

ROS : simulations sur une ligne de transmission.

Auteur : F6CSS
Version : V1.R7 2018-05-30

1) Introduction

L'utilisation d'un programme de simulation de circuits électroniques tel que Qucs [1] permet d'illustrer relativement facilement le comportement d'une ligne de transmission. Ce simulateur calcule les valeurs de courant et de tension sous la forme « amplitude - phase » (utilisation de nombres complexes) ce qui permet de déterminer des valeurs d'impédances, de coefficient de réflexion, de rapport d'onde stationnaire (ROS / SWR) et de puissances. Il sera également possible de simuler des mesures en utilisant le principe du « ROS-mètre » et de calculer l'amplitude des tensions associées au concept d'onde directe et d'onde réfléchi. Ces simulations permettront également de mettre en évidence, d'une manière simple, les problèmes d'adaptation d'impédance et de transfert de puissance dans le cas de lignes comportant des pertes. Veuillez noter que le contenu de ces pages est à considérer comme une tentative d'article d'initiation dans un cadre technique radioamateur.

2) Circuit utilisé pour la simulation

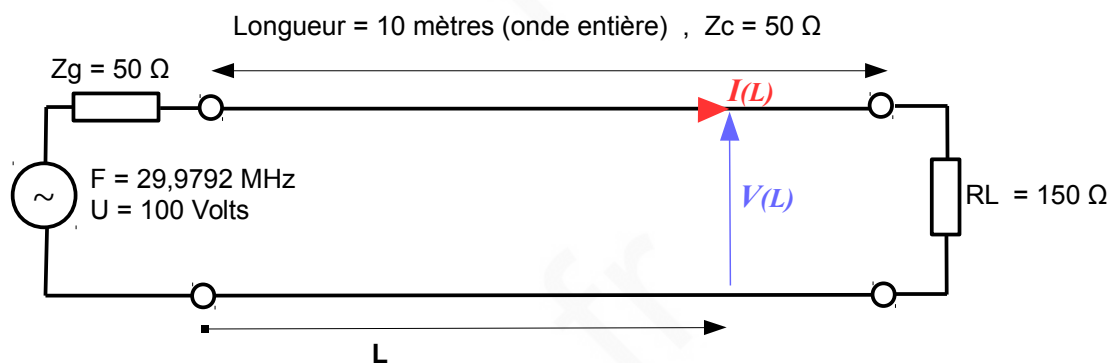


Fig. 1

L'impédance caractéristique de la ligne est purement réelle ($Z_c = 50 \Omega + j0$). Le coefficient de vélocité étant égal à 1, la longueur physique (10 mètres) sera identique à la longueur électrique ce qui correspond exactement à une longueur d'onde pour la fréquence utilisée.

Afin de mettre en évidence le phénomène d'onde stationnaire, la charge en extrémité de ligne n'est volontairement pas adaptée à l'impédance caractéristique de la ligne. Sa valeur est ici purement résistive ($R_L = 150 \Omega$).

Le générateur HF fournit un signal sinusoïdal dont l'amplitude est de 100 volts crête. L'impédance interne de ce générateur est égale à 50Ω .

La simulation (du type « AC » et fréquence constante) consistera à déterminer les valeurs de courant et de tension le long de la ligne. Le « point de mesure » sera situé à une distance L variable de 0 à 10 mètres à partir de la connexion côté générateur (Cf. fig. 1). **Dans un premier temps on considérera que la ligne ne comporte pas de pertes (facteur d'atténuation $\alpha = 0 \text{ dB}$).**

3) Tension et courant le long de la ligne

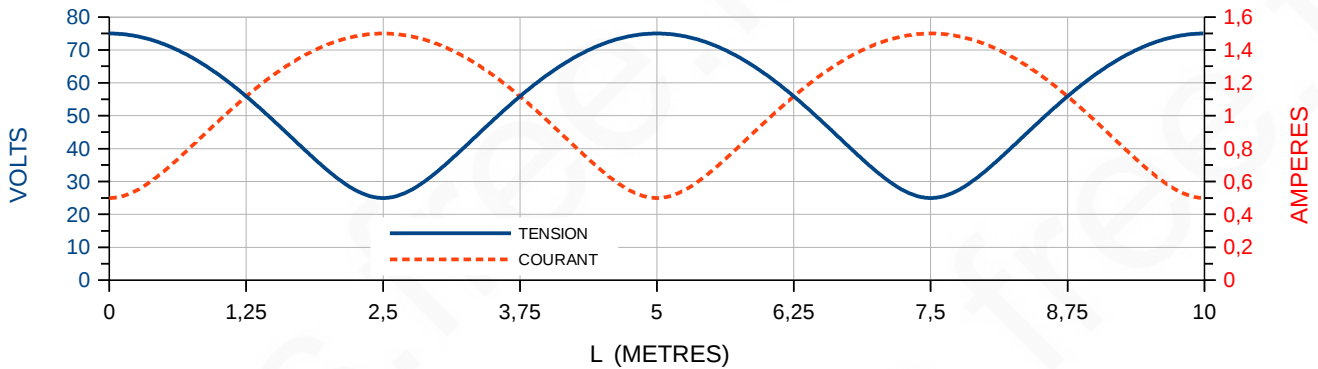


Fig. 2

La figure 2 représente les relevés en amplitude de la tension et du courant HF le long de la ligne pour des conditions de fonctionnement décrites au § 2. L'axe horizontal, gradué en mètres, correspond à la distance comptée à partir du générateur.

Du fait de la désadaptation d'impédance, l'amplitude de la tension n'est plus constante. Cette tension varie d'une manière périodique suivant une courbe qui, contrairement aux apparences, n'est pas sinusoïdale. La distance entre chaque minimum ou maximum est égale à 1/2 onde (5 mètres dans notre exemple) et la distance entre un minimum et un maximum est égale à 1/4 d'onde (2,50 mètres). Le **Rapport d'Onde Stationnaire** correspond au rapport entre une amplitude maximale et une amplitude minimale :

$$ROS = V_{\max} / V_{\min} \text{ soit } 75 \text{ V} / 25 \text{ V} = 3.$$

Le tracé de l'amplitude du courant présente la même allure que celui de la tension, mais décalé d'un 1/4 d'onde. A un minimum de tension correspond un maximum de courant et inversement. Le ROS peut aussi être calculé à partir des valeurs du courant :

$$ROS = I_{\max} / I_{\min} \text{ soit } 1,5 \text{ A} / 0,5 \text{ A} = 3.$$

D'un point de vue théorique, le ROS est fonction de la valeur du module du coefficient de réflexion de la charge*. Ce coefficient est fonction de l'impédance de la charge et de l'impédance caractéristique Z_c de la ligne. En considérant $Z_c = 50 \Omega$ et une charge purement résistive ($R = 150$, $X = 0$), le module du coefficient de réflexion de la charge par convention noté ρ (lettre grecque « rho »), se calcule à l'aide de la relation suivante :

$$\rho = \sqrt{\frac{(R - Z_c)^2 + X^2}{(R + Z_c)^2 + X^2}}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{(R - Z_c)^2}{(R + Z_c)^2}} = \sqrt{\frac{(150 - 50)^2}{(150 + 50)^2}} = 0,5$$

Comme $X = 0$,

A partir de la connaissance du module du coefficient de réflexion nous pouvons maintenant calculer la valeur du ROS et confirmer les mesures précédentes :

$$ROS = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = \frac{1 + 0,5}{1 - 0,5} = 3$$

* Le coefficient de réflexion Γ (gamma) est un nombre complexe dont le module est noté ρ (rho) et l'argument θ (thêta).

4) Impédance le long de la ligne

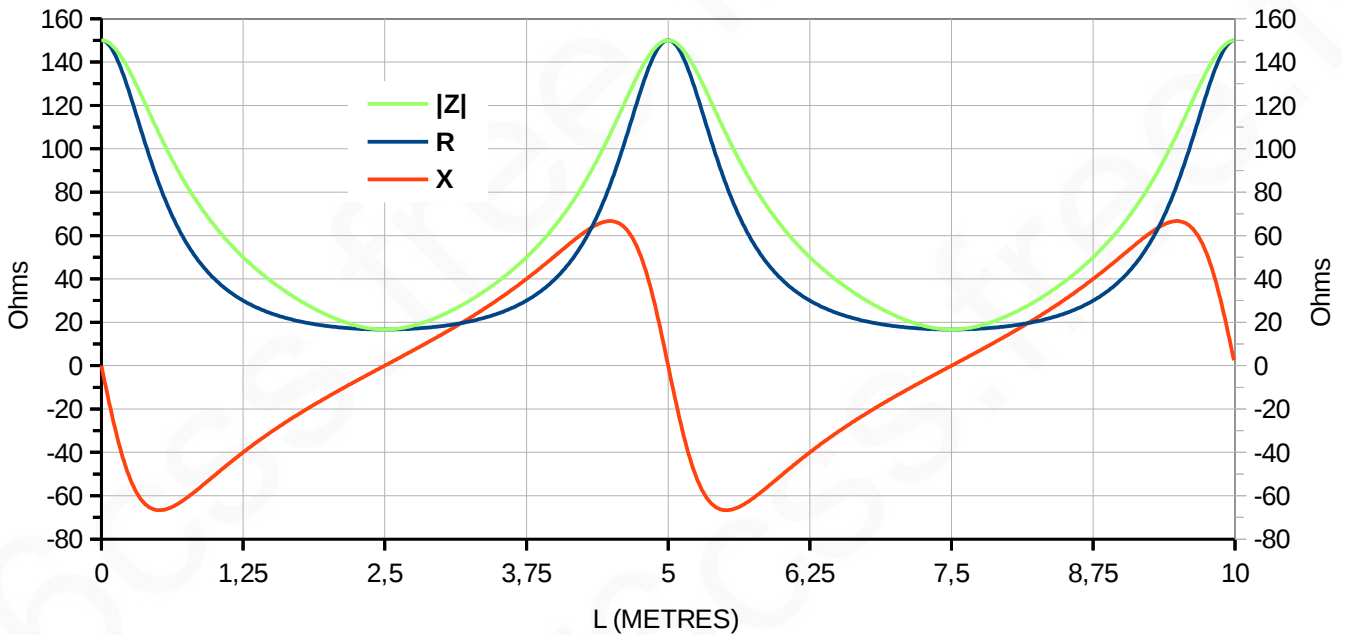


Fig. 3

La figure 3 illustre la variation de l'impédance le long de la ligne dans le cas d'un ROS = 3. Nous avons vu qu'en cas de désadaptation d'impédance, l'amplitude de la tension ou du courant n'est plus constante (cf. fig 2). L'impédance en chaque point est égale au rapport tension / courant et le déphasage entre la tension et le courant est variable. L'impédance pourra présenter des valeurs de réactances (jX) capacitives ou inductives.

Le fait d'avoir choisi une résistance de charge purement réelle ($X=0$) permet de localiser facilement quelques points particuliers. Pour $L=10$ mètres, la valeur de l'impédance est égale à $150 + j 0 \Omega$. On retrouve cette valeur d'impédance toutes les $1/2$ ondes ($L=5$ m, $L=0$). L'impédance est également réelle à $7,5$ mètres et $2,5$ mètres ce qui correspond à des multiples impairs de $1/4$ d'onde. Dans ce cas précis, l'impédance est égale à $Z_c^2 / 150 = 16,666 \Omega$ (propriété de transformation d'impédance des tronçons de ligne $1/4$ d'onde).

En dehors des points particuliers où l'impédance est purement réelle, nous observons que la réactance est capacitive ($-jX$) de 0 à $2,5$ mètres puis inductive ($+jX$) de $2,5$ mètres à 5 mètres (et ainsi de suite toutes les $1/2$ ondes).

Les courbes de la figure 2 et 3 correspondent au cas particulier d'une charge désadaptée purement résistive provoquant un ROS de 3. Il est possible d'obtenir des courbes analogues à partir d'impédances de charge dont les valeurs R et X appartiennent aux tracés de la figure 3. Exemples: $(30 - j40)$, $(30 + j40)$, $(92,4 + j66)$ etc. ...

Pour ces valeurs d'impédances de charge, nous retrouverons des valeurs identiques à celles des fig. 2 et 3 mais à des distances « L » différentes sur la ligne (rotation de phase du coefficient de réflexion).

5) ROS et désadaptation d'impédance

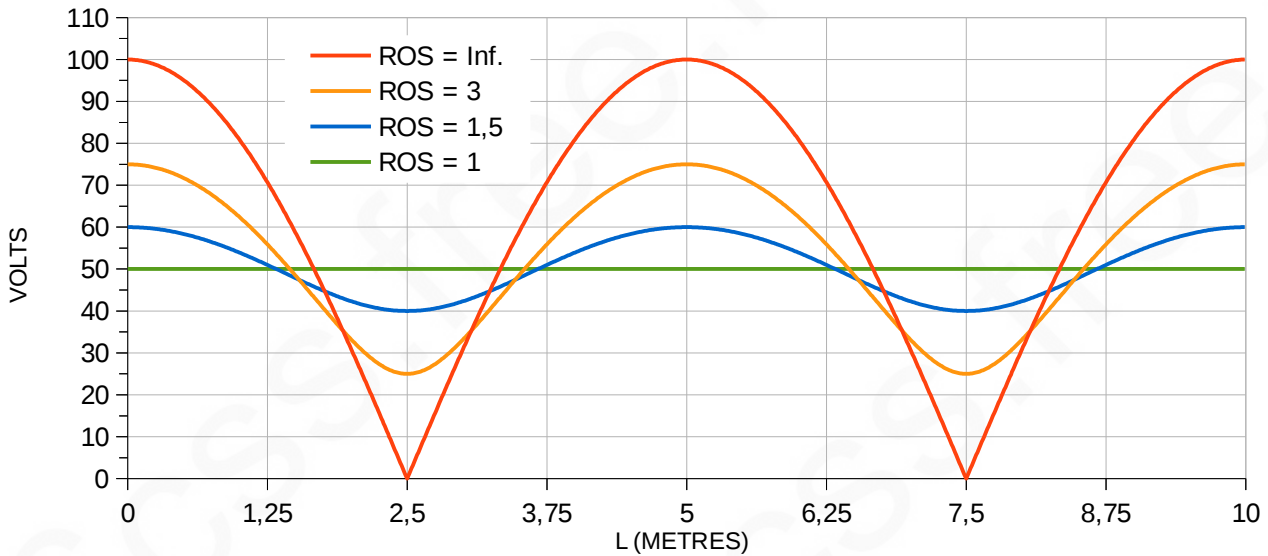


Fig. 4

La figure 4 illustre l'évolution du ROS pour différentes valeurs de charge : 50Ω (ROS=1), 75Ω (ROS=1,5), 150Ω (ROS=3) et circuit ouvert (ROS infini). Ces charges étant purement résistives, et de valeurs supérieures à 50Ω , les minimums et les maximums de tension sont localisés aux mêmes emplacements.

Pour une charge infinie, la réflexion est «totale » ce qui correspond à un module de coefficient de réflexion égal à 1. Dans ce dernier cas le ROS est infini (*rapport V_{max} / V_{min} avec $V_{min} = 0$*) et la ligne fonctionne en régime d'onde stationnaire pur.

Pour les valeurs de ROS égales à 1,5 et 3 la ligne fonctionne partiellement en régime d'ondes stationnaires. Quand l'adaptation est parfaite (ROS=1), la ligne fonctionne en régime d'ondes progressives. Le rapport tension / courant est ici égal à $50 \text{ Volts} / 1 \text{ Ampère}$, soit 50Ω tout le long de la ligne.

La figure 5 correspond à la variation de l'amplitude du courant pour les charges utilisées précédemment. On vérifiera facilement que l'on retrouve les valeurs de ROS à partir des valeurs maximales et minimales.

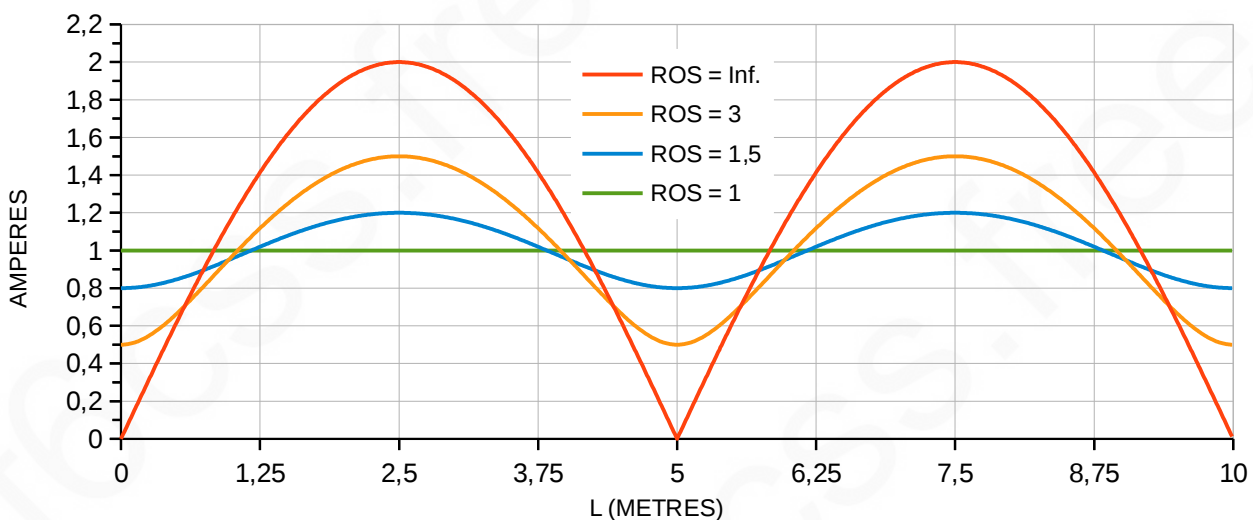


Fig. 5

6) Puissance transmise

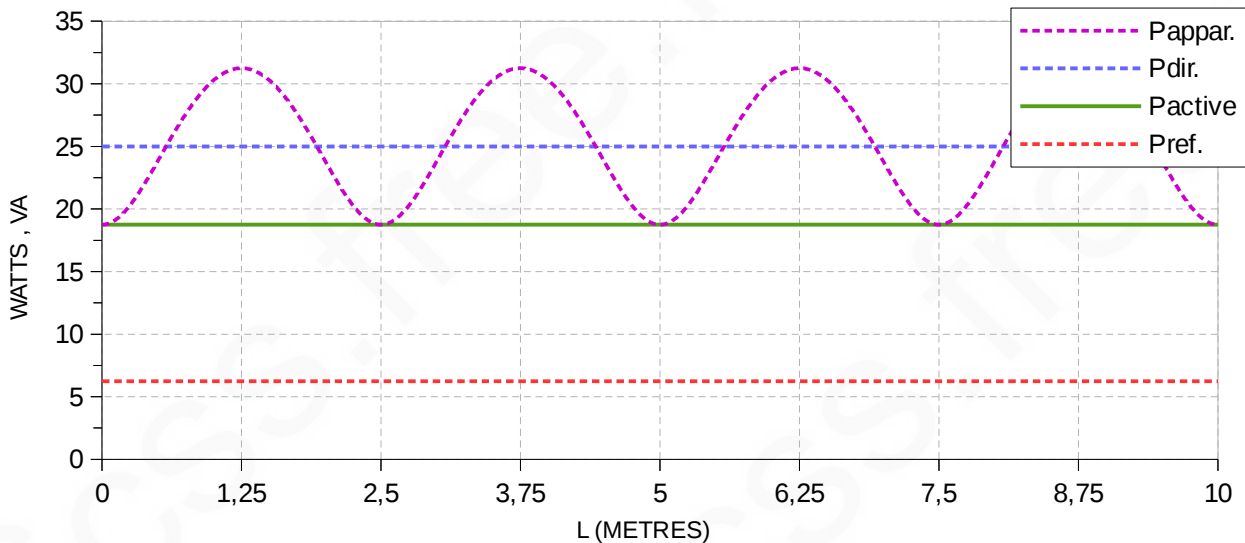


Fig. 6

La puissance maximale pouvant être délivrée par un générateur est maximale quand ce générateur est chargé par une résistance dont la valeur est égale à celle de sa résistance interne*. Le générateur d'impédance interne 50Ω utilisé dans cette simulation délivrera au maximum une puissance de 25 W (rendement 50%). Nous allons déterminer la puissance délivrée pour une charge de 150Ω ce qui correspond à l'impédance présente en « entrée de ligne » (Cf. fig. 3).

Tension en entrée de ligne (valeur crête) :
$$V_{in} = \frac{100 \times 150}{150 + 50} = 75 \text{ V}$$

Puissance fournie :
$$P = \frac{V_{in}^2}{2R} = \frac{75^2}{2 \times 150} = 18,75 \text{ W}$$

La figure 6 représente le relevé de puissances le long de la ligne. La puissance active est calculée à partir de la formule classique $P_{active} = V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$, avec φ (Phi) angle de déphasage entre la tension et le courant. **La ligne étant sans pertes, on retrouve bien la puissance initiale de 18,75 W au niveau de la charge (L=10 mètres) et ceci bien que le ROS soit égal à 3.**

La puissance apparente (unité VA) est obtenue par la relation : $P_{apparente} = \sqrt{P_{active}^2 + P_{réactive}^2}$. On peut vérifier que la puissance apparente est égale à la puissance active là où l'impédance est purement réelle (positions sur la ligne correspondant à des multiples entiers de $1/4$ d'onde (2,50 m) à partir de la charge, cette dernière étant purement résistive).

La « puissance directe » et la « puissance réfléchie » sont calculées à partir d'équations décrivant le fonctionnement des appareils de mesure du type « ROS-mètre / Wattmètre directif ». Un ROS-mètre mesure un coefficient de réflexion (module) et affiche une valeur de ROS. On vérifie au passage que la puissance active réellement transmise à la charge est bien égale à « Pdir - Pref » (25 W - 6,25 W = 18,75 W). La « puissance directe » et la « puissance réfléchie » peuvent être qualifiées de fictives [2]. Ces « puissances » sont calculées pour une impédance de 50Ω à partir des tensions directes et réfléchies. L'indication de puissance affichée par un « Wattmètre directif », correspondra à la puissance réellement transmise uniquement dans le cas où il y a adaptation d'impédance, c'est à dire « Pref. = 0 » (ROS = 1).

* Si l'impédance du générateur n'est pas purement réelle mais de la forme complexe $Z_g = R + jX$, le transfert maximum de puissance aura lieu pour une charge dont la valeur Z_l sera la valeur conjuguée de Z_g : $Z_l = Z_g^* = R - jX$.

7) Lignes avec pertes : tension , courant et ROS

Nous venons de voir au paragraphe précédent qu'une ligne désadaptée (mais sans pertes) peut transmettre à la charge la puissance délivrée par le générateur. Les pertes par unité de longueur peuvent être du type ohmique (Ω/m) et diélectrique (Siemens/m) et ces pertes varient en fonction de la fréquence. Dans les exemples suivants nous allons considérer que le ligne utilisée (fig.1) présente un facteur d'atténuation de 0,3 dB/m à 30 MHz . Sur une longueur de 10 mètres l'atténuation sera de 3 dB sur charge adaptée, soit 50 % de pertes de puissance. (Remarque : le facteur d'atténuation est ici volontairement élevé afin d'accentuer certains phénomènes dans les simulations).

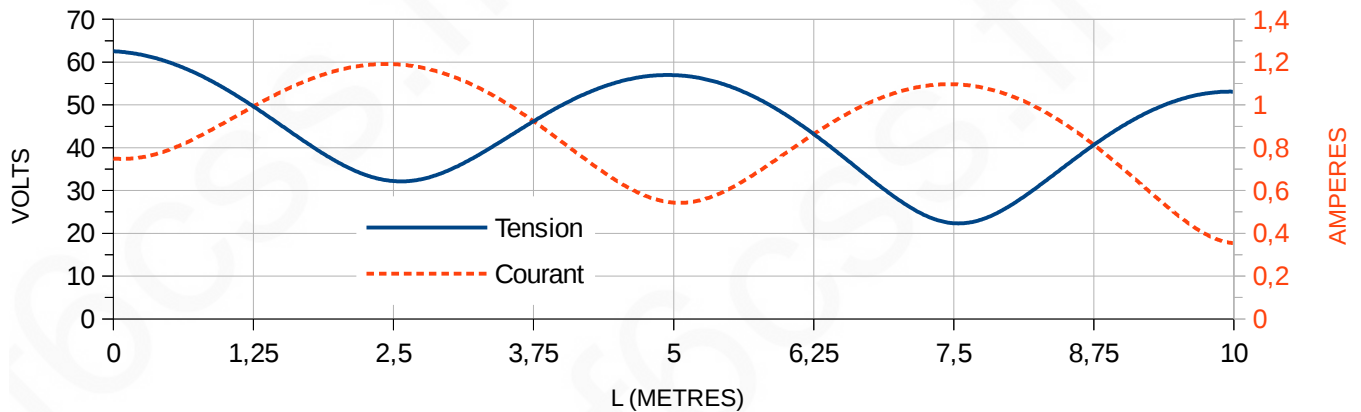


Fig. 7

La variation de la tension et du courant le long de la ligne fait apparaître une onde stationnaire mais avec des éléments nouveaux. Comparativement à la fig. 2, la tension en entrée ne s'établit plus à 75 v mais à 62,5 V (cf. fig. 7). On peut déjà envisager que l'impédance en entrée de ligne n'est plus égale à 150 Ω . Autre observation, l'amplitude de la tension décroît au fur et à mesure que la distance augmente. En ce qui concerne le courant, l'intensité est de 0,75 A pour L=0 et 0,35 A à L=10 m. Le module du coefficient de réflexion (et par conséquent la valeur associée de ROS) varie maintenant d'une manière continue le long de la ligne .

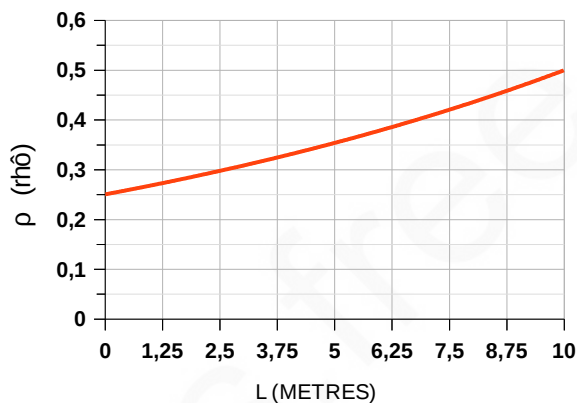


Fig. 8

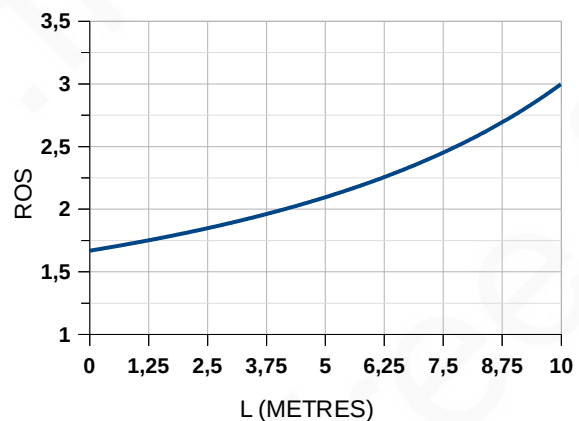


Fig. 9

A la distance L=10 m (charge) le module du coefficient de réflexion est égal à 0,5 (ROS = 3). Plus on se rapproche du générateur (émetteur) plus le module du coefficient de réflexion ρ diminue (fig. 8). Idem pour les valeurs de ROS associées (Cf. fig.9 , ROS =1,68 pour L=0). C'est un phénomène bien connu en pratique ; une mesure de ROS réalisée en « sortie de l'émetteur » ne représente pas la valeur exacte du « ROS au niveau de l'antenne ». Il faudra corriger cette mesure en tenant compte des caractéristiques de la ligne.

8) Lignes avec pertes : impédances

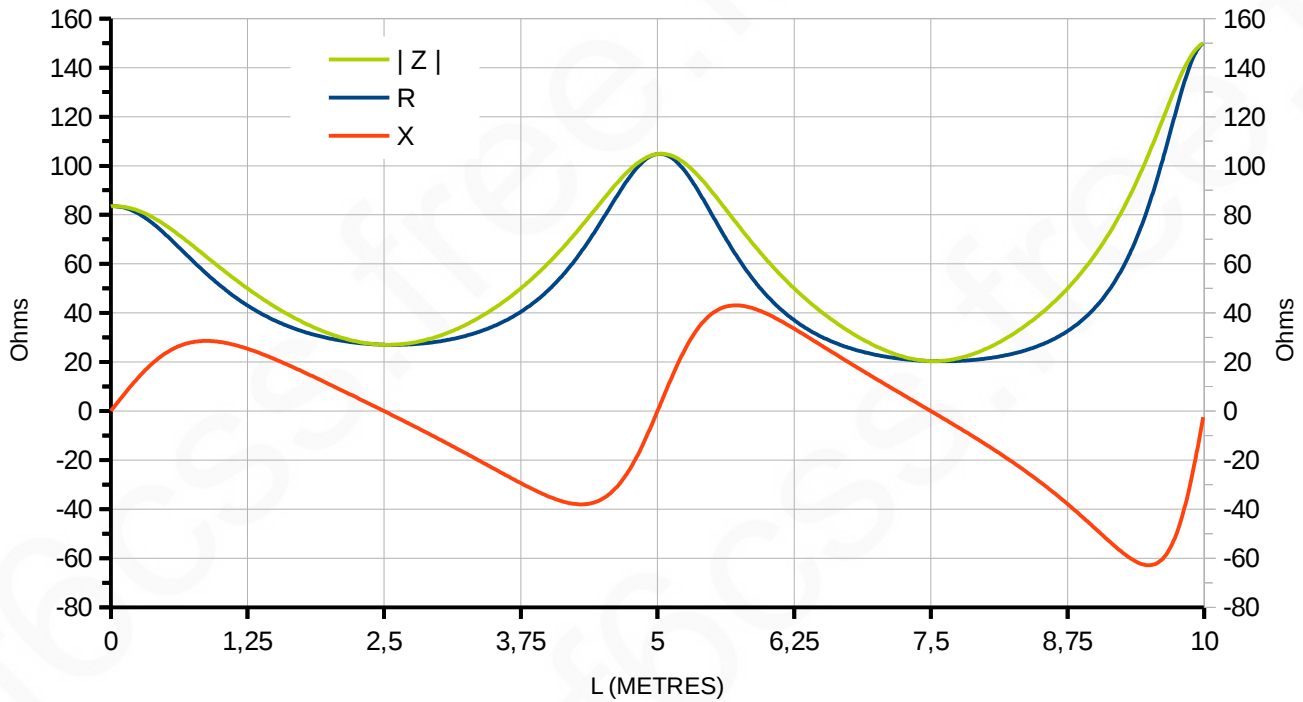


Fig. 10

Si l'on compare la fig. 3 à la fig. 10, on constate que les amplitudes minimales et maximales des termes R, X, $|Z|$ ont tendance à diminuer quand on s'éloigne de la charge. L'impédance de charge est de $150 + j0 \Omega$ ($L = 10 \text{ m}$) ; à $L = 5 \text{ m}$ ($1/2$ onde) la valeur passe à $105 + j0 \Omega$ puis $83,4 + j0 \Omega$ en entrée de ligne. Cette diminution progressive de l'impédance, typique des lignes de transmission désadaptées et comportant des pertes, se traduit par le tracé suivant sur un abaque de Smith :

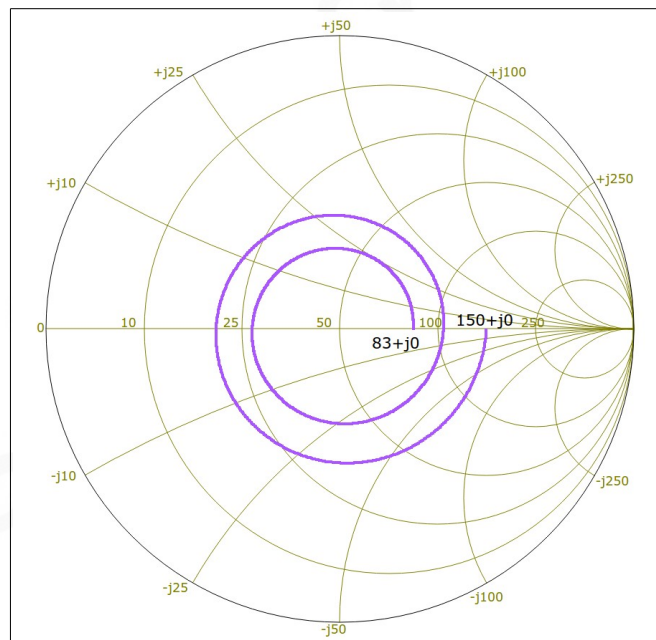


Fig. 11

Les valeurs d'impédances ne sont plus situées sur un cercle à « ROS constant » ($ROS=3$ dans les exemples précédents, ligne sans pertes) mais sur une courbe en forme de spirale dont le centre = Z_c . (Ligne $2 \times \frac{1}{2} \lambda$: on observe la rotation de $2 \times 360^\circ$ de la phase du coefficient de réflexion).

9) Lignes avec pertes : puissance transmise

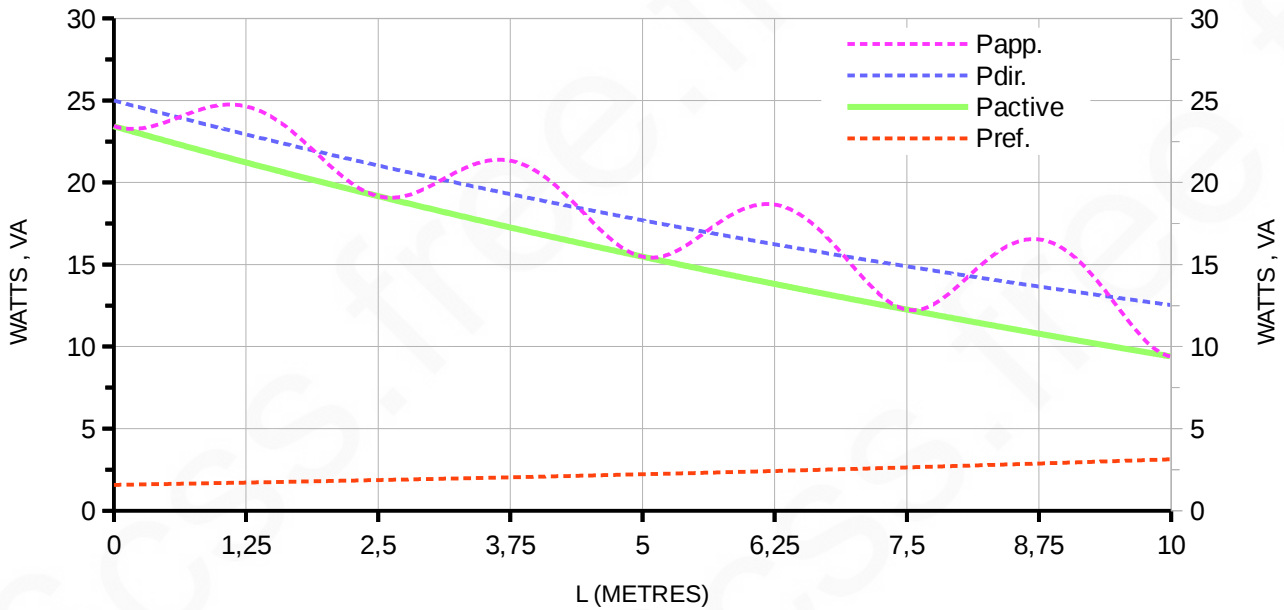


Fig. 12

L'atténuation normale de la ligne sur charge adaptée (en anglais paramètre *matched loss*) est de **3 dB**. La puissance active en entrée de ligne est de 23,4 Watts. La puissance active a été calculée de 0 à 10 mètres en utilisant la formule $P_{active} = V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$. Un calcul basé sur la relation $P_{active} = P_{dir} - P_{ref}$ (« Wattmètre directif ») retourne des résultats identiques. Au bout de 10 mètres, la puissance au niveau de la charge est de 9,4 Watts soit une atténuation de **3,96 dB**. Dans le cas de lignes à pertes on démontre que la présence de ROS amène des pertes additionnelles [3]. Les pertes ohmiques seront plus importantes dans les zones où le courant est le plus intense, quant au pertes diélectriques ces dernières seront plus importantes dans les zones où la tension est la plus élevée (cf. fig. 7).

La fig. 13 montre un exemple de calcul précis de pertes réalisé à l'aide du logiciel TLDetails [4]. Il s'agit ici d'un câble coaxial RG-213 de 100 mètres chargé par une résistance de 150 Ω. A 29 MHz, et sur charge adaptée, l'atténuation est de 3,087 dB. Les pertes additionnelles dues au ROS sont de 0,969 dB.

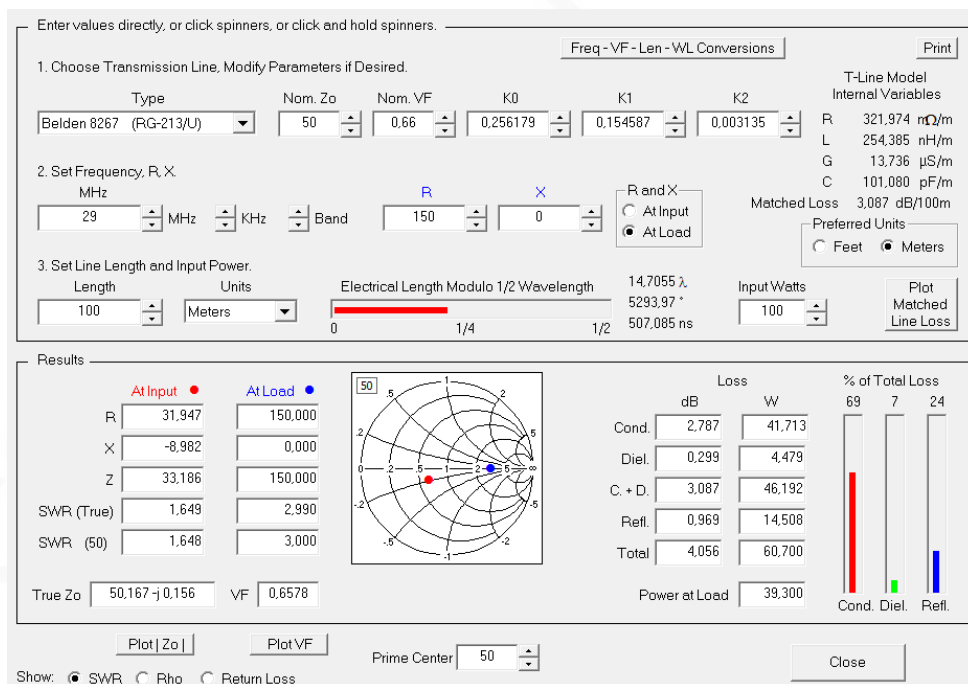


Fig. 13

10) Lignes avec pertes : adaptation d'impédance et transfert de puissance

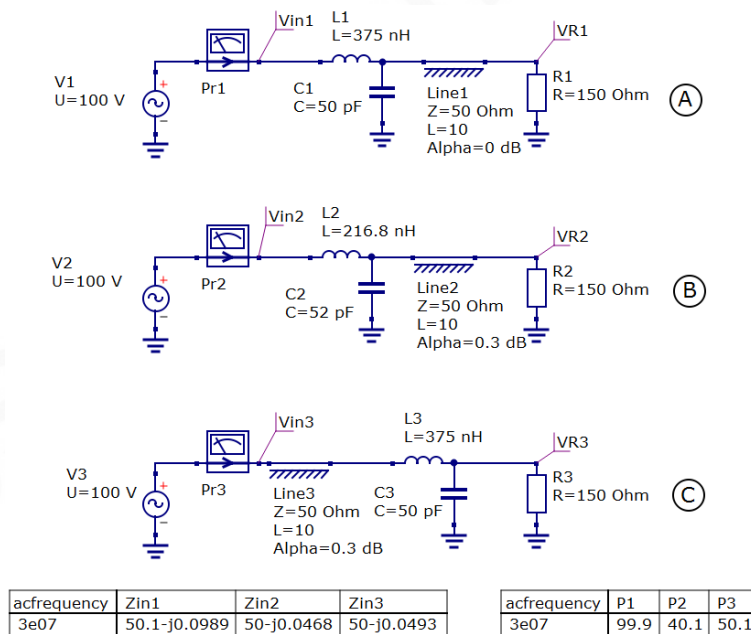


Fig. 14

La figure 14 illustre trois cas d'adaptation d'impédance. Le générateur de tension sinusoïdale simule un émetteur capable de fournir une puissance de 100 Watts sur une charge de $50\ \Omega$ ($U_{\text{crête}} = 100\ \text{Volts}$). Comme pour les simulations précédentes, la longueur de ligne est de 10 mètres (onde entière).

Dans le cas (A), l'impédance de charge étant de $150\ \Omega$, on retrouve cette valeur en entrée de la ligne sans pertes « Line1 » (N.B. : $\text{Alpha} = 0$). Le circuit L1-C1 transforme l'impédance (purement résistive) de $150\ \Omega$ en impédance de $50\ \Omega^*$. La puissance délivrée par le générateur sera donc de 100 Watts. La puissance dissipée dans R1 est également de **100 Watts**. Cette puissance a été intégralement transmise par la ligne malgré la désadaptation d'impédance ligne/charge (N.B. $\text{ROS} = 3$).

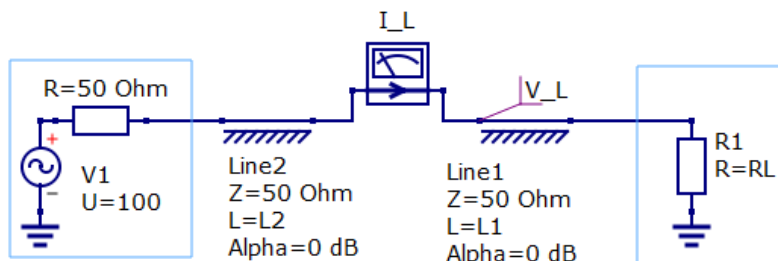
Dans le cas (B) la ligne présente un facteur d'atténuation Alpha de $0,3\ \text{dB/m}$. On transforme à l'aide du circuit L2-C2 l'impédance de $83\ \Omega$ présente en entrée de ligne vers les $50\ \Omega$ souhaités de façon à ce que le générateur délivre une puissance de 100 Watts. La puissance dissipée mesurée dans R2 est de **40 Watts** soit une atténuation de $3,97\ \text{dB}$. L'écart de $0,97\ \text{dB}$ correspond aux pertes additionnelles dues au ROS.

Dans le cas (C) on adapte l'impédance au niveau de la charge à l'aide du circuit L3-C3. La ligne est maintenant chargée par $50\ \Omega$. L'impédance en « entrée de ligne » étant égale à $50\ \Omega$ le générateur délivre une puissance de 100 Watts. A l'instar du cas (B), la ligne présente un facteur d'atténuation (Alpha) de $0,3\ \text{dB/m}$. La puissance mesurée dans R3 est de **50 Watts**, soit une atténuation de $3\ \text{dB}$.

En conclusion, en cas de désadaptation d'impédance d'une ligne de transmission dont les pertes ne sont pas négligeables, on aura tout intérêt à réaliser une adaptation d'impédance au niveau de la charge (antenne) afin d'éviter des pertes additionnelles.

* Pour ces trois simulations, les composants L et C ne comportent pas de pertes.

11) Circuit utilisé pour les simulations



ac simulation

AC1
Type=const
Values=[29.9792 MHz]

Parameter sweep

SW1
Sim=AC1
Type=lin
Param=L1
Start=0
Stop=10
Points=1001

Equation

```
Line
Zc=50
RL=150
L2=10 - L1
V_line_L=PlotVs(mag(V_L.v),L2)
I_line_L=PlotVs( mag(I_L.i) , L2 )
Z_line=V_L.v / I_L.i
Line_React_L=PlotVs( imag(Z_line) , L2)
Line_Res_L=PlotVs( real(Z_line) , L2)
Line_magZ_L=PlotVs( mag(Z_line) , L2)
RefCoef=(Z_line - Zc) / (Z_line + Zc)
RefCoef_L=PlotVs(RefCoef,L2)
P_activ_L=PlotVs(cos(arg(V_L.v) - arg(I_L.i)) * mag(V_L.v)* mag(I_L.i) *0.5 , L2)
P_react_L=PlotVs(sin(arg(V_L.v) - arg(I_L.i)) * mag(V_L.v)* mag(I_L.i) *0.5 , L2)
P_appar_L=PlotVs(sqrt(sqr(P_activ_L)+sqr(P_react_L)) , L2)
```

Equation

```
SWR_Meter
Va=V_L.v
Vb=I_L.i * Zc
Vdir=mag((Va + Vb) / 2)
Vref=mag((Va - Vb) / 2)
rho=Vref / Vdir
Pdir= (sqr(Vdir))/(2 * Zc)
Pdir_L=PlotVs( Pdir ,L2)
Pref= (sqr(Vref))/(2 * Zc)
Pref_L=PlotVs( Pref , L2)
Pwr=Pdir-Pref
Pwr_L=PlotVs(Pwr,L2)
SWR=(1 + rho) / (1 - rho)
SWR_L=PlotVs(SWR,L2)
rho_L=PlotVs(rho,L2)
```

Références :

- [1] Logiciel de simulation Qucs : <http://qucs.sourceforge.net>
- [2] F5NB F6FQX - Quelques idées reçues sur les lignes : <http://blog.f6krk.org/idees-recues-sur-les-lignes/>
- [3] AC6LA - Additional Loss Due To SWR : <http://www.ac6la.com/swrloss.html>
- [4] AC6LA - Transmission Line Details : <http://www.ac6la.com/tldetails1.html>