

ROS, ROS-mètre et émetteur

Robert BERRANGER F5NB

Le ROS-mètre est un appareil qui est prévu pour mesurer le Rapport d'Onde Stationnaire qui existe dans une ligne lorsque l'impédance de la charge est différente de son impédance caractéristique. Mais il sert le plus souvent à déterminer un facteur de désadaptation. Dans cet article nous allons voir le ROS, son effet sur l'émetteur, le principe de fonctionnement du ROS-mètre, et en annexe, analyser la nature du comportement des lignes HF.

Préambule.

Nous allons faire appel à quelques notions mathématiques simples qu'il est nécessaire de connaître pour comprendre la suite. Nous avons :

- Notions d'addition vectorielle et de vecteurs projetés.
- Notions de trigonométrie (cosinus, sinus).
- Notions d'impédance complexe sous la forme $Z = R \pm jX$.
- Notions d'impédance vectorielle : $Z = M, \varphi$ (Module, phase)

Vous pouvez voir ou revoir ces notions mathématiques en lisant l'article "Quelques définitions mathématiques utiles en électromagnétisme" paru dans Radio-REF de juin 2009, et disponible sur le site de F6KRK ⁽¹⁾.

Rappels de quelques notions liées au dipôle électrique.

Considérons la figure 1.

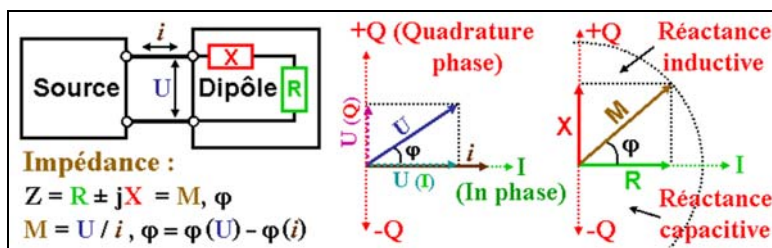


Figure 1.

Nous avons trois mesures possibles pour caractériser un dipôle à une fréquence donnée :

- Mesure de la tension U aux bornes du dipôle
- Mesure de l'intensité i du courant traversant le dipôle
- Mesure de l'écart de phase φ entre U et i

N-B : Les valeurs U et i mesurées correspondent aux modules des vecteurs U et i . Il en sera également ainsi par défaut dans la suite de l'article.

Résistance pure : $R (\Omega) = U / i$, sachant que $\varphi = 0$ (vecteurs U et i en phase).

Réactance capacitive pure : $-X (\Omega) = U / i$, avec le vecteur i en **retard** de phase de 90° sur le vecteur U ($\varphi = -90^\circ$).

Réactance inductive pure : $X (\Omega) = U / i$, avec le vecteur i en **avance** de phase de 90° sur le vecteur U ($\varphi = 90^\circ$).

Impédance complexe : $Z = R \pm jX$ avec :

- R = partie réelle = résistance pure
- X = partie imaginaire = réactance pure
- j = nombre imaginaire = racine de $\{-1\}$.

Impédance vectorielle : $Z = M, \varphi$ avec :

- M = Module de l'impédance = U / i
- φ = Déphasage de U par rapport à i (compris entre -90° et $+90^\circ$)

Energies et puissances.

La puissance en **watts** quantifie une dépense d'énergie pour effectuer un **travail** pendant une durée de **une seconde**.

Energie active.

C'est l'énergie dissipée par le dipôle et on peut l'exprimer sous forme de **puissance vraie** : $P_{(watt)} = U \times i \times \cos(\varphi)$. Plus précisément, cette quantité est égale à la puissance moyenne dissipée dans la partie résistive R pendant un nombre entier de demi périodes.

Energie réactive.

Elle correspond à de l'énergie échangée entre la source et le dipôle et qui n'aboutit à aucun travail utile ⁽²⁾. On peut l'exprimer sous forme de **puissance équivalente** en **V.A.R.** (Volt-Ampère Réactif) : $P_{(VAR)} = U \times i \times \sin(\varphi)$. Plus précisément, cette quantité est égale à la puissance moyenne échangée pendant une demi période, au signe près.

Energie totale.

Contrairement aux énergies active et réactive, l'énergie totale est une convention d'écriture qui n'a pas d'interprétation physique, puisqu'elle est la somme de deux grandeurs différentes. On l'exprime sous forme de **puissance apparente** en **V.A.** (Volt-Ampère) : $P_{(VA)} = U \times i$ (valeurs mesurées de U et de i).

Energies dans une ligne.

En absence d'onde stationnaire (ROS=1), il ne circule dans la ligne qu'une énergie active correspondant à la puissance dissipée dans la charge.

En présence d'onde stationnaire (ROS>1), on trouve dans la ligne à la fois de l'énergie active et de l'énergie réactive d'une manière que nous allons examiner maintenant.

ROS : effets sur la tension, le courant et l'impédance.

Considérons la figure 2.

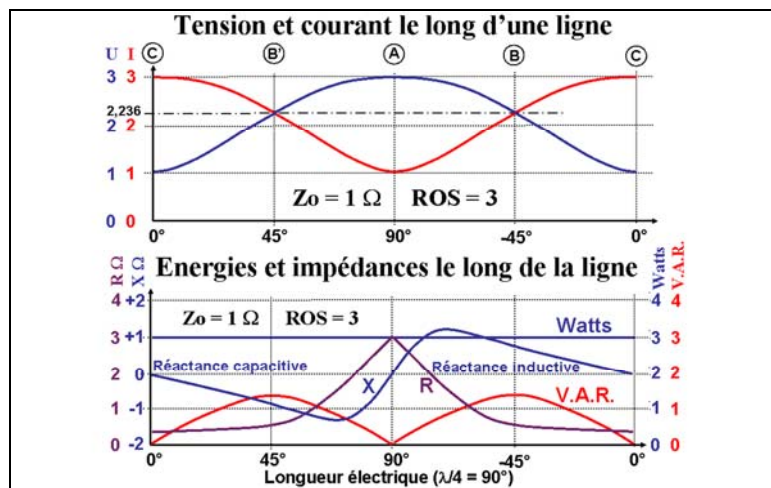


Figure 2.

Nous avons un tronçon de ligne d'une demie longueur d'onde ayant une impédance caractéristique de 1Ω et qui est le siège d'une onde stationnaire de rapport 3. La puissance transmise est égale à 3 watts.

Au point (A), le courant minimum mesure 1 A et la tension maximum mesure 3 V. La puissance apparente est de 3 VA, égale à la puissance transmise. Il n'y a donc pas d'énergie réactive en ce point et l'impédance est de 3Ω .

Aux points (C), le courant maximum mesure 3 A et la tension minimum mesure 1 V. La puissance apparente est de 3 VA, égale à la puissance transmise. Il n'y a donc pas non plus d'énergie réactive en ces points et l'impédance est de $0,33 \Omega$.

Aux points (B) et (B'), le courant et la tension mesurent 2,236. La puissance apparente est de 5 VA, supérieure à la puissance transmise. La différence provient de l'énergie réactive dont la densité est maximum en ces points. Si l'on mesure le déphasage entre U et I, on trouve une inversion de signe aux points (A) et (C) avec aux points (B) et (B') des maxima proportionnels au ROS. La réactance est alternativement inductive et capacitive tous les quarts d'ondes. Lorsque le ROS tend vers l'infini, la puissance transmise tend vers zéro et l'énergie réactive tend vers l'infini (limitée en réalité par les pertes). La courbe hyperbolique qui caractérise la partie réelle de l'impédance se referme pour tendre vers deux droites à 90° . La pente au point (A) de la partie réactive tend à devenir verticale en rapprochant les réactances maxima dudit point (A).

ROS : effets sur l'émetteur.

L'effet du ROS sur un émetteur dépend de la nature de l'impédance que la ligne chargée présente à celui-ci. L'idée reçue qui dit que l'émetteur fournit une puissance directe qui se décompose en une puissance consommée par la charge et une puissance réfléchie consommée par lui-même est un concept mathématique qui n'a de correspondance physique qu'avec une architecture d'émetteur bien particulière, jamais utilisée en pratique pour des raisons de rendement^{[8][9]}. L'impédance dite "de sortie" d'un émetteur est en général, surtout en HF et en VHF, différente de l'impédance interne dudit émetteur. Il s'agit d'une **impédance de charge nominale** (optimum). Je rappelle que le ROS dans une ligne est complètement indépendant de l'impédance de la source, il ne dépend que de l'impédance de la charge.

Prenons un exemple avec le cas de ROS 3 de la figure 2 et comme émetteur un ampli classe B à transistors **parfaits** en mode "émetteur commun". Nous obtenons le diagramme de la figure 3 (un seul transistor).

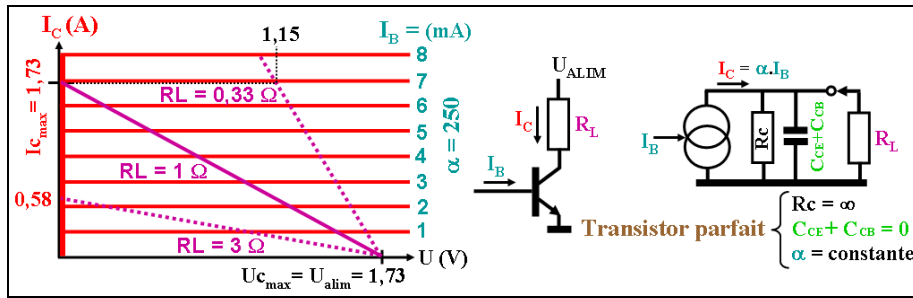


Figure 3.

En pratique, $U_L < U_{Cmax}$ à cause de la tension de déchet du transistor et I_{Cmax} est limité par la saturation, soit dans l'alimentation, soit dans le transistor.

Admettons un système de régulation (ALC-HF) qui diminue l'excitation (I_{Bmax}) dès que $I_L \geq I_{Cmax}$ et/ou que $U_L \geq U_{alim} - \epsilon$, ceci pour conserver une bonne linéarité (pas de saturation). La correspondance entre les figures 2 et 3 implique que $U_{Cmax} = 1,73V$ et $I_{Cmax} = 1,73 A$ (valeurs crêtes). Nous allons considérer le rendement et la puissance fournie selon le cas de ROS 1 et deux cas de ROS 3.

- ROS = 1. Alors $R_L = 1 \Omega$ et la puissance crête fournie est égale à $U_L \times I_L$, soit $1,73 \times 1,73 = 3$ Watts. Le rendement de l'émetteur est le rendement théorique de la classe B, soit 71%.
- ROS = 3, cas (A) de la fig. 2. Alors $R_L = 3 \Omega$ et I_{Cmax} est limité par l'ALC (réduction de I_{Bmax}) à $U_{Cmax} / 3 = 0,58 A$. La puissance crête fournie est égale à $1,73 \times 0,58 = 1$ Watt (P/ROS). Dans ce cas le rendement est toujours de 71% car $U_L = U_{Cmax}$ et $I_C = I_L$.
- ROS = 3, cas (C) de la fig. 2. Alors $R_L = 0,33 \Omega$. Comme I_{Cmax} est limité par l'ALC (I_{Bmax}) à 1,73 A, nous avons $U_L = 1,73 \times 0,33 = 0,58 V$. La puissance crête fournie est alors égale à $1,73 \times 0,58 = 1$ Watt (P/ROS). Mais le rendement a fortement diminué car U_{alim} est de 1,73 V alors que 0,58 V serait suffisant. Les transistors vont consommer une puissance crête supplémentaire égale à $I_{Cmax} \times (1,73 - 0,58)$ ⁽³⁾.

Pour un ROS donné, si l'impédance ramenée à l'émetteur est réactive, le rendement sera compris entre le cas (A) et le cas (C).

En pratique, l'étage de sortie d'un émetteur est loin d'être parfait. Il est composé généralement de un ou deux transistors, d'un transformateur et d'un filtre passe-bas ou passe-bande. Les pertes dans ces composants dégradent le rendement et s'il est relativement aisé de compenser en interne les parties réactives pour une émission en bande étroite (cas des bandes amateur), l'exercice est plus difficile pour les émetteurs professionnels large bande.

Le ROS-mètre

Il est prévu en principe pour mesurer le ROS dans une ligne. Avec une ligne sans perte d'une longueur supérieure à une demie longueur d'onde (voir fig.2), on pourrait le faire en examinant la variation de la tension le long de la ligne puis en calculant le rapport entre U_{max} et U_{min} , les deux points où ces conditions existent étant séparés d'un quart d'onde électrique. On peut aussi faire l'opération avec une recherche de I_{max} et de I_{min} . Les points trouvés sont les mêmes que pour la tension, mais avec les min et les max inversés. Cette méthode nécessite d'avoir affaire à une ligne ouverte (fils parallèles, antenne filaire ouverte) et d'y avoir accès. Elle n'est pas pratique et est très lente.

On peut aussi déterminer le ROS à partir de l'impédance complexe que présente la ligne à la source en la comparant avec l'impédance caractéristique de la ligne. C'est ce qui est fait avec les analyseurs vectoriels.

En pratique, si seul le ROS nous intéresse, il n'est pas besoin de connaître l'impédance complexe. On peut obtenir le ROS directement à partir des paramètres mesurables qui servent à calculer l'impédance, c'est-à-dire la tension, le courant et leur écart de phase. On effectue alors un processus comprenant deux actions principales (ROS-mètre HF classique) :

- Opérations **vectérielles** à partir des valeurs **instantanées** de U et de I pour obtenir des valeurs appelées "tension incidente" $\{V_i\}$ et "tension réfléchie" $\{V_r\}$.
- Le ROS s'obtient ensuite à partir des valeurs **efficaces** de V_i et de V_r grâce à la relation $\{1\}$: $ROS = (V_i + V_r) / (V_i - V_r)$ (opérations **arithmétiques**).

Obtention de V_i et de V_r .

Les relations qui relient V_i et V_r au courant et à la tension sont les suivantes :

$$2V_i = U + (I \cdot Z_0)$$

$$2V_r = U - (I \cdot Z_0)$$

Attention, il s'agit d'opérations **vectérielles** sur les vecteurs **instantanés** de U et de I. Z_0 est une constante égale à l'impédance nominale du ROSmètre, égale aussi à l'impédance caractéristique de la ligne s'il sert à mesurer le ROS dans ladite ligne.

Nous avons sur la figure 4 le diagramme des opérations vectorielles effectuées et un exemple de schéma réalisant la fonction ⁽⁴⁾.

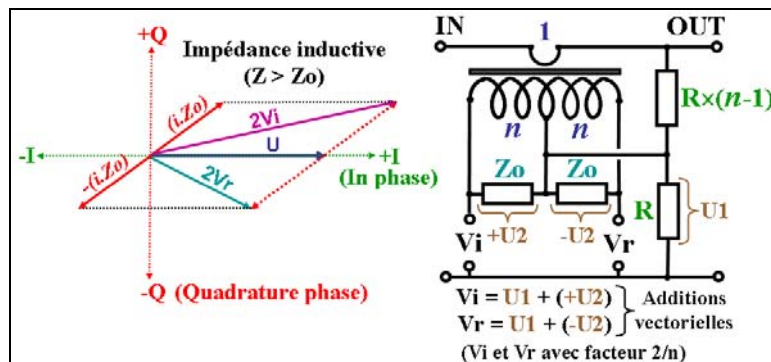


Figure 4.

A partir des tensions **instantanées** de V_i et V_r (à un facteur constant près égal à $2/n$), on obtient leurs valeurs **efficaces** par détection (à un autre facteur constant près égal à 1,414 pour une détection crête).

Obtention du ROS.

On l'obtient en appliquant la relation $\{1\}$. Ceci peut être fait simplement d'une manière manuelle comme dans le ROS mètre classique du radioamateur.

Principe : faire en sorte que la mesure du ROS ne dépende plus que du paramètre V_r .

Pour cela, on multiplie V_i et V_r par une même constante K de telle manière que $K \cdot V_i$ soit

égale à 1, c'est-à-dire à la pleine échelle de lecture d'un voltmètre à aiguille. Les multiplications sont effectuées à l'aide d'un potentiomètre double, ce qui suppose que V_i soit supérieure à la pleine échelle (il faut une puissance d'émission suffisante). A la suite de quoi, la relation $\{1\}$ devient :

$$ROS = (1 + V_r) / (1 - V_r) \quad (\text{relation } \{2\}) \quad (5)$$

Nous voyons que le ROS ne dépend plus que de V_r . Pour l'obtenir, il suffit de mesurer V_r en lisant sur une échelle graduée de manière adéquate.

Processus de lecture :

- commutation du voltmètre sur V_i

- ajustage du potentiomètre pour obtenir la pleine échelle
- commutation du voltmètre sur Vr
- lecture directe du ROS

Graduation du voltmètre.

Après normalisation de Vi à 1, la valeur de Vr pour un ROS donné est calculée à partir de la relation {2} ci-dessus :

$$V_r = (\text{ROS}-1) / (\text{ROS}+1) \quad (V_i = 1) \quad (5).$$

Nous avons dans le tableau suivant quelques valeurs de Vr exprimées en pourcentages de la pleine échelle d'un voltmètre à aiguille.

ROS	1	1,1	1,2	1,3	1,5	2	2,5	3	5	10	∞
%	0	5	9	13	20	34	43	50	67	82	100

Utilisation du ROS-mètre.

Si l'impédance nominale du ROS-mètre est égale à l'impédance caractéristique de la ligne, il mesure le ROS dans la ligne à l'endroit où il est inséré (y compris aux extrémités). S'il est placé entre la ligne et l'antenne, le ROS lu caractérise un facteur de désadaptation entre l'antenne et la ligne. Si son impédance nominale est l'impédance nominale de charge de l'émetteur et qu'il est placé entre l'émetteur et la ligne, il mesure un facteur de désadaptation de l'ensemble {ligne + antenne}. Si l'impédance caractéristique de la ligne est différente de la résistance nominale de charge de l'émetteur, donc du ROS-mètre, celui-ci ne mesure pas le ROS dans la ligne. C'est aussi toujours le cas si un circuit d'adaptation (boîte d'accord antenne) est placé entre le ROS-mètre et la ligne. Le ROS-mètre est suffisant pour réaliser une adaptation manuelle par approximations successives pour obtenir un "ROS de 1". Pour une adaptation à l'aide d'un automate (boîte d'accord automatique), on a besoin en plus du signe du déphasage entre U et I, ce qui peut être obtenu d'une manière simple.

Annexe : Analyse comportementale d'une ligne HF.

Une ligne HF est composée de deux conducteurs métalliques parallèles (âme et gaine du coaxial par exemple), séparés par un diélectrique (air ou téflon par exemple). Dans la ligne, l'énergie se propage dans le diélectrique, de l'émetteur vers l'antenne.

En HF, on caractérise l'état électromagnétique en chacun des points d'un milieu par trois grandeurs vectorielles interdépendantes : le vecteur "champ magnétique", le vecteur "champ électrique" et le vecteur "densité de courant". Dans une ligne coaxiale, ces 3 vecteurs forment un trièdre trirectangle (chacun est perpendiculaire aux deux autres). Le vecteur "densité de courant" est parallèle à l'axe et porté par les surfaces métalliques en regard (âme et gaine). Le vecteur "champ électrique" est radial et situé dans le diélectrique. Le vecteur "champ magnétique" est tangentiel et situé dans le diélectrique. Ce sont ces trois grandeurs qui se propagent le long d'une ligne. Elles le font sous forme d'onde plane, comme l'onde électromagnétique rayonnée en espace libre. Mais dans une ligne, la situation est plus complexe car contrairement à l'espace libre, le milieu est confiné. L'onde n'est plus simple et 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.

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 (ρ)** qui détermine la part de A qui est réfléchi (**module** du coefficient de réflexion allant de 0 à 1) et le déphasage amené sur cette part (**phase** du coefficient de réflexion 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 $\{1+|\rho|\} / \{1-|\rho|\}$ ($|\rho|$ = 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. De là à penser que l'hypothèse des deux ondes progressives correspond à une réalité physique, il n'y a qu'un pas que certains n'hésitent pas à franchir.

Une conséquence directe de cette manière de considérer le phénomène se retrouve dans les (fausses) idées reçues :

- "En cas de désadaptation ligne / charge, l'émetteur débite une puissance directe dont une partie est consommée par la charge et l'autre partie (puissance réfléchi) lui revient, l'obligeant à la consommer lui-même".
- "L'émetteur sortira un maximum de puissance lorsque son impédance interne sera conjuguée à celle de la ligne" (c'est vrai pour une antenne en réception, mais pas pour un émetteur). Cette façon d'envisager le comportement d'une ligne n'est pas satisfaisante physiquement pour plusieurs raisons :
- Mathématiquement, si l'on peut soustraire deux ondes qui sont du premier degré, on ne peut soustraire les puissances correspondantes qui sont du second degré. Si l'on calcule les puissances à partir des deux ondes, on en trouve deux : l'une correspond à une puissance propagée et consommée par la charge et l'autre à une puissance réactive non propagée.
- Sachant que l'on peut fabriquer une charge avec une résistance et un condensateur, par exemple, on imagine mal comment un champ électromagnétique puisse se réfléchir sur ces composants. Par ailleurs, on suppose qu'il n'y a qu'une seule réflexion au niveau de la charge, et aucune au niveau de la source, ce qui implique une source avec une impédance interne égale à celle de la ligne. Or il est facile de prouver que le ROS est indépendant de l'impédance de la source et avec une adaptation parfaite, la source consomme autant d'énergie que la charge (rendement maxi de 50%, à pondérer pour les émetteurs avec le rendement de la classe de fonctionnement). Quant à la puissance réfléchi qui est consommée par l'émetteur, il suffit de revoir la figure 2 et alors il est évident que si l'on connecte l'émetteur au point (A) en intercalant un transformateur élévateur de rapport 3 en impédance, on sortira la puissance nominale avec un rendement nominal, bien qu'il y ait un ROS de 3 dans la ligne. Alors, d'où provient et où va la puissance réfléchi ?

2) Une onde progressive et une onde stationnaire.

Cette décomposition, a le mérite de mieux visualiser les problèmes de transfert de puissance : 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. On considère que l'onde stationnaire provient d'une énergie réactive stockée dans la ligne. Partant du principe qu'à la jonction charge/ligne, l'impédance complexe est la même pour les deux, un calcul de la désadaptation par rapport à l'impédance nominale de la ligne permet de déterminer à quel endroit de l'onde stationnaire on se trouve. Cette façon d'envisager le comportement d'une ligne a le mérite de ne jamais être contredite par l'expérimentation.

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 utilisent 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 figure 5 les tracés d'une onde réelle (tension) en fonction du temps.

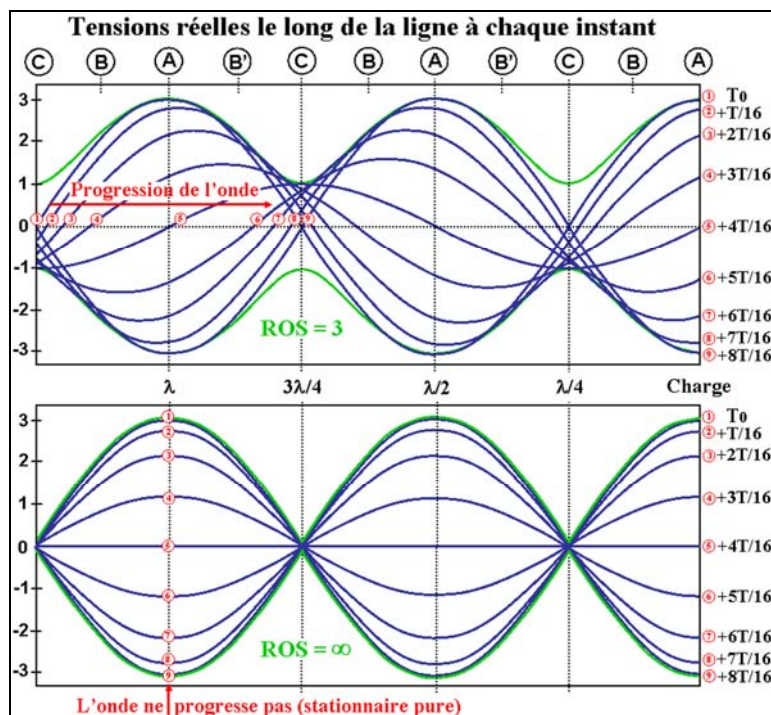


Figure 5.

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 (A) et (C) avec inversion de signe, et maxima aux points (B) et (B'). Pour un ROS infini, φ est constamment égal à 90° , avec toujours une inversion de signe aux points (A) et (C).

Je tiens à remercier Jean-Pierre F6FQX, pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée sur l'aspect mathématique du sujet. On trouvera sur son site Internet^[10], raisonnements et démonstrations mathématiques concernant les concepts évoqués ici.

Approche expérimentale.

Période transitoire.

Avant d'en venir aux lignes, voyons le comportement en régime transitoire des circuits réactifs à la résonance. Voir sur la figure 6 un circuit résonant parallèle alimenté par une source de courant et chargé par un voltmètre (cas souvent rencontré dans un amplificateur sélectif).

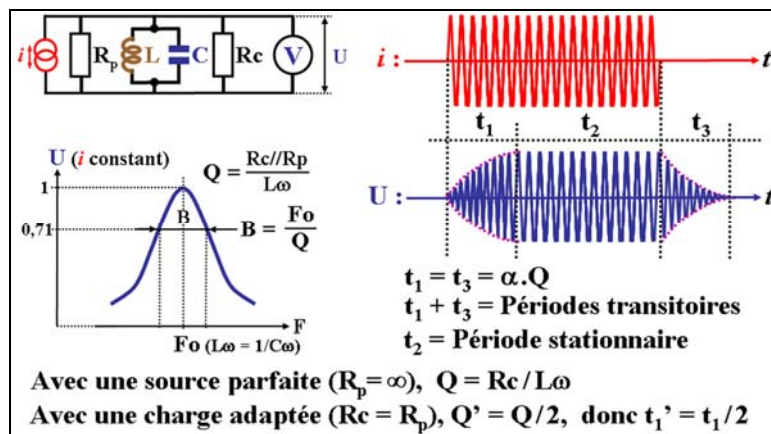


Figure 6.

Fonctionnement du circuit au démarrage (simplifié) : Pendant une demi période, la source charge le condensateur qui développe une (faible) tension à ses bornes. Pendant la demi période suivante, la source plus le condensateur chargent la bobine. Puis la demi période suivante, la source plus la bobine chargent le condensateur. Et le système continue, demi période après demi période. Au fur et à mesure du déroulement du processus le courant échangé augmente, mais de moins en moins, et quand la tension devient égale à celle développée par le courant de source multiplié par les résistances de pertes (R_p/R_c) le système se stabilise. On entre dans la période stationnaire. L'énergie dépensée par la source va dans les résistances et Q fois cette énergie est échangée entre le condensateur et la bobine (sur la durée d'une demi période). Plus le Q est élevé, et plus le processus transitoire est long en nombre de périodes.

A l'arrêt, l'énergie contenue dans le circuit continue d'osciller entre condensateur et bobine (en oscillation libre comme avec un pendule qui n'est plus entretenu) tout en se dissipant dans les résistances ce qui provoque un amortissement (idem avec les frottements du pendule).

On aurait le même raisonnement avec une source de tension, un circuit série et un ampèremètre, en intervertissant courant et tension.

On conçoit que si la modulation du signal se fait plus rapidement que ce processus transitoire, l'information sera altérée. Autrement dit, en raisonnant dans le domaine fréquentiel, le spectre de la modulation est multiplié (convolution) par la bande passante relative du circuit⁽⁶⁾.

Voyons maintenant le processus avec une ligne qui est le siège d'une onde stationnaire ($ROS > 1$). La figure 7 nous montre l'allure des énergies, source, ligne et charge, pendant la période transitoire de démarrage pour une ligne très longue (10λ), sans perte et chargée par une résistance pure entraînant un ROS de 2⁽⁷⁾.

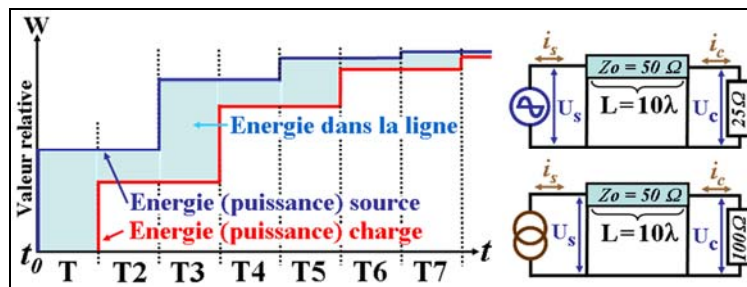


Figure 7.

N-B : La durée T correspond au retard apporté par la ligne (temps mis par le signal pour aller de la source vers la charge).

Nous avons un processus similaire à la charge d'un circuit oscillant, mais la référence de temps de la demi période est remplacée par le retard du à la longueur électrique de la ligne et la durée de la période transitoire est proportionnelle à $ROS-1$. Comme pour le circuit oscillant, elle est divisée par deux si la source est adaptée.

Déroulement du processus :

Après un appui sur le bouton "ON", 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, quelle que soit l'impédance de la charge. La ligne est alors parcourue par une onde dite "progressive". Quand l'onde f.é.m. arrive au niveau de la charge, si son impédance est différente de Z_0 , elle n'absorbe qu'une partie de l'énergie transportée (puissance active) et s'oppose à la transmission de l'autre partie ("puissance" réactive). 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 différente de Z_0 , ce qui occasionne une modification de la tension, du courant ou des deux, et le départ d'une nouvelle onde aller, mais réduite par rapport à la première (si ROS pas infini ou si perte dans la ligne). Et c'est reparti pour un tour. Mais à chaque fois l'onde réactive diminue et devient rapidement négligeable. En prenant l'exemple de la fig. 7 ($ROS = 2$ et source complètement désadaptée), l'amplitude de l'onde réactive est de 0,33 (T_2), puis 0,33 de 0,33 (T_4), puis 0,33 de 0,33 de 0,33 (3,6%) (T_6), etc. Si la charge était égale à Z_0 ($ROS = 1$), l'énergie contenue dans la ligne serait seulement celle correspondant à T , le supplément pour $ROS > 1$ correspond au stockage de l'énergie réactive 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. On a ici une explication qui valide physiquement l'hypothèse mathématique N° 2 ci-dessus.

Si la charge est résonante, la durée de la période transitoire est le pire cas entre celle due à la longueur et au ROS dans la ligne et celle due au Q de la charge.

En résumé :

- Si la ligne est courte ou si la partie résistive de la charge est égale à son impédance caractéristique, la durée de la période transitoire est uniquement liée au Q de la charge.
- Si la ligne est longue, la durée de la période transitoire est liée au ROS du à la charge.
- Dans tous les cas, si la source est adaptée, la durée de la période transitoire est divisée par deux.

- Dans tous les cas également, si la ligne a des pertes, la période transitoire est raccourcie.

Répartition des énergies le long de la ligne.

Examinons ce qui se passe entre la ligne et la charge.

Si la charge est résistive pure, on se trouve aux points (A) ou (C), selon que son impédance (R) est plus grande ou plus petite que l'impédance caractéristique Z_0 de la ligne. Il n'y a alors qu'une énergie active présente à cet endroit. Elle correspond à la puissance dissipée dans la charge.

Si celle-ci est réactive, il y a en plus échange d'énergie réactive entre la ligne et la charge. Cette énergie alternative sur une période moitié de la période du signal a une valeur moyenne nulle et ne conduit à aucun travail. On se trouve alors à un point situé entre un point (A) et un point (C), dépendant de la réactance de la charge.

Examinons maintenant ce qui se passe entre la source et la ligne.

Si, en fonction de l'impédance de la charge, de la longueur de la ligne et de son impédance caractéristique, on se trouve au point (A) ou au point (C), l'impédance image ramenée par la ligne n'a qu'une composante réelle. Alors l'effet sur l'émetteur est le même que si on le chargeait par une résistance égale à l'impédance image Z_i , c'est-à-dire une modification de la droite de charge et un effet sur le rendement dépendant du rapport supérieur ou inférieur à 1 entre Z_i et Z_0 (exemple dans le chapitre ci-dessus : "ROS, effets sur l'émetteur").

Si l'impédance image présente une partie réactive, alors une énergie réactive est échangée entre la source et la ligne de la même manière que ci-dessus entre la ligne et la charge. Les conséquences sur l'émetteur sont **exactement les mêmes** si l'on remplace l'ensemble ligne + charge par un circuit RLC d'impédance équivalente. Dans ce dernier cas, personne ne conteste que nous ayons affaire à un comportement réactif. On peut donc dire que la ligne, en présence de ROS a également un comportement réactif. Celui-ci est le même, que l'impédance de la charge de l'émetteur soit le fait de constantes réparties ou de constantes localisées.

Enfonçons le clou en continuant nos expérimentations. Considérons la figure 8.

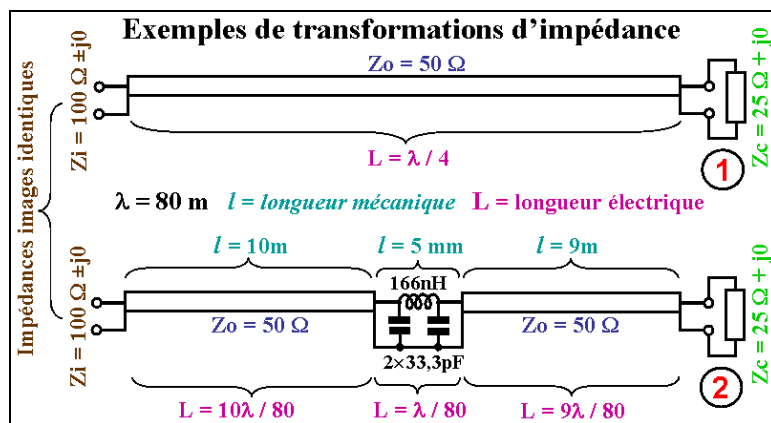


Figure 8.

En (1), nous avons une ligne 50 Ω d'une longueur électrique de 20 m, soit un quart d'onde. Elle est chargée par une résistance pure de 25 Ω qui entraîne un ROS de 2. L'impédance image **mesurée** à l'autre extrémité de la ligne est de 100 Ω résistive pure, en accord avec les calculs (pertes négligeables).

En (2), nous avons un tronçon de ligne 50Ω d'une longueur électrique de 10 m, et un autre tronçon d'une longueur électrique de 9 m, chargé par une résistance pure de 25Ω . Entre les deux tronçons est insérée une cellule L-C en Pi avec une bobine série de 166 nH et deux condensateurs parallèles de 33,3 pF ⁽⁸⁾. La longueur de la cellule L-C est de 5 mm (composants CMS). L'impédance image **mesurée** à l'autre extrémité de la ligne est encore de 100Ω résistive pure (à epsilon près), comme dans le cas (1). On mesure un ROS de 2 à n'importe quel endroit des tronçons de ligne. On en conclut donc que notre cellule L-C modélise un tronçon de ligne $Z_0=50 \Omega$ d'une longueur électrique de 1 m, soit ici $\lambda/80$. On peut aller plus loin en remplaçant la ligne quart d'onde par 20 cellules identiques en série ⁽⁹⁾. Si l'on fait des mesures d'impédances complexes entre deux cellules quelconques, on obtient **exactement** (à epsilon près) les valeurs des points correspondants dans la ligne. Cette façon de modéliser une ligne est appelée "**modèle des télégraphistes**". La modélisation est d'autant plus proche de la réalité physique que les cellules modélisent des tronçons de ligne plus courts (relativement à la longueur d'onde).

Ligne et adaptation.

On démontre que l'on peut obtenir une impédance image complexe quelconque à partir de l'impédance complexe d'une charge à l'aide d'une ligne particulière en impédance caractéristique et en longueur. Si l'on est fâché avec les maths, on peut utiliser un abaque de Smith ^[7]. En remplaçant la ligne par un nombre suffisant de cellules L-C selon le modèle des télégraphistes, on obtient le même résultat. Pour une fréquence donnée, l'ensemble des cellules peut être remplacé par une seule cellule avec les valeurs appropriées pour obtenir la même fonction de transfert. Cette façon de procéder est bien connue des radioamateurs, soit pour adapter une antenne à la ligne, soit pour adapter l'impédance image de la ligne à l'impédance nominale de sortie de l'émetteur (boîte d'accord).

Conclusion :

En régime permanent, puisqu'on peut toujours remplacer un quadripôle "ligne" par un quadripôle "L-C" sans changer la fonction de transfert du système, et en considérant que le quadripôle L-C a un comportement réactif, on en conclut que la ligne a également un comportement réactif. Ce postulat n'a jamais été remis en cause par l'expérimentation.

Bibliographie.

- [1] "Fonctionnement du ROS-mètre HF", Radio-REF, mars 2003
 - [2] "Le ROS-mètre HF, thème et variations", Radio-REF, décembre 2003
 - [3] "Lignes : un problème d'irrigation ?", Radio-REF, mai 2004.
 - [4] "Les lignes et les anges", Radio-REF, janvier 2009.
 - [5] "Retour sur le ROS-mètre F8DKK", Radio-REF, mai 2011.
 - [6] "ROS-mètre 137 kHz", Radio-REF, septembre 2012 (avec un erratum en novembre).
 - [7] "L'antenne G5RV", Radio-REF, novembre 2010.
 - [8] "Echange de puissance entre un générateur et une charge", Radio-REF, septembre 2003.
 - [9] "Rendement des amplis HF de puissance", Radio-REF, février 2005.
- Ces articles sont également consultables et téléchargeables sur le site de F6KRK : "www.blog.f6krk.org", rubrique "Articles membres", "F5NB", "Lignes et ROS-mètre" ou "Les Antennes" ou "Emission".
- [10] "http://f6fqx.chez-alice.fr/articlesF6FQX/article%20054/Lignes_HF_aspects_maths.pdf".

Notes.

- (1) "www.blog.f6krk.org", catégorie "Articles membres", "F5NB", "Divers".
- (2) Si la source n'a pas une impédance interne ayant une partie réactive conjuguée à celle de la charge (compensée parfaitement), l'énergie réactive non compensée provoque sa consommation (travail = puissance) par la source.
- (3) Attention, U ici est une constante. Donc le rapport entre puissance crête et puissance efficace est de 1,414 au lieu de 2 pour la charge.
- (4) A un facteur constant près, car on travaille sur des échantillons prélevés à l'aide de sondes. Ceci ne change pas les rapports entre les paramètres, rapports qui seuls nous intéressent.
- (5) Mathématiquement, V_r représente ici le coefficient de réflexion de la tension, c'est-à-dire la proportion de la tension incidente (V_i) qui est réfléchi (valeurs efficaces).
- (6) Avec une modulation d'amplitude, la modulation subit une atténuation de 3 dB pour une raie à $F = F_0 / 2Q$.
- (7) Ici on a pris des cas particuliers pour simplifier les diagrammes. Cela ne change rien au principe général.
- (8) Avec une ligne coaxiale $Z_0 = 50\Omega$, la self linéique est de 166 nH/m. La capacité linéique est de 66,66 pF/m. Si une ligne 50Ω de 1m de longueur physique présente une capacité de 100 pF, elle a une longueur électrique de $100/66,6 = 1,5$ m. Le facteur de vitesse dans la ligne est de $1/1,5 = 0,666$ et la permittivité relative du diélectrique est de $1,5^2 = 2,25$ (polyéthylène).
- (9) On obtient ainsi une ligne à retard $Z_0 = 50\Omega$ de $20 / 3 \cdot 10^8 = 66,6$ ns. Mais fabriquée de cette façon, sa bande passante est limitée.