

Lignes en HF, quelques idées reçues

Jean-Pierre, F6FQX et Robert, F5NB.

F5NB : *Cherchant dans mes brouillons d'articles matière à parution, j'ai retrouvé une correspondance avec F6FQX que nous avions eue à propos de l'un de mes articles sur la non matérialité de la puissance réfléchié dans une ligne HF. Je me suis dit que son message ferait un excellent article et je l'ai transcrit sous une forme publiable avec l'accord de Jean-Pierre.*

F6FQX : Les lignes ont été étudiées en détail depuis une centaine d'années : la problématique était celle du transport d'un signal HF dans les meilleures conditions possibles (en minimisant pertes et distorsion) entre un générateur (émetteur en émission, antenne en réception) et une charge (antenne en émission, récepteur en réception).

Pour les professionnels, la résolution théorique du problème a été rendue possible en utilisant les bons outils (équations de Maxwell, analyse vectorielle complexe). Malheureusement, ces outils théoriques sont souvent peu familiers aux radioamateurs qui, malgré eux, se font souvent des idées fausses. Idées fausses, qu'on trouve pourtant exprimées dans la littérature OM la plus sérieuse (je pense à QST, aux Handbooks de l'ARRL, aux notices d'appareils)⁽¹⁾.

Nous allons citer quelques-unes de ces idées reçues.

1 – Une ligne HF est constituée de 2 conducteurs en regard (âme et gaine d'un coaxial, fils d'une échelle à grenouilles), les intensités en regard sont égales et opposées, donc l'un des conducteurs sert à propager les ondes et l'énergie du générateur vers la charge et l'autre sert de retour.

C'est faux. La propagation des ondes et de l'énergie ne se fait pas dans les conducteurs mais dans le diélectrique entre eux (et autour d'eux dans le cas de l'échelle à grenouille). L'énergie ne va que du générateur vers la charge (on y reviendra plus loin) et l'intensité dans les conducteurs se propage sous forme d'onde dans le même sens, pour les deux fils (le signe de I_n n'a rien à voir avec son sens de propagation).

2 – Le ROS dans une ligne dépend de 3 facteurs : l'impédance caractéristique de la ligne, l'impédance d'entrée de la charge, l'impédance de sortie du générateur.

C'est faux en ce qui concerne le générateur. Prenez un émetteur dont la notice vous dit que son impédance de sortie est 50Ω , raccordez y un coaxial de 100Ω , lui-même raccordé à une antenne de 100Ω . Le ROS dans la ligne sera de 1, et pas de 1,5. Le ROS ne dépend que de deux facteurs : l'impédance d'entrée de la charge et l'impédance caractéristique de la ligne. Alors, pourquoi vouloir adapter émetteur et ligne ? Simplement parce qu'un émetteur est conçu pour travailler dans certaines conditions et que s'en éloigner peut amener des déconvenues : si le moteur de votre voiture est conçu pour tourner à 3000 tours/mn et que vous le faites tourner à 9000, il peut arriver des choses...

3 – Dans une ligne où le ROS est différent de 1, il y a de la puissance directe circulant dans un sens et de la puissance réfléchié circulant dans l'autre sens. La preuve : c'est que certains ROS-mètres (à aiguilles croisées par exemple) portent explicitement les indications « direct power » et « reflected power ».

C'est faux. L'énergie (qui est de la puissance intégrée sur une durée) ne circule que dans un sens, du générateur vers la charge. C'est par abus de langage que l'on parle de « direct power » et de « reflected power » car, en fait, on mesure des tensions et non des puissances : d'une part la tension de l'onde directe, et d'autre part celle de l'onde réfléchie que l'on reconstitue d'ailleurs à partir de la tension et de l'intensité de l'onde résultante puisqu'on ne sait pas séparer les deux ondes (si on savait le faire, on saurait produire de l'énergie à partir de rien, car avec 300 watts de *direct power* et 200 de *reflected power* qu'on séparerait avant de les ajouter dans le bon sens, on obtiendrait 500 watts là où l'on n'en avait que 100 au départ...). L'erreur commise a deux origines : l'une est liée au langage (puissance est un mot souvent employé pour désigner n'importe quoi, y compris des tensions « le réseau 220 volts est plus puissant que le réseau 110 volts... », l'autre est mathématique : champs, tensions et intensités s'ajoutent mais les puissances, qui sont elles du second degré, ne s'ajoutent pas quand on ajoute les champs, les tensions ou les courants. On y reviendra plus loin.

4 – Pour comprendre ce qui se passe dans une ligne, il suffit d'imaginer un signal partant du générateur, se propageant jusqu'à la charge sur laquelle il se réfléchit, puis revenant dans l'autre sens jusqu'au générateur, sur le quel il se réfléchit de nouveau, puis repartant vers la charge, et ainsi de suite.

C'est faux, pour plusieurs raisons : La première est que les seuls outils utilisables pour analyser un phénomène électromagnétique compliqué comme celui de la propagation sont les équations de Maxwell. Or, elles ne sont opérationnelles (« intégrables » comme on disait dans les écoles d'ingénieurs il y a 50 ans) que pour des régimes permanents et sinusoïdaux. Ce n'est pas le cas quand on envoie un signal sur une ligne et qu'on le fait « rebondir » successivement à chaque extrémité. On est alors dans un régime transitoire, celui des impulsions (même des artifices mathématiques comme les transformées de Fourier ne permettent pas de rendre sinusoïdaux de tels signaux).

La seconde raison est d'ordre pratique : Que signifie « le signal est réfléchi, par la charge à l'aller et par le générateur au retour » ? Que se passe-t-il pratiquement quand un signal arrive sur un condensateur par exemple ? Le condensateur se charge, mais en quoi cela donne-t-il lieu à réflexion du signal ? En fait, on jette un voile pudique sur les phénomènes réels, trop compliqués à analyser, et on dit "il y a eu réflexion". Pour illustrer cela, il suffirait de visualiser ce que subit une balle de golf réfléchie sur un mur. Rendre compte pratiquement d'un phénomène aussi compliqué étant impossible, on se contente de constater « l'état avant » et « l'état après » et de se dire « il y a eu réflexion ».

5 – Dans une ligne à ROS différent de 1, la répartition des intensités et des tensions est sinusoïdale.

Faux. Elle est périodique, certes, mais pas sinusoïdale. Les minima sont plus « pincés » que les maxima. Il n'y a que dans le cas où le ROS est infini que la courbe devient sinusoïdale, et donc que les calculs se simplifient.

6 – Entre émetteur et antenne, la décomposition de l'onde en onde directe et onde réfléchie correspond à une réalité physique, chacune de ces ondes transportant de la puissance, l'une de l'émetteur vers l'antenne, l'autre de l'antenne vers l'émetteur.

Faux. Cette décomposition, bien pratique pour analyser les phénomènes, est purement mathématique, et la seule puissance réellement transportée l'est de son lieu de génération (l'émetteur) vers son lieu de consommation (l'antenne). On peut s'en convaincre en considérant le cas-limite d'une ligne où le ROS est infini : elle n'est le siège d'aucun déplacement de puissance, et pas celui d'un déplacement de puissance dans un sens et d'un déplacement égal dans l'autre sens.

F5NB : F6FQX poursuit en donnant trois exemples (démonstrations) mathématiques qui conduisent aux mêmes résultats (puissance transmise, impédances, etc.) mais chacun avec des puissances directes et réfléchies (ou puissance active et puissance réactive) différentes [1]. Il ne peut y avoir plusieurs valeurs pour un même phénomène physique. Cette approche mathématique complète étant indigeste pour la plupart des OM (y compris moi-même) je vais tenter une approche basée sur le raisonnement avec simplification de la partie mathématique.

En électricité, les seules grandeurs que l'on puisse mesurer sont la tension et l'intensité. Ensuite il suffit de les multiplier entre elles pour avoir la puissance mise en jeu ($P = U \times I$). Mais attention, cela vaut pour le courant continu où les valeurs sont statiques (invariables dans le temps) mais pas pour le courant alternatif où les variables sont dynamiques (variables dans le temps). En conséquence, si U et I sont des valeurs scalaires ⁽²⁾ en continu, ce sont des valeurs vectorielles en alternatif, et les opérations mathématiques ne sont plus les mêmes. Un vecteur est caractérisé par une valeur scalaire (son module) et par une direction. Dans le cas de l'alternatif, les vecteurs U et I sont des vecteurs tournants. Après le choix d'une référence, leurs directions peuvent être exprimées par une autre valeur scalaire : la phase. Ainsi la puissance en alternatif est égale à $U \times I \times \cos(\varphi)$ avec φ = différence de phase entre U et I ⁽³⁾. Donc en tout point de la ligne, il suffira de mesurer U, I et φ pour calculer la puissance transmise à la charge. Le long d'une ligne sans perte, celle-ci est une constante, quelle que soit la désadaptation de la charge. Par compte, la simple multiplication de U par I donne une puissance variable, supérieure ou égale à la puissance transmise. Elle est égale quand la charge est adaptée à la ligne et pour certaines distances multiples du quart d'onde quand la charge est désadaptée. Dans ce dernier cas, U et I ne sont plus constantes le long de la ligne et les enveloppes de leurs valeurs constituent ce qu'on appelle des "ondes stationnaires". Le rapport entre U_{max} et U_{min} et entre I_{max} et I_{min} (le même) est exprimé par le **ROS** (**R**apport d'**O**ndes **S**tationnaires), valeur très importante pour le radioamateur ⁽⁴⁾. Voyons sur la figure 1 un cas d'école de ROS 3 avec une ligne d'impédance caractéristique (Z_c) de 2Ω .

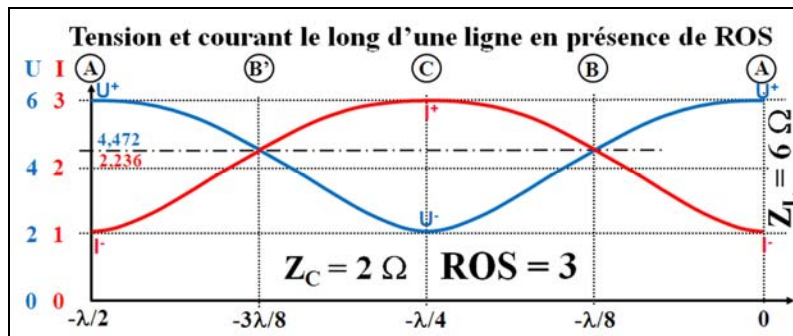


Figure 1 : Tension et courant dans une ligne en présence de ROS

Nous constatons (ligne sans pertes) :

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

En tous ces points, la puissance apparente ($U \times I$) 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, $P_{(B)} = 4,472 \times 2,236 = 10VA$. 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 $\text{Arc cos}(10/6) = 53^\circ$, 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' ⁽⁵⁾.

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 $\lambda/2$. 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 à l'extrémité de la ligne qui est connectée 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 $V^- = \Gamma \times Z_C$, 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, $\text{ROS} = V^+ / (\Gamma \times Z_C)$. Par ailleurs, $V^+ = I^+ \times Z_C$, et pour le point C, nous avons : $\text{ROS} = (I^+ \times Z_C) / V^-$.

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**. Résultats sur la figure 2.

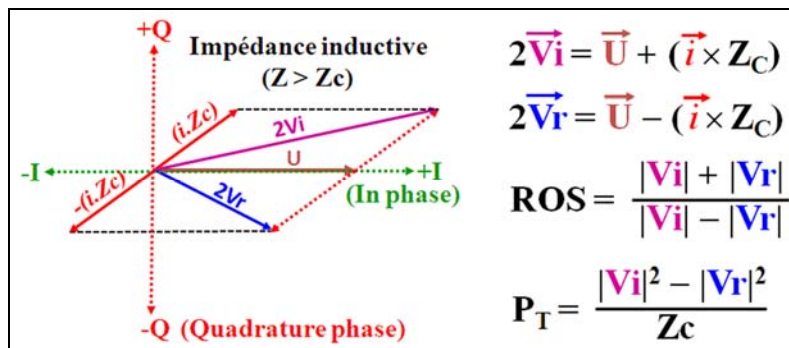


Figure 2 : Calcul ROS et puissance transmise à partir de U et I mesurés en un point

V_i est appelée "tension de l'onde incidente" et V_r "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. 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.

On démontre que la puissance transmise en Watts (constante le long d'une ligne sans pertes), qui est égale par ailleurs à $U \times I \times \cos(\varphi)$, est aussi égale à $(|V_i|^2 - |V_r|^2) / Z_C$. De là à nommer $|V_i|^2 / Z_C$ "puissance directe" et $|V_r|^2 / Z_C$ "Puissance réfléchie", il n'y a qu'un pas que certains franchissent allègrement. On a même fabriqué des "Wattmètres directifs" gradués en puissance directe et en puissance réfléchie. Naturellement, ce sont des puissances fictives puisque V_i et V_r sont des tensions fictives ⁽⁶⁾.

Bibliographie

[1] Ceux qui voudraient une démonstration mathématique complète l'obtiendraient à cette adresse : http://f6fqx.chez-alice.fr/articlesF6FOX/article%20054/lignes_HF_sans_pertes%20_&_math.pdf

[2] Articles de F5NB publiés dans Radio-REF :

- "Fonctionnement du ROSmètre HF", mars 2003
- "ROSmètre HF, thème et variations" décembre 2003
- "Lignes : un problème d'irrigation ?" mai 2004
- "Les lignes et les anges", janvier 2009

Ces articles sont aussi consultables sur le blog de F6KRK (www.blog.f6krk.org) catégorie "articles membres" puis "F5NB" puis "Lignes et ROS-mètres".

Notes.

- 1) *F5NB : A la décharge des radioamateurs, je dirais que certaines de ces idées fausses circulent aussi dans le milieu professionnel et sont encore enseignées. Elles perdurent car pour ceux qui les utilisent, elles n'ont aucune répercussion sur leurs réalisations, en particulier les antennes. Mais pour les concepteurs d'émetteurs, leur fausseté est évidente, si l'on prend le temps d'y réfléchir.*
- 2) *Donc mesurables.*
- 3) *Cette opération mathématique s'appelle "multiplication scalaire de deux vecteurs" le résultat est un scalaire. Ne pas confondre avec la "multiplication vectorielle de deux vecteurs" où le résultat est un vecteur (par exemple le vecteur de Poynting).*
- 4) *Importance confinant à l'excès, surtout pour les antennes.*
- 5) *La réactance est donc capacitive pour le premier quart d'onde et inductive pour le second, et ainsi de suite.*
- 6) *L'utilisation de ces deux formules, l'une en soustrayant une puissance réactive d'une puissance apparente, et l'autre en soustrayant une puissance réfléchie d'une puissance directe, puissances de natures et de valeurs complètement différentes dans les deux cas, montre bien qu'elles sont fictives (" $a = b - c$ " donne la même valeur à a pour une infinité de couples b et c).*