1,414$, $45^\circ(M, \varphi)$. Alors $Z' = 1^2 / 1,414 = 0,707$, $-45^\circ = 0,5-j0,5$ (et inversement). Rappel : $\varphi = \arctan(X/R)$, $R=M.\cos(\varphi)$ et $X=M.\sin(\varphi)$.
- 2) Une inductance L en Henrys est une longueur divisée par le temps, introduit ici par la longueur d'onde.
- 3) On remarquera sur l'abaque de la fig. 1 que les accroissements de réactance pour L et C se font en sens inverse. Il faut donc une bobine en série pour allonger une ligne.
- 4) Soit un fouet $L=5m$ à $F=7,5$ MHz et un Q de 200 pour les bobines. Avec une self à la base, $Z=9,8\Omega$, $R_R=6,8\Omega$, et $R_B=3\Omega$, soit un rendement de 69%. Avec une self au centre, $Z=17,4\Omega$, $R_R=12,7\Omega$, et $R_B=4,7\Omega$, soit un rendement de 73%. La différence de rendement augmente quand la longueur du fouet diminue. Avec la $5/8^{\text{ème}}$ à la même fréquence ($L=25m$), $Z=115\Omega$, $R_R=90\Omega$, et $R_B=25\Omega$, soit un rendement de 78%.