

Comment ça marche ?

Les lignes HF

5 - Les ondes dans une ligne

Par le radio-club F6KRRK

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. Nous allons maintenant étudier la propagation dans une ligne en nous servant de la notion d'onde.

Qu'est-ce qu'une onde ?

D'une manière générale, une onde est un **objet mathématique** décrivant un comportement ondulatoire, en fonction du temps et de l'espace, d'une grandeur physique sinusoïdale. Dans une ligne, ces grandeurs sont le courant, la tension et les champs associés.

Onde électromagnétique progressive

Dans une ligne c'est la description de la propagation des champs dont les caractéristiques sont immuables avec la distance, hormis un éventuel affaiblissement. Le champ E-M décrit par cette onde a ses vecteurs E et H en phase, ce qui correspond dans une ligne à une tension et un courant en phase. Les caractéristiques énergétiques de l'onde sont entièrement définies dans le plan sécant à la direction de l'onde, c'est pourquoi on l'appelle "**onde plane**".

Onde électromagnétique stationnaire

Dans une ligne c'est la description de champs non propagé ⁽¹⁾, dont les caractéristiques varient avec la distance d'une manière quasi semi sinusoïdale avec une période moitié de celle du signal ⁽²⁾. Ce champ électromagnétique est dit "réactif" car les vecteurs E et H sont en quadrature de phase, de même que la tension et le courant. Une onde stationnaire est une onde plane également.

Onde réelle

Dans une ligne, c'est la description du comportement de la tension et du courant en fonction de la distance. Elle est dite "réelle", car c'est la seule qui soit (partiellement) mesurable ⁽³⁾. Elle peut être, soit une onde progressive, soit une onde stationnaire, soit une combinaison des deux, auquel cas on parle d'une "onde complexe". Une ligne est le siège d'une onde complexe lorsque l'impédance de la charge n'est pas égale à son impédance caractéristique. Nous y reviendrons.

Etude d'une onde complexe

Pour une telle onde, seules les équations de Maxwell en permettent une description exacte. Concernant les ondes sur les lignes, la résolution des équations de Maxwell montre qu'elles peuvent s'analyser comme la somme de deux ondes plus simples, et cela de deux manières.

1) Deux ondes progressives antagonistes.

L'onde résultante est une combinaison linéaire de deux ondes progressives sinusoïdales circulant en sens contraires avec des amplitudes respectives A et B (A vers la charge et B vers la source). Comme la charge n'est pas génératrice d'énergie, on admet que l'onde B est le résultat d'une réflexion de l'onde A dans la charge en fonction d'un **coefficient de réflexion complexe (Γ)** qui détermine la part de A qui est réfléchi (**module** du coefficient de réflexion ρ allant de 0 à 1) et le déphasage amené sur cette part (**phase** du coefficient de réflexion ψ allant de -180° à $+180^\circ$).

A partir de ces hypothèses, on obtient par calcul :

- Les valeurs de la tension et de l'intensité le long de la ligne (qui forment des ondes stationnaires)
- L'impédance complexe en un point de la ligne : partie active et partie réactive.
- La puissance complexe en un point de la ligne : puissance active propagée (puissance transmise) et puissance réactive non propagée. La puissance active est une constante tout le long d'une ligne sans pertes. La puissance réactive est variable et s'annule tous les quarts d'ondes (donc elle ne se propage pas).
- Le ROS dans la ligne qui est égal à $\{1+\rho\} / \{1-\rho\}$ (ρ = module du coefficient de réflexion)

Les valeurs de l'impédance complexe et de la puissance transmise ainsi calculées correspondent exactement à celles que l'on obtient à partir des mesures de U, de I et du déphasage entre eux. Mais si cette façon de voir le comportement d'une ligne peut s'envisager pendant la période transitoire, lors de la formation des ondes stationnaires, elle n'est pas satisfaisante physiquement en régime établi. Par exemple, l'attribution d'une puissance à chaque onde (puissance directe et puissance réfléchi), non seulement n'est pas conforme aux calculs, mais ne correspond pas au comportement de la ligne avec la source.

2) Une onde progressive et une onde stationnaire.

Cette décomposition, a le mérite de ne jamais être contredite par l'expérimentation. L'onde progressive, seule, transporte la puissance et elle le fait de l'émetteur vers l'antenne. L'autre onde, étant stationnaire, ne transporte donc aucune puissance. A partir de cette hypothèse, on peut calculer les mêmes paramètres qu'avec deux ondes progressives antagonistes, mais là on n'a pas besoin d'introduire un coefficient de réflexion.

Limites de l'approche mathématique.

Les équations de Maxwell n'ont un sens que pour un signal **sinusoïdal invariable**, ne changeant jamais, ni en amplitude, ni en phase, donc sans commencement ni fin. Alors on considère pour des calculs en fonction du temps que les conditions sont satisfaites à l'origine des temps. Autrement dit, l'énergie stockée dans une ligne y est depuis toujours. Or en réalité, il y a bien eu un moment où l'on a "mis le jus". Par ailleurs, un signal invariable n'a aucun intérêt, car il ne véhicule aucune information.

Les mathématiques appliquées à la physique usent souvent d'artifices pour arriver à des résultats conformes à l'expérimentation. Il en est ainsi pour l'étude du rayonnement électromagnétique (courant de déplacement de Maxwell, potentiels retardés de Lorenz). Ici, il s'agit de la combinaison de deux ondes particulières alors que seule l'onde résultante a une

réalité physique. Voir sur la figure 1 les tracés d'une onde réelle (tension) en fonction du temps.

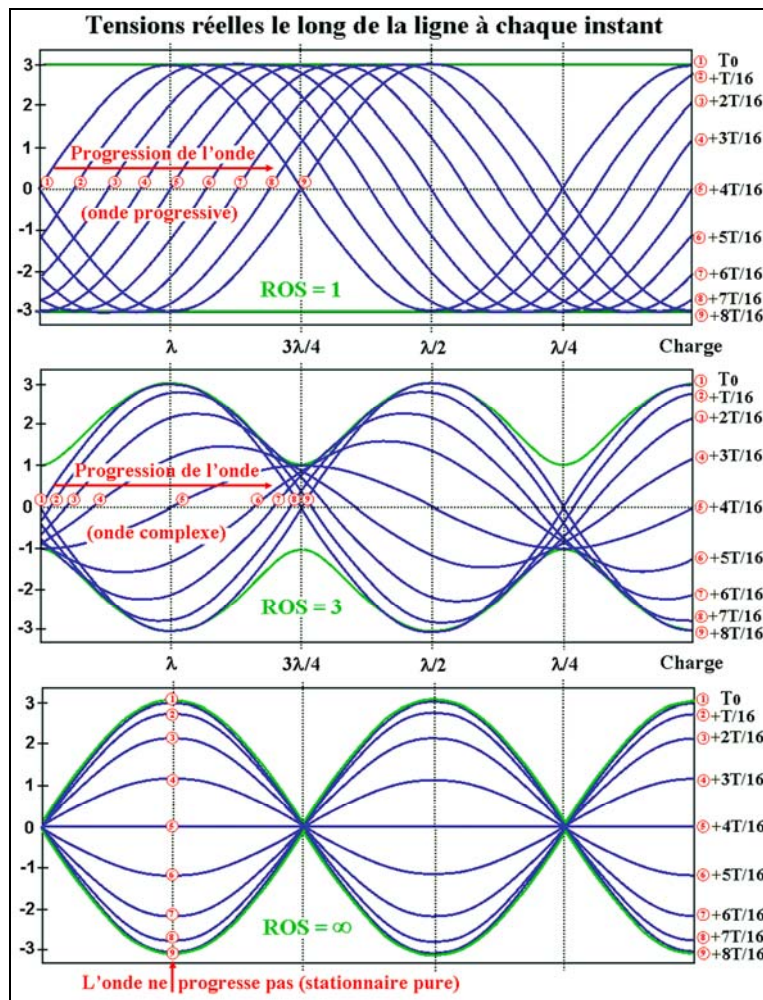


Figure 1 : Ondes dans une ligne.

Les instantanés de la tension montrent bien la progression de l'onde depuis la source vers la charge avec un ROS limité, et une stationnarité totale avec un ROS infini. On a des tracés identiques (mais décalés de $\lambda/4$) pour une onde de courant. En les superposant on visualiserait les déphasages φ entre U et I , nuls aux points multiples de $\lambda/4$ avec inversion de signe, et maxima aux points intermédiaires. Pour un ROS infini, φ est constamment égal à 90° , avec toujours une inversion de signe aux points $n\lambda/4$.

Approche comportementale.

Commençons par la mise en route. Alors on considère que la **f.é.m.** (force électromotrice) de la source a pour effet de "pousser" une énergie dans la ligne. Au démarrage, la ligne présente à la source son impédance caractéristique Z_0 , quelle que soit l'impédance de la charge Z_c . Nous avons vu qu'elle est alors parcourue par une onde progressive. Quand l'onde f.é.m. arrive au niveau de la charge, l'ensemble {source + ligne} se présente comme une source ayant une impédance interne égale à celle de la ligne, quelle que soit l'impédance de la source physique. Si l'impédance Z_c de la charge est différente de Z_0 , elle n'absorbe qu'une partie de l'énergie transportée selon la règle de la puissance transmise et s'oppose à la transmission de l'autre partie. Cette opposition génère une **f.c.é.m.** (force contre électromotrice) qui se propage vers la source (onde réactive). Pendant ce temps, la source continue de débiter la

puissance nominale. Quand l'onde est de retour à la source, l'impédance que la ligne lui présente est alors une "image" de la charge Z_c par rapport à Z_0 . Mais la période transitoire n'est pas terminée. En effet, selon le rapport Z_c/Z_0 ($Z_c \neq Z_0$) et l'impédance interne de la source, l'énergie va augmenter ou diminuer brusquement, ce qui occasionne un nouveau cycle transitoire qui aura pour résultat, soit d'augmenter, soit de diminuer l'énergie dissipée dans la charge. Et ainsi pour plusieurs cycles. Mais le delta de puissance étant de plus en plus faible à chaque fois, le régime stationnaire est atteint d'autant plus vite qu'il y a des pertes dans la ligne et que le ROS est faible. Ensuite, la source ne débitera plus que la puissance dissipée par la charge ⁽⁴⁾. Voir quatre exemples (cas particuliers extrêmes) sur la figure 2.

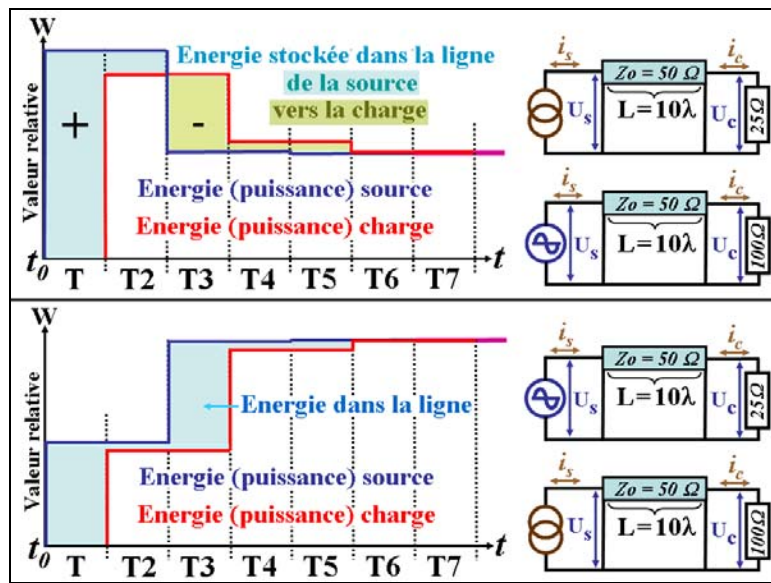


Figure 2 : Répartition de l'énergie au démarrage

On voit bien (surfaces colorées) la différence entre l'énergie consommée par la charge et celle fournie par la source. Ceci pendant la période transitoire ⁽⁵⁾. Comme ensuite toute l'énergie passe dans la charge, force est de constater que ce surcroît d'énergie reste dans la ligne. C'est l'énergie réactive. C'est elle qui est à l'origine de la partie réactive de l'impédance en un point de la ligne. Les ondes stationnaires sont le résultat de la combinaison de la f.é.m. et de la f.c.é.m, de même que la répartition de l'énergie réactive, qui est stationnaire elle aussi. Ainsi, pendant la période transitoire, nous avons bien deux ondes antagonistes, mais si l'onde aller transporte de l'énergie sous l'effet d'une force (f.é.m.), l'onde retour n'est liée qu'à une force (f.c.é.m.) qui s'oppose à la première, réduisant ainsi l'énergie transportée. La f.é.m. et la f.c.é.m. étant sinusoïdales, il y a formation d'ondulations le long de la ligne. Le système reste stable tant que la f.é.m. ne subit aucune variation d'amplitude ou de phase.

Noter que si les impédances aux deux extrémités de la ligne sont réactives il y a bien échange d'énergies réactives entre la ligne et la source d'une part et entre la ligne et la charge d'autre part. Mais le bilan de ces échanges est nul sur une demie période du signal, donc on ne peut pas parler de puissance.

Dans le prochain "Comment ça marche" nous verrons le **Rapport d'Ondes Stationnaires** (ROS) qui est lié aux ondulations de la tension et du courant dans la 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".

Notes :

- 1) *M. de La Palice aurait dit que c'est parce que l'onde est stationnaire.*
- 2) *Donc elles se répètent toutes les demi-ondes.*
- 3) *Elle est partiellement mesurable, car les mesures ne tiennent pas compte, ou du temps (on obtient des valeurs moyennes, et non instantanées), et/ou de l'espace (mesures en un point de la ligne).*
- 4) *Au rendement près de la source qui est lié à son impédance interne et à la nature réactive de la charge.*
- 5) *En comparant les puissances source / charge, on constate une différence de $\approx 10\%$ pour la période T2, $\approx 1\%$ pour T4, $\approx 0,1\%$ pour T6, etc. Ceci pour un ROS de 2. Pour un ROS de 30, nous aurions : 87,5%, 76,5%, 67%, etc. La période transitoire serait beaucoup plus longue et l'énergie stockée dans la ligne beaucoup plus élevée (relativement à l'énergie transmise).*