Fonctionnement du ROS-mètre HF

F5NB, Robert BERRANGER.

L'auteur tient à remercier F6BPS pour son dévouement à la relecture de cet article. Celui-ci a été publié dans Radio-REF de mars 2003.

Qu'est-ce qu'un ROS-mètre ?

Cet article ne répondra à la question que d'un point de vue comportemental, sans recourir à une formulation savante. L'étude détaillée et les méthodes pour réaliser quelques ROS-mètres feront l'objet d'un autre article.

Le ROS-mètre est un appareil qui permet de connaître le Rapport d'Ondes Stationnaires dans une ligne de transmission d'énergie électromagnétique si son impédance caractéristique est égale à celle de la ligne. Sinon, le ROS-mètre indique seulement une désadaptation, soit le rapport qu'il y a entre l'impédance de la charge ramenée à sa sortie et son impédance caractéristique.
Le ROS-mètre ne peut pas mesurer directement des ondes stationnaires, car il faudrait faire des mesures en deux endroits décalés de $\lambda/4$. Or il effectue ses mesures en un seul point de la ligne.
Dans cet article, nous partirons d'une hypothèse, puis nous regarderons si les mesures effectuées par le ROS-mètre confirment cette hypothèse. Ce qui ne veut pas dire que deux hypothèses différentes ne puissent exister. Mais ce débat fera l'objet d'un autre article.

Hypothèse de départ.

Les ondes stationnaires sont le résultat de variations de champs magnétique et électrique le long de la ligne. Par ailleurs, ces champs sont proportionnels au courant et à la tension en chaque point de la ligne. Si la tension et le courant varient le long d'une ligne, quand il y a du ROS, l'énergie elle, reste constante s'il n'y a pas de pertes. Il suffit alors de mesurer les rapports courant / tension, en amplitude et en phase, en n'importe quel point, et de les comparer aux valeurs nominales pour en déduire un déséquilibre qui est égal au ROS. Ce raisonnement suppose une seule source de puissance et une seule charge. C'est à dire que s'il existe plusieurs types de puissances, elles sont **corrélées** car provenant d'une seule source. Cela suppose aussi que le signal de mesure soit stationnaire, c'est à dire, invariant pendant le temps de la mesure.

Analyse comportementale et justification mathématique.

La mesure faite par le ROS-mètre procède du principe suivant :
Lorsqu'une charge est adaptée, les valeurs de la tension et du courant sont dans un rapport bien précis, et il n'y a aucun déphasage entre elles. S'il y a désadaptation, le rapport tension/courant change, et/ou un déphasage apparaît entre les deux. Ce sont ces modifications qui sont mesurées par le ROS-mètre et permettent de calculer une valeur de désadaptation.
Tous les ROS-mètres qui font leur mesure en un seul point, effectuent les opérations suivantes :
- mesure de la tension à l'aide d'une sonde, soit V1
- mesure du courant avec une sonde et transformation en tension à l'aide d'une résistance, soit V2

- par construction, on s’arrange pour que lorsque la charge est égale à la valeur nominale, V2 = V1.
- par addition vectorielle, on obtient Vi = V1 + V2
- par soustraction vectorielle, on obtient Vr = V1 – V2

Or il se trouve qu’en valeurs absolues, le module de Vr divisé par le module de Vi est égal au coefficient de réflexion sur la ligne de liaison à la charge si l’impédance de la dite ligne est égale à celle du ROS-mètre. Ceci peut être démontré mathématiquement, mais ici nous nous contenterons de le vérifier pour quelques cas particuliers.

Le ROS-mètre est un appareil qui permet donc de calculer le coefficient de réflexion qui est égal à : |moduleVr| / |moduleVi|.
La valeur absolue du module d’un signal alternatif est obtenue par détection, ce qui est le cas pour le ROS-mètre. Dans la suite de cet article, les références à Vi et Vr seront relatives à leurs modules en valeur absolue.
L’addition vectorielle se fait en mettant en série les deux tensions et en mesurant la tension résultante.
La soustraction vectorielle s’effectue par addition vectorielle des deux tensions, l’une des deux ayant subi un déphasage de 180° (Soustraire le vecteur C du vecteur B, c’est par définition, additionner le vecteur conjugué du vecteur C au vecteur B).
Voir figure 1 un exemple graphique d’addition et de soustraction vectorielles .

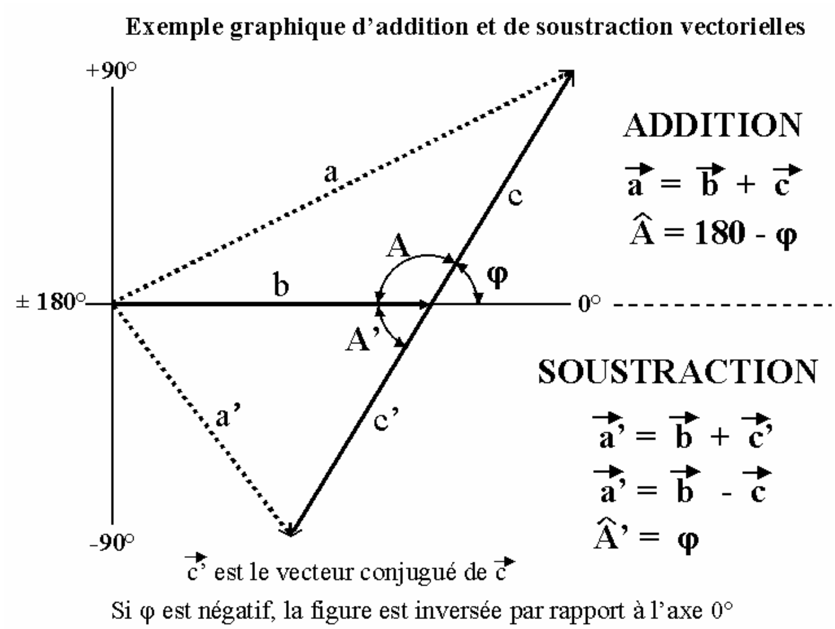

Figure 1

La formule de l’opération réalisée par le ROS-mètre que nous utiliserons pour le calcul du module du vecteur somme de deux autres vecteurs dérive des propriétés du triangle. Elle permet de calculer un côté si l’on connaît les deux autres côtés et l’angle opposé.
Soit (a) le côté à calculer, (b) et (c) les deux autres côtés et (A) l’angle opposé, nous avons :

$$a = \sqrt{\left(b^2 + c^2 - 2bc\cos(A)\right)} \quad \text{ou} \quad a = \sqrt{\left(b^2 + c^2 + 2bc\cos(180 + A)\right)}$$

dans notre cas, A = 180 – |φ|, (|φ| ≤ 90°), alors la formule devient :

$$a = \sqrt{\left(b^2 + c^2 + 2bc\cos(\varphi)\right)}$$

pour l'addition, (-cos φ) = cos (180-φ), et avec A’ = |180-(180+φ)| = |φ| :

$$a' = \sqrt{\left(b^2 + c'^2 - 2bc'.\cos(\varphi)\right)}$$

pour la soustraction.

Pour nous, a = Vi , a' = Vr, b = V1, c =V2 , c' = V2 déphasé de 180°, et φ = déphasage entre V1 et V2.
Ceci nous donne en remplaçant V1 et V2 par l'objet de leur mesure :

$$Vi = abs(\sqrt{U^2 + [I.R]^2 + (2.I.R.\cos(\varphi))}),^{(1)}$$

$$Vr = abs(\sqrt{U^2 + [I.R]^2 - (2.I.R.\cos(\varphi))}),^{(1)}$$

avec d'une part, P = U x I et P = U² / R, R étant l'impédance nominale (référence), et d'autre part, φ = angle de déphasage entre le courant et la tension.

N-B : *Nous avons pris V1 comme référence angulaire car c'est le plus souvent le cas dans les ROS-mètres, mais nous pourrions prendre aussi bien V2 comme référence. Alors, il faudrait utiliser un déphaseur 180° pour la tension au lieu du courant (voir plus loin le schéma 2).*

En électricité, le déphasage entre tension et courant se trouve dans une plage de +/- 90° maximum. Ceci entraîne que Vi ne peut être que supérieur ou égal à Vr. Si nous mesurions l'inverse, cela voudrait dire que φ serait plus grand que 90°, ce qui est impossible. En fait, nous aurions tout simplement branché le ROS-mètre à l'envers.

Cas particulier où φ = 0 (antenne à la résonance avec ligne adaptée) :
Alors Vi = U + (I x R)
Et Vr = U – (I x R).
N-B : le rapport Vr / Vi ne change pas si on applique des coefficients k1, k2 et k3 aux termes U, I et R tels que k1 = (k2 . k3). Si R est égale à la résistance nominale, alors k1 = k2. En pratique, les coefficients k1 et k2 sont nettement inférieurs à 1 (sondes atténuatrices de tension et de courant). Le coefficient k3 peut être inférieur ou supérieur à 1 du moment que la relation k1 = (k2 . k3) est satisfaite.

Pour mesurer le coefficient de réflexion, et par suite le ROS, avec un voltmètre, on applique un rapport de division identique à Vi et Vr au moyen d'un potentiomètre double(2), de façon à faire correspondre Vi à la pleine échelle. La lecture de Vr donne alors le coefficient de réflexion en %. Il suffit de graduer le cadran du voltmètre de façon qu'il effectue directement la conversion {ROS ⇔ coefficient de réflexion}. En effet, le ROS étant égal à (Vi+Vr) / (Vi-Vr) (1), si l'on normalise Vi à 1 (pleine échelle), on voit que le ROS ne dépend plus que de Vr qui est elle-même égale au coefficient de réflexion. Par exemple, un coefficient de réflexion de 20% correspond à un ROS de {(1+0,2) / (1-0,2)} = 1,5.

N-B : *On tient compte pour la graduation du voltmètre de la non linéarité de la détection de Vi et Vr. A noter aussi que si l'on fait une détection crête du signal (méthode classique), on effectue implicitement une conversion [crête / efficace] qui suppose, pour être exacte, que le signal soit parfaitement sinusoïdal, donc exempt d'harmoniques. Ceci est très souvent la cause d'erreurs dans la mesure d'un faible ROS pour la fondamentale quand celui-ci est très élevé pour les harmoniques.*

Quelques ROS-mètres.

Pour faire un ROS-mètre, on a besoin de :
- une sonde de courant = transfo ou ligne couplée
- un convertisseur courant / tension = résistance chargeant le transfo de courant
- une sonde de tension = transfo, diviseur capacitif, ou diviseur résistif
- un additionneur vectoriel (on peut utiliser un oscilloscope avec addition des deux voies)(3).
- un soustracteur vectoriel (le même oscilloscope, mais avec une voie inversée)(3).

Considérons le schéma 1 sur la figure 2. C'est un grand classique chez les radioamateurs, car c'est le moins cher et le plus facile à réaliser en HF.

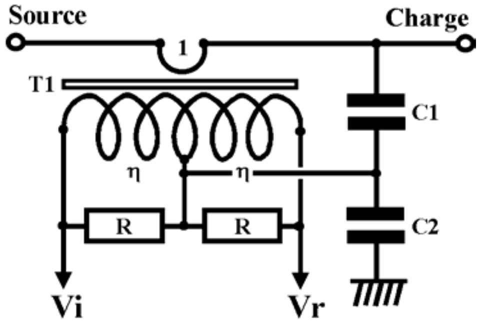

Figure 2

C1 et C2 forment la sonde de tension (diviseur capacitif). N = C2 / (C1+C2).
T1 forme les deux sondes de courant de rapport n. Le côté Vi est en phase et le côté Vr en opposition. Le rapport n doit être suffisamment élevé pour ne pas perturber le circuit.
Si n = N, alors R = impédance nominale.
N-B : *les deux secondaires ne sont pas obligés d'être couplés. On pourrait utiliser deux transfos séparés, mais la symétrie serait plus difficile à réaliser à la construction (et çà coûterait plus cher).*
La tension aux bornes de C2 est en série avec celles développées aux bornes des résistances R. La lecture de Vi et Vr doit se faire avec une très faible consommation de courant pour ne pas fausser la mesure (détecteurs à haute impédance).

Voyons maintenant le schéma 2 sur la figure 3. Il est moins classique chez les radioamateurs, mais souvent utilisé dans le milieu professionnel, car plus précis.

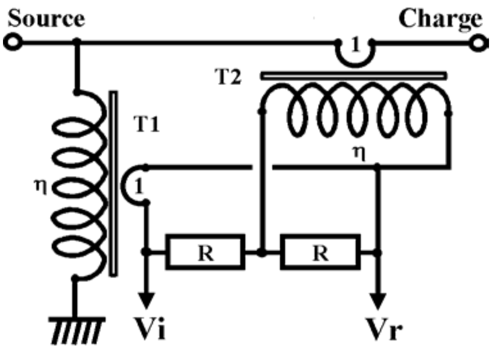

Figure 3

Si T2 = T1, alors R = impédance nominale.
T1 est un transformateur abaisseur de tension (en parallèle sur la charge), et T2 un transformateur abaisseur de courant (en série avec la charge).
Pour la charge nominale, le courant généré par T1 débitant dans R et traversant T2 est en opposition de phase avec celui de la charge et est égal à I/n. Dans ce cas l'induction dans T2 est nulle et il n'y a pas de tension à ses bornes. Donc Vr = 0 (masse virtuelle), et T2 ne consommera aucune puissance. Pour une autre charge, le rapport V/I change et/ou un déphasage apparaît entre V et I, l'équilibre des sources de courants ne se fait plus dans T2. Alors Vr ne sera plus nulle et le transfo T2 consommera ou restituera de l'énergie à la ligne suivant la nature de la désadaptation.

Et pour finir, le schéma 3 sur la figure 4, un autre grand classique : le ROS-mètre à lignes.

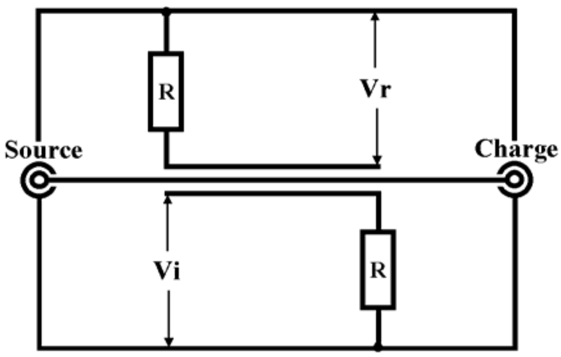

Figure 4

R fixe l'impédance nominale en fonction des caractéristiques mécaniques du coupleur (espacement et longueur de la ligne de couplage).

Chaque ligne réalise à la fois une sonde de tension par couplage galvanique et une sonde de courant par couplage magnétique. La résistance R est choisie de façon que la tension développée aux bornes de la ligne secondaire par couplage magnétique soit égale à celle développée à ses bornes par couplage galvanique. Les tensions s'ajoutent si R est disposée côté charge, et elles se retranchent si R est disposée côté source. Le système ne fonctionne correctement que lorsque la ligne de couplage est très courte devant la longueur d'onde.

La différence essentielle entre le schéma 3 et les schémas 1 et 2 réside dans la sensibilité du coupleur qui varie en fonction de la fréquence pour le troisième. Pour une sensibilité acceptable, la bande utile est relativement étroite. C'est pourquoi les schémas 1 et 2 sont utilisés pour couvrir la totalité de la bande HF alors que le schéma 3 est utilisé pour, soit couvrir la bande VHF, soit la bande UHF. Pour ces bandes, il est aussi plus facile à construire que les types 1 et 2.

Détermination de la puissance transmise à la charge.

N-B : *Nous envisagerons le cas où la source est un émetteur HF, cas général où le ROS-mètre est utilisé du fait de sa faible sensibilité.*

Puissance transmise = $[(Vi)^2 - (Vr)^2] \times K$
K est un facteur d'échelle dépendant de l'impédance nominale et des coefficients k1, k2 et k3.

L'élévation au carré est faite par une graduation en puissance de l'échelle du voltmètre et la soustraction est faite par l'utilisateur en mesurant successivement $(Vi)^2$ et $(Vr)^2$.

$(Vi)^2$ est appelée "puissance directe" ou "puissance incidente" et $(Vr)^2$, "puissance réfléchie".
La puissance transmise est la différence entre la puissance directe et la puissance réfléchie.
La puissance transmise, appelée aussi "puissance active", est la seule dissipée par la charge.
Si la désadaptation (ROS) n'est provoquée que par un élément réactif (R=Zo), alors la puissance réfléchie mesurée représente une puissance consommée dans l'émetteur lui-même et non dans la charge (pour celle-ci, c'est une puissance "imaginaire"). Quand le ROS mesuré est dû à une désadaptation strictement non réactive (j = 0), alors la puissance réfléchie mesurée n'a plus de signification. En effet, un émetteur est une source de courant qui pour la

puissance nominale est proche de ses limites, tension et courant. Si l'impédance de charge augmente, on écrête en tension et le rendement augmente, et si l'impédance diminue, on écrête en courant et le rendement diminue. C'est pour éviter échauffement et/ou distorsion, qu'une sécurité, l'ALC, limite la puissance dès la présence d'une désadaptation. Cela peut commencer assez tôt, pour un ROS de 1,5. Donc la règle des puissances transmises et réfléchies ne s'applique plus au delà.
Dans la majeure partie des cas, le ROS mesuré est dû à la fois à une désadaptation active ($R \neq Zo$) et à une désadaptation réactive ($jX <> 0$). Comme le ROS-mètre ne sait pas séparer ces deux causes, il est impossible de prédire l'effet du ROS sur l'émetteur. La puissance réfléchie mesurée n'a pas de correspondance physique exacte dans celui-ci. Mais la différence entre la puissance directe et la puissance réfléchie indiquées par le ROS-mètre est toujours représentative de la puissance dans la charge ($Pc = K \times (Vi^2 - Vr^2)$).

N-B : *L'impédance interne de l'émetteur peut être ramenée à la valeur nominale de charge, mais cela est fait dynamiquement grâce à une contre réaction. Ainsi la puissance transmise suit bien les règles en fonction du ROS, mais dans les limites de Imax et Vmax, donc pour un ROS très faible. Tout cela sera expliqué en détail dans un prochain article.*

Par ailleurs, le ROS mesuré n'indique la présence d'ondes stationnaires dans la ligne d'une manière absolue que si son impédance nominale est égale à celle de la ligne. Bien souvent, le ROS-mètre est associé à un circuit d'accord antenne, côté émetteur. Dans ce cas, son impédance nominale est égale à la résistance de charge nominale de l'émetteur. Si la ligne a une impédance différente, et si l'on déplace le ROS-mètre de l'autre côté de la boîte d'accord, celui-ci va indiquer un ROS là où il n'y en a pas, si la ligne et la charge ont la même impédance.
Le ROS-mètre ne mesure pas des valeurs absolues, mais un déséquilibre par rapport à une référence qui a été déterminée à la construction.
La méthode pour calculer et fabriquer quelques R0S-mètres sera décrite dans un prochain article.

Vérifications mathématiques pour quelques cas particuliers.

a) Soit d'abord le cas idéal où l'on a un émetteur connecté sur son impédance nominale de 50Ω (charge de puissance = résistance pure) et un ROS-mètre de 50Ω.

$Z = Zo = 50\ \Omega$ et $\cos(\varphi) = 1$ (cas de référence).
On a en normalisant : $U = 1$, $I = 1$ et $Zo = 1$, donc $P = 1$.
Alors, $Vi = U + (Zo.I) = 2U$
$Vr = U - (Zo.I) = 0$
Puissance incidente = $(2)^2 \times K = 1$ (donc, $K = 0{,}25$)
Puissance réfléchie = zéro.
ROS = 1 (coefficient de réflexion = [0 / 1] = 0)

b) Cas où l'émetteur est relié par une ligne 75 Ω à une antenne de 75 Ω à la résonance avec un ROS-mètre {Zo = 50 Ω} (Zc nominale de l'émetteur).

Dans ce cas, il n'y a pas d'ondes stationnaires, mais le ROS-mètre indique un ROS de 1,5.
$Z = 75\ \Omega$ et $\cos \varphi = 1$ (cas étudié).
Nous avons après normalisation :
$P = 1$ et $Zo = 1$
$R = 75/50 = 1{,}5$
$U = \sqrt{P.R} = 1{,}225$

I = P / U = 0,816
Vi = abs(1,225 + (0,816x1)) = 2,041
Vr = abs(1,225 – (0,816x1)) = 0,409

Coefficient de réflexion = 0,409 / 2,041 = 0,2 (Vr / Vi)
ROS = (1+0,2) / (1-0,2) = 1,5.
Puissance incidente = $(2,041)^2$ x 0,25 = 1,041 (rappel, K=0,25)
Puissance réfléchie = $(0,409)^2$ x 0,25 = 0,041
Puissance transmise = 1,041 – 0,041 = 1 (inchangée, car référence pour le calcul)
On retrouve les valeurs des tables où pour un ROS de 1,5, la puissance transmise est égale à 96% de la puissance incidente et la puissance réfléchie égale à 4%.

N-B : *Le calcul peut être refait avec une charge et une ligne de 33,33 Ohms, les valeurs de Vi et Vr seront strictement les mêmes.*

c) Cas où le ROS n'est dû qu'à une réactance en parallèle sur la charge.

Nous prendrons le cas où Z = R + jX avec R=Zo (50 Ω) et X=R (capacité en parallèle ayant une réactance égale à la résistance). Dans ce cas, φ = 45°.
Nous nous placerons dans l'hypothèse d'une puissance constante dans la charge. Et nous prendrons U pour référence(4). Alors, I est multiplié par 1,414, soit 1,414 VA pour 1 watt dissipé.
N-B : *nous retrouvons la célèbre formule :* $P(watts) = P(VA) \times cos(\varphi)$.

Nous avons :
Cos(45°) = 0,707.
$$\boldsymbol{Vi} = \sqrt{(1+1,414^2+2x1x1,414x0,707)} = \sqrt{(1+2+2)} = 2,236$$
$$\boldsymbol{Vr} = \sqrt{(1+1,414^2-2x1x1,414x0,707)} = \sqrt{(1+2-2)} = 1$$
Coefficient de réflexion : 1 / 2,236 = 0,447
ROS = (1+0,447) / (1-0,447) = 2,6
En vérifiant sur l'abaque de Smith, on trouve bien que c'est le cercle de ROS 2,6 qui passe par le point d'impédance 1 + j1.
Puissance incidente : $2,236^2$ x 0,25 = 1,25
Puissance réfléchie : 1^2 x 0,25 = 0,25 soit 20% (0,25 / 1,25)
Puissance transmise = 1 (hypothèse) soit 80% (1 / 1,25)
Ces valeurs correspondent bien à celles des tables pour un ROS de 2,6 et la puissance réfléchie indiquée est égale à la puissance réactive échangée avec la source mais seulement si R = Zo, ce qui est le cas ici.
Si nous connectons la charge à travers une ligne 50Ω, le ROS mesuré sera égal au Rapport d'Ondes Stationnaires dans cette ligne.

Pour conclure, nous confirmerons donc que le ROS-mètre mesure une désadaptation de la charge, mais que la nature de cette désadaptation ne peut pas être connue simplement par la lecture dudit ROS-mètre. Pour cela, il faut un analyseur de réseau ou plus simplement un pont d'impédance HF.

F5NB.

Annexe 1

Sur l'abaque de Smith, les impédances entraînant un ROS constant se situent sur un cercle ayant comme centre l'impédance nominale (Zo). Nous avons alors quatre possibilités[1] :

1- Z = (Zo/ROS) +j0
2- Z = (Zo×ROS)+j0
3- Z = R + jX (X > 0)
4- Z = R - jX   (X > 0)

Les cas 1 et 2 correspondent à une désadaptation sans élément réactif (j = 0) et les cas 3 et 4 à une désadaptation due totalement (R = Zo) ou partiellement (R ≠ Zo) à un élément réactif.
Dans les cas 1 et 2 la ligne travaille soit en ondes progressives si son impédance est égale à la charge, soit en ondes stationnaires si son impédance est différente. Dans les cas 3 et 4, elle travaille en ondes stationnaires quelle que soit son impédance.

Il est à remarquer que généralement, la ligne et le ROS-mètre ont la même impédance caractéristique. Dans ce cas le ROS lu par le ROS-mètre est bien le même que celui de la charge, de même la ligne est le siège d'ondes stationnaires d'amplitude correspondant au ROS mesuré, mais la nature de l'impédance ramenée au ROS-mètre ne sera identique que si la ligne a une longueur multiple de lambda/2. Pour toutes les autres longueurs, l'impédance sera transformée.

Annexe 2

Quelle que soit la nature de l'impédance de la charge, il y a toujours un moyen théorique de ramener cette impédance à celle du ROS-mètre branché à la sortie de l'émetteur, en utilisant une liaison particulière qui fera cette adaptation. Ainsi le ROS-mètre indiquera un ROS de 1.
Soit un ROS-mètre Zo = 50 Ω, et une charge Zc = 75 – j75 (φ = -45° et ROS = 3,3).
Réalisation de l'adaptation :
On ramènera d'abord la phase à zéro avec une ligne Z = R, soit 75 Ω ici, de longueur électrique 0,75λ qui provoquera une rotation de phase de135° (180-45).
Ensuite on aura une ligne de longueur λ/4 et d'impédance caractéristique égale à :

$$\sqrt{50x75} = 61{,}24\ \Omega$$

ceci pour ramener le module de 75 à 50 Ω.
Pour arriver à l'émetteur, on pourra compléter si nécessaire avec une longueur quelconque d'une ligne 50 Ω.

Exercice : *calculer le ROS dans les lignes 50 , 61,25 et 75 Ohms.*

Résultat : le ROS est égal à 1 , 1,5 et 2,6).

Q : Qu'indique le ROS-mètre (Zo) branché au début, et au milieu de la 61,25 Ohms, puis au début et à la fin de la 75 Ohms ?

R : Le ROS-mètre indique 1 , 1,24 , 1,5 et 3,3 (ROS de la charge).

Une boîte de couplage réalisera exactement les mêmes opérations mathématiques, la ligne entre la charge et la boîte de couplage pourra alors avoir une impédance de 50 Ω (ROS 3,3) ou 75 Ω (ROS 2,6). Il faut avouer qu'il est plus facile de tourner des boutons de CV que de changer les impédances des lignes en ajustant leurs longueurs.

Notes :

(1) *Pour une charge réactive,*

$$\text{ROS} = \frac{A+B}{A-B} \quad \text{avec} \quad \text{A} = \sqrt{(R+Zc)^2 + X^2} \text{ et } \text{B} = \sqrt{(R-Zc)^2 + X^2}$$

avec Vi = A, Vr = B, Zo = Zc, R et X de {Z = R±jX}.
Dans l'article, j'utilise des coordonnées polaires (Rho, thêta) pour représenter les vecteurs. Mais le vecteur de courant (en prenant la tension comme référence) peut être décomposé en deux vecteurs, l'un en phase pour la partie réelle (R) et l'autre en quadrature pour la partie réactive (X). Nous avons alors une combinaison de trois vecteurs qui est exprimée par cette formule, mais sous forme complexe.
Si X=0 (pas de partie réactive), nous avons deux racines réelles, R/Zo et Zo/R pour exprimer le ROS.
Si R=Zo (désadaptation purement réactive), alors le ROS est exprimé par deux racines imaginaires correspondant à deux angles de déphasage +φ et -φ
Si R≠Zo et X≠0, alors le ROS est exprimé par une infinité de combinaison de racines réelles et imaginaires (racines complexes).
Toutes ces racines sont situées sur le cercle de ROS constant sur l'abaque de Smith.

(2) C'est le moyen le plus simple. On peut aussi utiliser un voltmètre double à aiguilles croisées, ou même construire un ROS-mètre à lecture automatique comme celui décrit par F9RP dans Radio-REF de novembre 2002.

(3) Ce n'est pas le plus pratique. Mais c'est une bonne façon de démontrer le fonctionnement du ROS-mètre.

(4) Le ROS ne dépend que de la ligne et de la charge, pas de la source. Donc on peut prendre aussi bien une source de tension (EDF), une source de courant (émetteur non contre-réactionné) ou une source adaptée (générateur HF).