

ROS , TOS , SWR , Coefficient de réflexion ?

Introduction

Le but de ces pages est de tenter d'expliquer quelques **notions de base** concernant la vérification du fonctionnement d'une ligne de transmission HF (adaptation d'impédances, ondes stationnaires) et ceci dans le cadre d'activités **radioamateur**.

N.B.: - On considérera pour la suite que les lignes de transmission ne comportent pas de pertes d'atténuations.

- Le lecteur à la recherche de démonstrations mathématiques pointues sera prié de consulter des sites ou des ouvrages spécialisés.

1) Mesures sur une ligne de transmission en HF

On trouve souvent dans une station radioamateur un appareil couramment appelé «**ROS-mètre**» ou «**TOS-mètre**» (SWR-meter en anglais). Cet appareil, généralement constitué d'un **coupleur directif** associé à un **détecteur d'amplitude**, est intercalé entre l'arrivée du câble d'antenne et la sortie de l'émetteur.

En pratique on mesure sur la ligne de transmission l'**amplitude** de la **tension directe** et l'**amplitude** de la **tension réfléchie**. La connaissance de ces deux valeurs permet de déterminer l'amplitude (on dit aussi le module) du **COEFFICIENT DE RÉFLEXION**.

On obtient le module du coefficient de réflexion en divisant l'amplitude de la tension réfléchie par l'amplitude de la tension directe. Le résultat pourra évoluer de **0** (absence de tension réfléchie) à **1** (réflexion totale, par exemple ligne « ouverte » ou ligne en court circuit).

Par convention on note le module du coefficient de réflexion par la lettre grecque ρ (rhô).

$$\rho = \frac{V_{\text{réfléchie}}}{V_{\text{directe}}}$$

Nous verrons plus loin la définition du **ROS** est sa relation avec le coefficient de réflexion.

Le module du **coefficient de réflexion** peut aussi être déterminé en mesurant la **puissance directe** et la **puissance réfléchie**. C'est par exemple le cas avec un Wattmètre directif (genre Bird 43). On utilise alors la relation suivante :

$$\rho = \sqrt{\frac{P_{\text{réfléchie}}}{P_{\text{directe}}}}$$

2) Ondes stationnaires

Quand l'**impédance de l'antenne** (ou plus généralement de la charge) est **différente** de l'impédance caractéristique de la ligne de transmission on dit qu'il y a désadaptation d'impédances. La puissance HF, qui **se propage** sous la forme d'une onde progressive est partiellement réfléchie au niveau de l'antenne (charge). Cette puissance réfléchie va à son tour **se propager** dans le sens **antenne vers émetteur**. Il va alors se produire un phénomène **d'interférences** entre l'onde **directe** (on dit aussi incidente) et l'onde **réfléchie**.

En certains points de la ligne ces deux ondes seront **en phase** ; l'amplitude résultante de la tension est alors maximale (V_{max}) . En d'autres points de la ligne l'onde réfléchie sera en **opposition de phase** avec l'onde directe ; l'amplitude résultante sur la ligne sera minimale (V_{min}) .

$$\begin{aligned} V_{\text{max}} &= V_{\text{directe}} + V_{\text{réfléchie}} \\ V_{\text{min}} &= V_{\text{directe}} - V_{\text{réfléchie}} \end{aligned}$$

Le rapport d'ondes stationnaires (R.O.S.) est défini par la relation suivante :

$$R.O.S. = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}$$

La valeur du ROS évoluera entre **1** et l'**infini** (∞) .

3) Mesure des ondes stationnaires sur une ligne de transmission

Pour effectuer **réellement** une mesure d'ondes stationnaires, il faudrait **déplacer une sonde le long de la ligne** afin de rechercher les minima et les maxima de tension (ou de courant). Ces mesures nécessitent un équipement très spécifique. Dans le cas d'une ligne bifilaire on peut envisager d'utiliser, par exemple, des contacts glissants et un voltmètre HF à haute impédance. Pour les lignes coaxiales on peut utiliser une ligne coaxiale rigide fendue (diélectrique air) comportant une sonde détectrice montée sur un chariot coulissant. Ces manipulations sont très intéressantes en laboratoire, souvent à des fins didactiques, mais peu pratiques pour l'exploitation courante d'une station radio(amateur) !

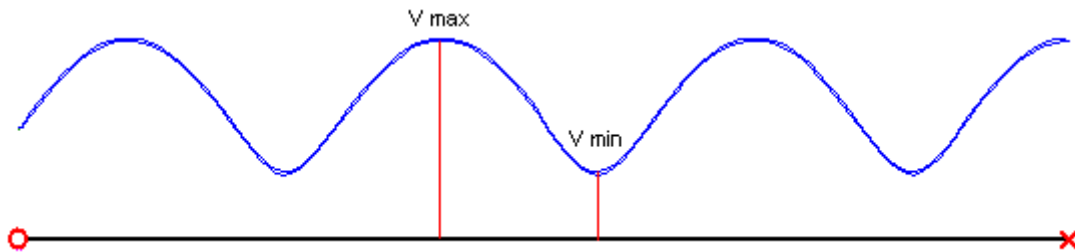


Fig. 1

La figure 1 illustre le cas d'un **relevé d'amplitude** de tension HF effectué **le long** d'une ligne de transmission. Le générateur HF est symbolisé par le petit cercle et la charge par la croix. La valeur de l'impédance de charge étant ici différente de l'impédance caractéristique de la ligne, il y a réflexion de puissance au niveau de la charge. L'onde réfléchie interfère avec l'onde incidente ce qui provoque une « **ondulation** » de l'amplitude de la tension HF tout le long de la ligne. Ce tracé des **variations d'amplitudes** représente un phénomène appelé **ondes stationnaires** (*dans ce cas précis ondes quasi stationnaires*). Le relevé des amplitudes indique que le **Rapport d' Ondes Stationnaires V_{max} / V_{min}** est ici égal à 3. L'espacement entre deux minima (ou maxima) est égal à une $\frac{1}{2}$ **longueur d'onde**. Du fait de l'aspect **stationnaire** du phénomène, on retrouve les minima et les maxima à des **emplacements fixes**. La puissance transportée dans la ligne étant **constante**, un maximum de tension correspond à un minimum de courant (et inversement). Comme les valeurs de tension et de courant varient, on en déduit que l'impédance présentée en chaque point de la ligne ne sera plus constante.

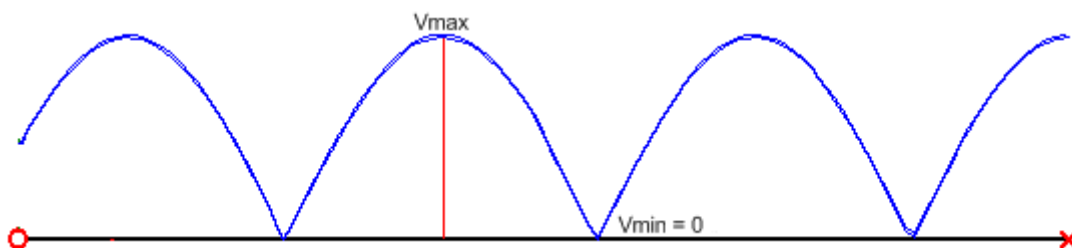


Fig. 2

La figure 2 correspond à une ligne « ouverte » (charge déconnectée). La réflexion de l'énergie en extrémité de ligne est **totale**. Le coefficient de réflexion = 1 puisque $V_{réfléchie} = V_{directe}$. Comme $V_{min} = V_{directe} - V_{réfléchie} = 0$, le ROS présentera alors une valeur **infinie** (division par 0). La ligne fonctionne en régime d'ondes stationnaires.



Fig. 3

La figure 3 montre un ROS pratiquement égal à 1 (Ici $V_{max} = V_{min}$, $V_{réfléchie} = 0$). Il n'y a pas d'onde réfléchie (impédance de charge = impédance caractéristique de la ligne, $\rho = 0$) donc pas de phénomène d'ondes stationnaires. **L'amplitude de la tension (ou du courant) HF est constante tout le long de la ligne**. On dit alors que le système fonctionne exclusivement en régime d'ondes progressives directes.

4) Relation entre R.O.S. et coefficient de réflexion.

On peut facilement exprimer le R.O.S. en fonction de ρ :

$$R.O.S. = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{directe} + V_{réfléchie}}{V_{directe} - V_{réfléchie}} = \frac{1 + \frac{V_{réfléchie}}{V_{directe}}}{1 - \frac{V_{réfléchie}}{V_{directe}}}$$

comme $\frac{V_{réfléchie}}{V_{directe}} = \rho$ nous obtenons

$$R.O.S. = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$$

La relation entre ROS et ρ permet d'établir des courbes ou des tableaux de correspondances :

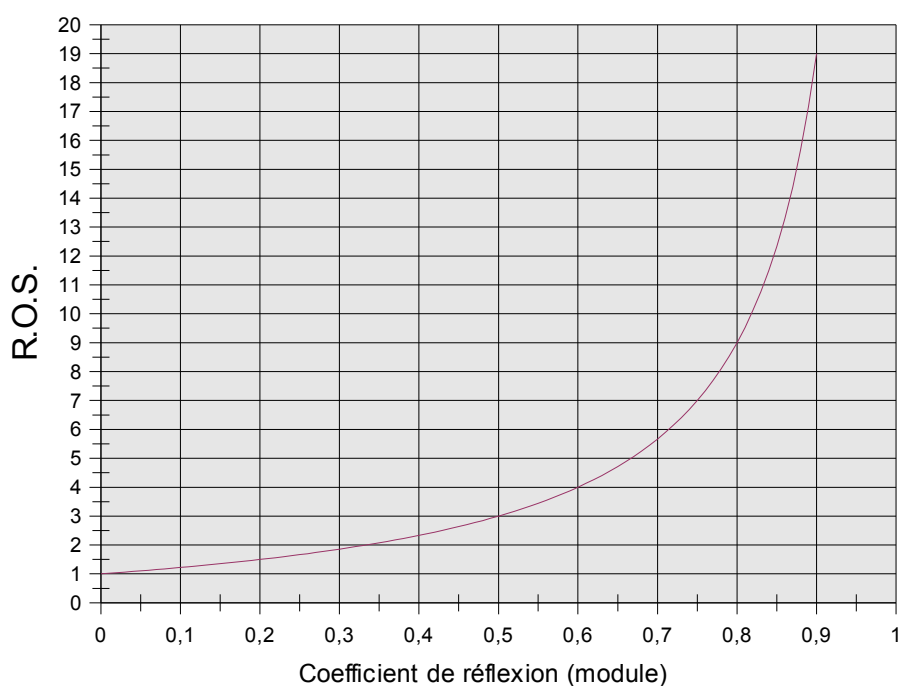
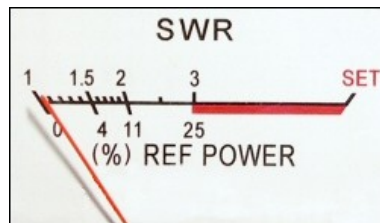


Tableau de correspondance $\rho \leftrightarrow$ **R.O.S.** pour quelques valeurs :

ρ	R.O.S	$\rho^2 = P \text{ réfl.} / P \text{ dir.}$	
0	1	0	
0,05	1,11	0,25 %	
0,10	1,22	1 %	
0,15	1,35	2,5 %	
0,20	1,50	4 %	
0,25	1,67	6,25 %	
0,30	1,86	9 %	
0,35	2,08	12,25 %	
0,40	2,33	16 %	
0,45	2,64	20,25 %	
0,50	3	25 %	
1	∞	100 %	

5) ROS ou coefficient de réflexion ?

Nous savons qu'il est beaucoup plus simple de mesurer l'**amplitude (ρ)** du **coefficient de réflexion** en un point donné et d'en déduire **ensuite** la valeur correspondante du ROS. Alors pourquoi les appareils de mesures sont-ils gradués en ROS et non en « ρ » ? Il y a d'abord une raison historique à l'utilisation du ROS qui provient de l'époque où les mesures consistaient à relever manuellement l'amplitude des ondes stationnaires le long d'une ligne et à reporter ensuite les résultats (avec crayon, compas et gomme !) sur un abaque de Smith. Le coefficient de réflexion, symbolisé par la lettre grecque Γ (gamma), est formellement un nombre complexe. En représentation vectorielle Γ est composé d'un **module ρ** (*amplitude*) et d'un **argument θ** (*thêta, angle de phase*). Par contre le ROS est un nombre réel dont les valeurs sont faciles à exploiter sur un indicateur « analogique » (exemples: 1,1...1,3...1,5).



Sur les modèles simples de ROS-mètre une mesure s'effectue en 2 temps:

- ❶ position DIR (ou FWD) et émission d'une porteuse non modulée pour une calibration « en fond d'échelle » (SET)
- ❷ retour en position REF pour une lecture sur l'échelle graduée en ROS (SWR). L'échelle en % correspond au **coefficient de réflexion en puissance (ρ^2)**.

6) Précision des mesures du coefficient de réflexion

La précision des mesures est liée à la caractéristique de directivité du coupleur directif utilisé dans le ROS-mètre. Il ne faut pas que la mesure de l'amplitude de l'onde réfléchie soit perturbée par le niveau d'amplitude de l'onde directe. On considère qu'une directivité d'au moins 40 dB est nécessaire si l'on ne souhaite pas mesurer des valeurs trop fantaisistes. Par exemple pour un ROS = 3 et une directivité de 30 dB, les indications pourront varier de 2,7 à 3,35 en fonction de l'emplacement de l'appareil de mesure sur la ligne.

De plus, comme les lignes de transmission présentent des pertes par atténuations, les niveaux relatifs de puissances directes et réfléchies vont varier en fonction de la longueur (le ROS n'est alors plus constant). Si l'on ne tient pas compte de cette atténuation une mesure "en début de ligne" indiquera une valeur de ρ plus faible que la valeur réellement présente au niveau de l'antenne (charge).

7) « Analyseurs d'antennes »

Parmi les appareils de mesures disponibles pour les radioamateurs il existe aussi des « analyseurs d'antennes ». Il s'agit le plus souvent d'un pont d'impédance plus ou moins sophistiqué que l'on connecte à la place de l'émetteur. Ces appareils sont calibrés pour une impédance caractéristique de ligne égale à 50 ohms. L'analyseur comporte un générateur (V)HF associé à un fréquencemètre. On mesure généralement le module du coefficient de réflexion et l'impédance. Après conversion analogique-numérique, un micro-contrôleur permet de déterminer par calcul la valeur du ROS (SWR) ainsi que l'impédance sous la forme « résistance **R** et réactance **X** » (entre autres).



© VK5JST

8) Et le TOS ?

Le sigle **T.O.S.** signifie **Taux d' Ondes Stationnaires**. Notez bien que l'on fait référence ici à des d'ondes **STATIONNAIRES**. La définition du TOS provoque une certaine confusion, et c'est un euphémisme, dans la littérature radioamateur (voire cibiste). On peut lire souvent les affirmations suivantes:

- « C'est un taux donc il s'agit obligatoirement d'un pourcentage ... »

L'expression d'un taux en % n'est pas une obligation ! Par définition un taux est d'abord un rapport (proportion) entre 2 quantités. Pour les plus sceptiques voici quelques exemples de taux qui ne s'expriment pas en % (et dont je vous laisse le soin de deviner les unités mises en jeu):

Le taux de transfert d'information d'un disque dur ou d'une « clé USB », le taux de montée d'un aéronef, le taux de compression d'un moteur, le taux de change entre devises ... etc.

- « Le **TOS** est le rapport (en %) entre l'amplitude de l'onde **Réfléchie** et l'amplitude de l'onde **Directe** (incidente) »

FAUX ! Ce rapport correspond à une définition bien précise dans la théorie des lignes de transmission il s'agit du Coefficient de Réflexion.

- « Le **TOS** est le rapport (en %) entre la puissance **Réfléchie** et la puissance **Directe**. »

FAUX ! Ce rapport de puissances correspond au Coefficient de Réflexion en Puissance. Il s'agit précisément du module du coefficient de réflexion (tension, courant) élevé au carré ($\rho^2 = P_{\text{ref}} / P_{\text{dir}}$).

en réalité T.O.S. = R.O.S. = S.W.R. !

Quelques remarques:

- Bien que liés, il faut distinguer l'aspect **propagation - réflexion** (onde progressive **directe** et **réfléchie**, **coefficient de réflexion**) de l'aspect **interférences** et **ondes stationnaires** (ROS, TOS, SWR) donnant lieu à des **minima** et des **maxima** de tension (ou de courant) situés à des positions fixes le long de la ligne.
- Exprimer en % un coefficient de réflexion en puissance n'est pas interdit. Exemple: $\rho^2 = 0,25$ est équivalent à 25 % de **puissance réfléchie** (et non pas un « TOS de 25 % » !).
- La confusion entre le TOS et le coefficient de réflexion se « propage » depuis des décennies dans les revues amateurs francophones. Ce phénomène est accentué avec les publications par Internet (*).

(*) Exemples: Ouvrage « La pratique des antennes par F3LG », plus actuel « définitions Wikipedia » etc. etc. etc.

9) Conclusions

Tout d'abord une petite suggestion pour les publications radioamateurs francophones: utiliser de préférence les termes « ROS » et « pourcentage de puissance réfléchie ». Le sigle T.O.S n'est pas à bannir totalement mais à condition d'utiliser sa définition correcte. (Ce sigle est souvent utilisé dans certains ouvrages de référence traitant de la théorie des lignes de transmission).

Les radioamateurs anglophones n'ont pas ces soucis de sémantique. Ils utilisent uniquement le terme **SWR** pour *Standing Waves Ratio*. Il existe aussi (V)SWR pour (*Voltage*) *Standing Waves Ratio* afin de préciser que la mesure du niveau d'ondes stationnaires le long de la ligne fait référence à l'amplitude des tensions.

Vous trouverez sur la page suivante un exemple de calcul utilisant les « outils » que l'on trouve sur un abaque de Smith (*abaque permettant la détermination des impédances et admittances le long d'une ligne de transmission*) . Pour un **coefficient de réflexion** (tension ou courant) dont le module est égal à **0,5** nous pouvons déduire que **50 %** de la tension directe (donc **25 %** de la puissance directe) est **réfléchie** par la charge.

Ceci provoquera le long de la ligne de transmission un phénomène d' **Ondes Stationnaires** avec une proportion (rapport, coefficient, ratio, facteur, taux...) de **3** (cf fig. 1) entre les valeurs de **tensions maximales** et **minimales**.

- Coefficient de réflexion (tension ou courant)	= 0,5	
- Coefficient de réflexion (Puissance)	= 0,25	(6dB)
- T.O.S (taux d'ondes stationnaires)	= 3	(9,54 dB)

