

Le ROS, l'antenne, la ligne et l'émetteur

R. BERRANGER, F5NB

La chaîne d'émission la plus employée comporte un émetteur auquel on connecte une ligne reliée à une antenne. Le ROS (Rapport d'Onde Stationnaire) est en relation avec ces trois éléments mais de façons très différentes. Cet article va décrire ces relations dans le détail, ce qui permettra de revoir certaines idées reçues qui ont la vie dure. Je me suis appliqué à faire appel au raisonnement du lecteur plutôt qu'à une mathématique incompréhensible pour des non spécialistes.

Préambule

Vous vous êtes sans doute aperçus que le radioamateurisme a plus évolué ces dix dernières années que pendant les cinquante ans qui les ont précédées. De plus en plus, la partie technique se réduit à un assemblage de modules matériels et logiciels. Les antennes constituent le seul domaine où l'imagination des OM puisse encore s'exercer (et ils n'en manquent pas !).

Une antenne est un transducteur, ici un objet qui permet de passer d'un monde électrique à un monde électromagnétique. Si le premier est simple à comprendre ($U=R.I$), le second est plus mystérieux et nécessite une vision du monde en quatre dimensions qui ne peut être analysée avec une mathématique standard. Alors, on s'évertue à trouver des **astuces mathématiques** où trois dimensions suffisent. Mais si l'on n'y fait pas attention, on oublie que l'on a simplifié le problème et on généralise les résultats. C'est alors la porte ouverte aux fausses interprétations et aux idées reçues.

Pour simplifier les démonstrations, nous ne traiterons que des **antennes filaires** et nous supposons que leurs pertes ohmiques, ainsi que celles dans les lignes, sont nulles.

1 - Généralités

1.1 - Universalité du rayonnement électromagnétique

Il faut noter que le phénomène électromagnétique est indépendant de la fréquence. C'est-à-dire que les mêmes règles s'appliquent pour le secteur à 50 Hz et pour les Hypers à 50 GHz. J'insiste : si un principe est valable à 50 Hz, il est valable aussi à 50 GHz et à toutes les fréquences intermédiaires.

1.2 - Les dimensions d'une antenne

Les dimensions d'une antenne (longueurs, diamètres des brins) exprimées en mètres n'ont un intérêt que pour sa fabrication, par exemple, $L = XX$ m. "L" est mis ici pour "longueur mécanique". Concernant le rayonnement d'une antenne, les dimensions doivent être mesurées par leur longueur électrique : $\alpha = XX$ radians, soit $\alpha = 2\pi/\lambda$ ($\alpha = \pi$ correspond à $L = \lambda/2$). Rappel : 2π radians font 360° . Ainsi pour déterminer les performances d'un aérien, on est indépendant des dimensions mécaniques qui varient avec la longueur d'onde, donc avec la fréquence. Il faut toujours avoir cela présent à l'esprit quand on veut se faire une idée des performances d'une antenne au premier regard. Prenons deux exemples :

Soit une antenne Yagi 3 él pour la bande des 2m. Ses dimensions sont de 1 m (Longueur approximative des brins) par 1,6 m (longueur du boom), dia des brins = 4 mm. Elle est disposée à 8 m de hauteur au dessus du sol. Transposée pour la bande des 80m, elle aurait des

brins de 40 m, dia 16 cm et un boom de 54 m, le tout à 320 m de hauteur. C'est un système antennaire gigantesque, même à 145 MHz.

Prenons maintenant une antenne doublet très raccourcie pour la bande des 80m, par exemple avec une longueur de 2 m (longueur d'une antenne E-H commercialisée) et transposons là pour la bande des 70 cm. Nous aurions un doublet de 17,5 mm, dia 0,3 mm. Pensez-vous que ce doublet aurait un rayonnement significatif à 435 MHz ? C'est pourtant ce que le constructeur voudrait nous faire croire !

Ces deux exemples montrent bien qu'il faut se méfier des dimensions mécaniques d'une antenne. Il faut toujours les comparer à la longueur d'onde.

1.3 - Les ondes

Une onde est un concept mathématique qui a été inventé pour décrire le comportement (propagation) d'un phénomène physique sinusoïdal. Ce phénomène a comme particularité d'être **stable** dans le temps, **sans commencement ni fin** (durant le temps d'observation). Nous avons trois sortes d'ondes : les ondes progressives (qui progressent dans l'espace), les ondes stationnaires (stables dans l'espace) et les ondes mixtes : une composante est stable et une autre progresse. Les ondes progressives transportent une énergie qui, si elle n'est pas récupérée et utilisée (dans ce cas l'onde disparaît), se perd dans l'infini de l'espace. Pour rendre "visible" une onde électromagnétique, j'utilise souvent une analogie avec le comportement d'une onde de houle en absence de vent. Dans les deux cas nous avons affaire à une onde plane. C'est-à-dire que l'énergie transportée est contenue dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Comme l'onde de houle a une polarisation verticale, nous prendrons la même polarisation pour l'onde E-M. Pour cette dernière, l'énergie est partagée par moitié entre deux champs : un champ H (dans le plan H) et un champ E (dans le plan V, plan de polarisation) alors qu'avec la houle, elle est entièrement contenue dans le plan V. Dernier préliminaire : avec l'onde E-M l'observateur est situé à l'emplacement du récepteur, utilisateur d'une (infime) partie de l'énergie émise et avec l'onde de houle, l'observateur est un naufragé qui rame vers une île dans son minuscule canot de survie (la houle le rattrape par l'arrière).

Tant que le naufragé est en pleine mer, la houle qui passe sous son canot lui fait faire un mouvement alternatif vertical, mais ne le fait pas avancer d'un centimètre supplémentaire (par contre le mouvement vertical lui donne la nausée).

Devant lui, la côte avec à sa gauche une falaise verticale d'une trentaine de mètres et à sa droite une belle plage de sable fin. Il constate alors avec ses jumelles qu'au pied de la falaise la hauteur de la houle est énorme. Par ailleurs, entre lui et la falaise se succèdent des zones où la houle a une hauteur variable. A une petite distance de l'obstacle, la houle semble avoir disparu, pas le moindre mouvement de la mer à cet endroit. Bizarre, bizarre !

Il opte alors pour la plage, mais là aussi cela ne semble pas être de tout repos. En effet, au fur et à mesure qu'il s'approche du rivage, il constate qu'il accélère de plus en plus au passage de la houle, au point de "surfer" sur la vague et venir s'échouer sur le sable. Que s'est-il passé ? Quand le canot avançait au large, le processus était constant parce qu'il y avait suffisamment d'eau sous le canot. En se rapprochant de la plage la hauteur d'eau a diminué et la composante V de l'onde de houle a été freinée par son "frottement" sur le fond. Alors le front de l'onde s'est incliné vers l'avant et a pris de l'ampleur, jusqu'à ce que la pesanteur fasse "basculer" l'eau de la crête, phénomène appelé "déferlement". Celui-ci en dissipant l'énergie de l'onde est à l'origine des modifications du littoral.

Nous avons le même phénomène avec le champ E-M dans une ligne composée d'un long fil proche d'un grand plan de sol. Si le sol est parfaitement conducteur, nous avons une ligne "normale". Mais si le sol n'est pas parfait, la vitesse de propagation dans celui-ci est plus faible que dans l'air. Alors en réception, une onde de sol polarisée verticalement voit son front

d'onde s'incliner vers l'avant amenant une composante horizontale qui induit une tension dans le fil. C'est le principe de l'antenne "Beverage". Il ne se produit qu'en réception avec un mauvais rendement (pertes dans le sol) et n'est employé qu'en VLF-LF. J'ai commis un article dans R-REF qui relate cela en détails.

En résumé, notre naufragé a connu les trois états d'une onde : une onde progressive au large, une onde stationnaire devant la falaise et une onde complexe (mixte) entre la falaise et la plage. Dans notre domaine nous aurons également des ondes progressives, des ondes stationnaires et des ondes complexes. Pour ces dernières, (cas général) on se sert d'un ROS-mètre pour déterminer le Rapport entre l'onde complexe et l'onde stationnaire (ROS) qui permet de calculer l'onde progressive qui seule transporte l'énergie (puisque l'autre onde est "stationnaire").

N-B : Nous ne nous préoccupons pas de la manière dont ces ondes ont été créées, nous nous contenterons de les constater (c'est ce que l'on fait avec une mesure au ROS-mètre).

2 – Le Raport d'Onde Stationnaire (ROS)

Pour l'analyse du phénomène, nous nous servirons des graphiques de la figure 1.

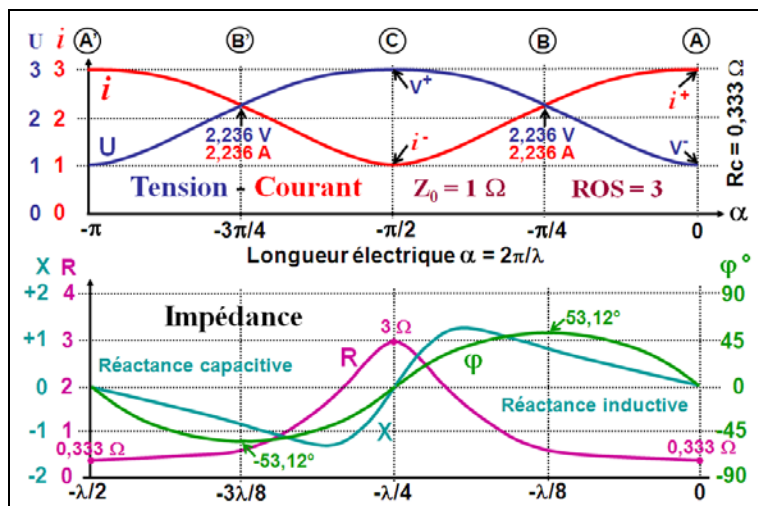


Figure 1 : Graphiques pour l'analyse comportementale d'une ligne désadaptée

On remarquera qu'il y a en réalité deux ondes stationnaires dans une ligne : l'une en tension et l'autre en courant, les deux étant décalées d'une longueur électrique de $\pi/2$ radians ($\lambda/4$). Ce déphasage est logique puisque l'on verra (§3.1) que l'énergie dans la ligne est transportée par deux champs distincts : un champ électrostatique E_s et un champ magnétique H (champ H seul du champ $E-M$). Mais revenons à notre ROS.

Nous avons ici une ligne prototype d'impédance 1Ω pour faciliter les calculs. L'échelle des longueurs est graduée en phase [α] et en longueur d'onde [λ] ($\alpha = 2\pi/\lambda$), mesurées depuis la charge. En fonction de la longueur électrique, nous avons les paramètres suivants : courant (i), tension (V), partie réelle de l'impédance (R), partie imaginaire de l'impédance (X) et phase de l'impédance (ϕ). Cette ligne est désadaptée et présente un ROS de 3.

Noter qu'une ligne est appelée "feeder" quand elle sert à alimenter une antenne.

2.1 - Mesure "réelle" du ROS dans une ligne

Dans un feeder et dans une ligne en général on peut mesurer le ROS en recherchant les points où $\phi=0$, ce qui se produit aux endroits où U et I sont, soit au maximum (V^+ , I^+), soit au minimum (V^- , I^-). Alors $ROS = U^+ / U^-$ ou I^+ / I^- . Mais cette méthode est quasiment impossible à utiliser en pratique, surtout si la ligne est trop courte ou coaxiale. On a donc recours à des

artifices mathématiques pour mesurer le ROS en un seul point de la ligne, en général du côté "émetteur", sinon il faut la couper à l'endroit de la mesure. Côté antenne, on mesure également un ROS, mais qui n'a rien à voir avec la ligne. Côté émetteur, le ROS mesuré a une relation complexe avec le feeder et l'antenne, relation que l'on cherche à simplifier. Nous verrons cela dans le chapitre 3 et la figure 2.

2.2 - Le ROS et l'Antenne

En général on "mesure" le ROS d'une antenne à l'entrée du feeder, à condition que l'impédance de référence du ROSmètre soit égale à l'impédance caractéristique de la ligne. Pour être plus précis, on mesure le ROS dans la ligne qui est du à une désadaptation de l'antenne (nuance très importante).

Cela va vous paraître bizarre et pourtant c'est le cas : on ne mesure jamais le ROS de l'antenne. En réalité on mesure une désadaptation de l'aérien par rapport à une impédance que l'on a jugée optimale pour le rendement de l'émetteur.

En effet, toutes les antennes filaires "ouvertes" et les boucles sont le siège d'ondes stationnaires ⁽¹⁾. La valeur du ROS réel dans l'antenne n'est limitée que par les pertes ohmiques et les pertes par rayonnement. Donc ce que l'on mesure c'est la partie active de l'impédance d'antenne, combinée avec une partie réactive si l'antenne n'est pas à la résonance. Mais le ROS ne nous renseigne pas sur la cause de la désadaptation. Pour cela, il faudrait utiliser un impédancemètre à la place du ROSmètre et une longueur électrique de la ligne multiple de $\lambda/2$. La mesure serait d'autant plus fautive que les pertes dans la ligne seraient élevées.

Par ailleurs, pour l'antenne, la valeur de référence du ROSmètre est arbitraire. Rien ne prouve qu'un ROS de 1 coïncide avec sa meilleure performance, sauf conditions particulières liées au type d'antenne et à son installation. Dire "J'ai réussi à obtenir un ROS de 1 pour mon antenne, donc elle fonctionne parfaitement", est une affirmation très risquée qui n'a une chance d'être "vraie" que dans un nombre limité de cas.

Par exemple si l'**impédance de charge optimale** (je n'ai pas dit "impédance interne de source") de l'émetteur est de 50Ω , l'impédance de référence du ROS-mètre devra être de 50Ω également. Il y a une infinité de solutions adaptatives pour ramener l'impédance quelconque de l'antenne à la référence du ROS-mètre (pour avoir un ROS de 1). Nous pouvons trouver une adaptation au point d'alimentation de l'antenne, éventuellement une longueur et une impédance particulières de la ligne de transmission et/ou une boîte d'accord à la sortie de l'émetteur. Le système sera étudié pour avoir un rendement maximal (minimum de pertes ohmiques). Nous verrons des cas particuliers dans le chapitre 3 et la figure 2.

Si l'on veut éviter la nécessité d'une adaptation, il faut prendre une ligne d'impédance caractéristique égale à l'impédance de charge optimale de l'émetteur et se débrouiller pour que l'impédance de l'antenne soit la même également. Mais cette opération peut entraîner **une baisse sensible des performances** de l'aérien, en particulier pour ceux constitués de doublets en réseau, comme les antennes Yagi.

2.3 - Le ROS et l'émetteur

Ici le ROS-mètre est mis à la sortie de l'émetteur. Il indique une désadaptation de la charge (ligne + antenne), mais il ne nous dit pas laquelle. Or l'effet sur l'émetteur sera totalement différent selon les options que l'on a prises pour son comportement face aux désadaptations. Par exemple pour mon émetteur HF professionnel qui a une impédance optimale de charge de 50Ω et qui doit supporter un ROS de 1,5 sans broncher, si la charge a une impédance de $75 \Omega + j0$ (ROS 1,5) et si je déconnecte l'ALC HF, il peut sortir avec la bonne linéarité une puissance 1,5 fois plus élevée avec un bien meilleur rendement (moins de pertes par effet Joule). Mais attention, si le ROS de 1,5 était du à une charge de $33,3 \Omega + j0$, la puissance

serait la même, mais le rendement serait diminué. C'est pourquoi l'ALC HF de mon émetteur régule la puissance à sa valeur nominale dans tous les cas de ROS de 1 à 1,5, avec un dimensionnement suffisant pour accepter une diminution du rendement (de -30°C à +50°C pour la température ambiante).

2.4 - Désadaptation et émetteur

Si pour diverses raisons (prix, encombrement, consommation) on a garanti les performances uniquement pour un ROS de 1 avec une diminution de puissance pour des ROS plus élevés, on a intérêt à placer entre le ROSmètre et la ligne une boîte d'adaptation car par exemple pour certains cas de ROS 1,5 les conséquences pourraient être **beaucoup plus importantes** que le calcul de la "puissance réfléchie" le laisserait croire. En effet, pour garder une bonne linéarité, l'ALC HF diminuerait la puissance en $1/ROS$, soit 67 W pour une puissance nominale de 100W (et pas 96 W). Ceci mérite une explication.

Vous avez remarqué que j'ai pris soin de spécifier l'adaptation à l'émetteur comme ayant un rapport avec son impédance optimale de charge et non avec son impédance interne de sortie. En effet, en régime établi, son impédance de sortie n'a aucune influence sur le comportement de la charge, en particulier sur son ROS (ROS qui n'a aucune existence physique en régime impulsionnel ou transitoire).

La désadaptation à la sortie d'un émetteur a deux effets : l'un sur son rendement et l'autre sur sa stabilité (oscillations parasites). Pour son rendement, il sera maximum si l'impédance de sortie est nulle ou infinie. Cela n'est pas le cas en pratique à cause de l'imperfection des composants actifs de puissance pour le rendement et/ou de l'imperfection des composants passifs pour la stabilité. Ces imperfections augmentant avec la fréquence, plus celle-ci est élevée et moins l'on pourra prétendre avoir un excellent rendement.

Concernant les conséquences de la désadaptation sur le rendement et la stabilité, elles seront d'autant plus importantes que la charge sera réactive. Le problème n'est pas différent de celui rencontré dans les amplificateurs électroniques petits signaux.

On lit souvent : "la puissance consommée par une charge sera d'autant plus élevée que son impédance sera proche de l'impédance de sortie de la source (de l'émetteur)". C'est exact et on se sert de cela pour dire qu'un ROS de 2 n'est pas catastrophique puisque 90% de la puissance est transmise. Ceci est une erreur car si l'on veut que l'émetteur reste linéaire, il faut qu'il soit alimenté par une tension 1,4 fois plus importante et capable de fournir un courant 1,4 fois plus élevé également. Résultat : Le rendement diminue, même pour un ROS de 1 et cela oblige à surdimensionner les transistors de sortie et leur refroidisseur. Plus paradoxal : dans le cas où le ROS de 2 serait dû à une résistance de charge égale à deux fois la charge optimale, l'ampli pourrait sortir deux fois plus de puissance avec un meilleur rendement. Or l'ALC HF limiterait la puissance à la moitié de la puissance nominale, ce qui diminuerait le rendement ! Noter que l'impédance de sortie naturelle d'un P.A. baisse quand la fréquence augmente du fait de la diminution de "l'efficacité collecteur" ou de "l'efficacité drain". Ainsi en pratique, en UHF et au dessus, l'impédance interne de l'émetteur se rapproche de 50 Ω et il réagit au ROS d'une façon proche de la théorie de la puissance réfléchie. mais il ne faut pas oublier que cela est le résultat d'un mauvais rendement du P.A. Par ailleurs, la modulation se faisant souvent en FM, on peut travailler plus ou moins en "saturé", ce qui améliore le rendement par rapport à un travail en "linéaire". Je m'arrête car j'ai déjà écrit plusieurs articles détaillés sur le sujet dans R-REF (et qui étudie encore son ampli V/UHF ?).

3 - Puissance directe et puissance réfléchie

S'il y a bien une idée reçue qui a la vie dure c'est le concept de "Puissance directe" et de "Puissance réfléchie". Il existe encore sur le marché des wattmètres directifs qui affichent ces

puissances qui résultent d'une mauvaise interprétation des résultats d'un procédé de calcul et non d'une mesure physique !

3.1 - Energie et puissance

Il y a souvent confusion entre ces deux termes qui n'expriment pas les mêmes grandeurs physiques. En effet la puissance mesure la consommation d'énergie pendant une seconde. Energie consommée veut dire "transformée en travail" (définition du Watt). Donc "puissance transitant dans une ligne" ne veut rien dire car ce n'est pas là que l'énergie est consommée si la ligne n'a pas de pertes. Pourtant on parle de "puissance transmise" mais c'est un raccourci pour dire "énergie qui sera transformée en travail" (ou perdue dans l'Univers dans le cas du rayonnement E-M car on n'en récupère au mieux que quelques millionnièmes).

Par ailleurs, l'**énergie** qui transite dans une ligne n'est pas portée par les champs rayonnés par l'antenne. En effet si le champ E-M **rayonné** est composé d'un champ H et d'un champ E en phase, car **provenants tous les deux du courant** dans l'antenne, il **n'en va pas de même** dans une ligne. Dans celle-ci l'énergie est portée par le champ électrostatique **Es** lié à la tension entre les fils (capacité linéique de la ligne) et par le champ **H** du champ E-M créé par le courant dans les fils (self linéique de la ligne). Alors le champ **E** du champ E-M ? Les deux fils de la ligne étant parcourus par des courants opposés, si leur champs H s'ajoutent entre les fils, ils se compensent à l'extérieur et c'est pourquoi une ligne ne rayonne pas, leurs champs **E** se **neutralisant** partout à l'extérieur de la ligne. Noter que ces trois champs existent encore aux abords de l'antenne mais seul le champ électromagnétique est rayonné au loin (le champ électrostatique **Es** s'atténue rapidement).

Dans la ligne, le rapport entre la self linéique et la capacité linéique (par unité de longueur) constitue son impédance caractéristique Z_0 . Si elle est chargée par son impédance caractéristique le courant et la tension (donc le champ **Es** et le champ **H**) sont constants et en phase tout le long de la ligne. Nous parlons alors d'**onde progressive**.

Si la ligne est chargée par une impédance différente de sa propre impédance, le rapport entre le champ **Es** et le champ **H** s'en trouve modifié donc le rapport entre la tension et le courant aussi. Mais pas d'une manière uniforme (puisque nous sommes dans un domaine espace-temps) Alors notre onde progressive devient complexe avec la combinaison de deux ondes : une onde progressive et une onde stationnaire mesurées par le ROS. Si la désadaptation est totale, il ne reste qu'une onde stationnaire pure (alors $ROS = \infty$). Tout ceci a été expliqué en détail dans les "Comment ça marche ?" publiés dans R-REF.

Passons maintenant aux travaux pratiques. J'utiliserai pour les unités les conventions d'usage.

Soit un générateur 50 Hz (ou 50 MHz, ou 50 GHz) connecté sur une charge inconnue. A la sortie du générateur, nous mesurons la tension et le courant et nous obtenons : $U \times I = 10 \text{ VA}$. Nous la nommons "**puissance apparente**".

Puis nous mesurons le déphasage entre U et I (à l'oscilloscope, par exemple) et nous obtenons $\varphi = 45^\circ$.

Alors $U \times I \times \cos(\varphi)$ nous fournit la "**puissance active**", celle qui **effectue un travail** (et qui nous est facturée par EDF). Elle est égale à **7,071 W** (des "vrais" watts).

Puis nous calculons la différence entre les deux puissances : $U \times I \times (1 - \cos(\varphi)) = 2,929 \text{ VA}$ et nous l'appellerons "**puissance réactive**" ("puissance déwattée" selon les électriciens). Si nous exprimons tout cela en pourcentages, nous obtenons 70,71 % de puissance transmise, par rapport à la puissance apparente, ce qui correspond à un **ROS de 3,5** (aux arrondis près).

Alors on pourrait appeler "**Puissance directe**" la puissance apparente, "**Puissance transmise**" la puissance active et "**Puissance réfléchie**" la puissance réactive, mais seule les puissances transmise et active ont la même valeur (les seules "réelles"). Les autres puissances sont des conventions qui ne correspondent pas forcément à une réalité physique.

En HF, la méthode de mesure des électriciens est compliquée à mettre en œuvre. Elle peut être expérimentée en cours de physique en VHF avec une ligne à fils parallèles, mais pas facile à intégrer dans un émetteur. C'est la mesure du déphasage qui pose le plus de problèmes. Avec le ROS-mètre on utilise une méthode mathématique qui élimine le besoin de mesurer la phase. Voici en résumé les équations du ROS-mètre (en détail dans l'annexe A) :

Soit Z_0 l'impédance de référence du ROSmètre.

Soit U_1 = la tension mesurée en un point

Soit $U_2 = I \times Z_0$ (I = courant mesuré en ce point).

Nous avons :

$V_i = \text{abs}(U_1 + U_2)$ (addition vectorielle)

$V_r = \text{abs}(U_1 - U_2)$ (soustraction vectorielle)

N-B : Le signe négatif est obtenu en inversant la phase de I (deux mesures simultanées).

Attention, U_1 et U_2 sont des vecteurs. Si l'addition est vectorielle, on ne conserve que la valeur absolue du module du résultat (cela se fait **très simplement** dans le ROSmètre).

Coefficient de réflexion $\rho = V_r / V_i$

$\text{ROS} = (1 + \rho) / (1 - \rho)$, mais aussi $(V_i + V_r) / (V_i - V_r)$

$P_{\text{dir}} = V_i^2 / 4 \cdot Z_0$ (puissance directe ou "incidente")

$P_{\text{réfl}} = V_r^2 / 4 \cdot Z_0$ (puissance réfléchie ou "en retour")

$P_{\text{trans}} = P_{\text{dir}} - P_{\text{réfl}}$ (puissance transmise ou "active")

En appliquant ces formules au cas de la fig.1, nous avons :

$Z_0 = 1 \Omega$, $R_c = 0,33 \Omega$, $P_{\text{charge}} = 3 \text{ W}$

Au point de mesure, $U = 2,236 \text{ V}$, $I = 2,236 \text{ A}$, $\varphi = 53,12^\circ$

Alors $U_1 = U = 2,236 \text{ V}$

$U_2 = 2,236 \times 1 = 2,236 \text{ V}$ (ici $Z_0 = 1 \Omega$)

Addition et soustraction vectorielles (à vos calculettes) :

$V_i = \text{racine de } U_1^2 + U_2^2 + [2 \times U_1 \times U_2 \times \cos(53,12)] = 4 \text{ V}$

$V_r = \text{racine de } U_1^2 + U_2^2 - [2 \times U_1 \times U_2 \times \cos(53,12)] = 2 \text{ V}$

Coefficient de réflexion $\rho = 2 / 4 = 0,5$

$\text{ROS} = (1+0,5) / (1-0,5)$ ou $(4+2) / (4-2) = 3$

Puissance directe = $4^2 / (4 \times 1) = 4 \text{ W}$ ($P_{\text{apparente}} = 5 \text{ VA}$)

Puissance réfléchie = $2^2 / (4 \times 1) = 1 \text{ W}$ ($P_{\text{réactive}} = 2 \text{ VA}$)

Puissance transmise = $4 - 1 = 3 \text{ W}$ ($P_{\text{active}} = 3 \text{ W}$ également)

Les deux méthodes donnent la même puissance active (transmise) pour un même ROS. C'est la seule puissance physique "réelle" (elle correspond à un travail). La méthode "réactive" prend l'hypothèse qu'une ligne désadaptée est le siège d'une onde complexe, combinaison d'une onde progressive et d'une onde stationnaire. L'onde stationnaire correspond à l'énergie réactive et l'onde progressive à l'énergie active (puissance). C'est l'option prise par les fournisseurs d'électricité domestique et par tout le monde en HF quand on remplace l'impédance complexe ramenée par une ligne par un circuit réactif R-L ou R-C afin de tester le fonctionnement d'un P.A. (et heureusement, car on n'imagine pas être obligé d'implanter une antenne Beverage pour le 160 m dans un labo d'études).

N-B : La méthode "soustraction de deux puissances" comporte une erreur mathématique. En effet, si l'on peut additionner et soustraire directement les tensions V_1 et V_2 , c'est parce que ce sont des valeurs du premier degré. Or les puissances sont des valeurs du second degré et les opérations sont plus complexes. Ainsi $a^2 - b^2$ n'est pas égal à $(a-b)^2$. C'est pourtant ce que l'on suppose ici. Vous comprendrez pourquoi lorsque j'entends parler de puissance directe et de puissance réfléchie, mes oreilles me font mal.

Pour achever de vous convaincre (si besoin est), je vous propose en exemple sur la figure 2 trois chaînes [émetteur - ligne - antenne].

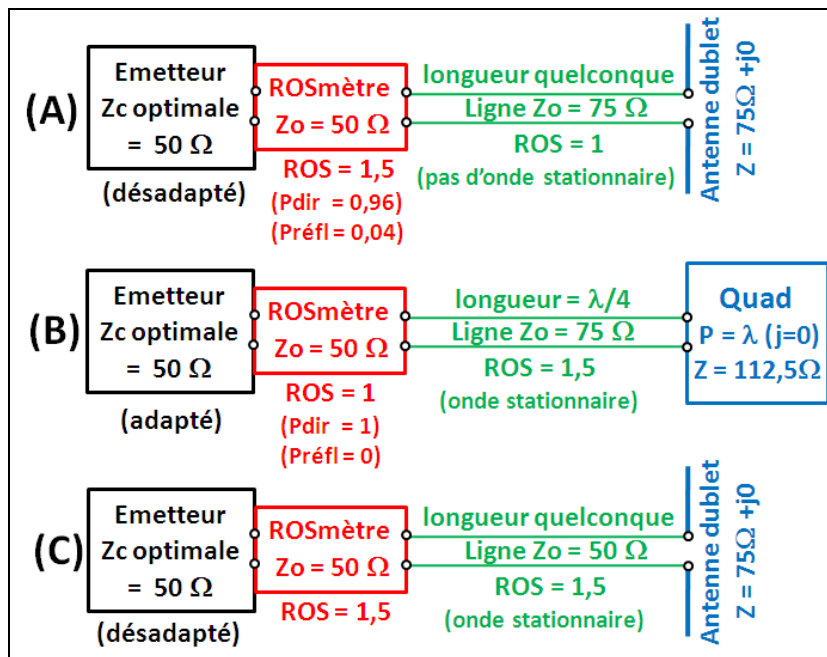


Figure 2 : Exemples montrant différentes configurations d'un système d'émission HF

En (A) nous avons une antenne demi-onde à une certaine hauteur au dessus du sol qui a une impédance de $75 \Omega + j0$. Elle est reliée à l'émetteur par un câble coaxial d'une longueur quelconque ayant une impédance caractéristique de 75Ω également. Entre elle et l'émetteur on a inséré un ROSmètre ayant une impédance de référence 50Ω qui est l'impédance de charge optimale de notre émetteur. Le ROSmètre indique un ROS de 1,5, ce qui est normal. Nous sommes d'accord que la ligne fonctionne en onde progressive et donc qu'elle n'est le siège d'aucune puissance réfléchie. Par contre le ROSmètre-Wattmètre "mesure" une puissance réfléchie de 4%.

Question : D'où provient et où va cette puissance réfléchie ?

En (B) nous avons une antenne boucle (Quad de périmètre λ) qui présente une impédance de $112,5 \Omega + j0$ à une certaine hauteur au dessus du sol. Elle est reliée à l'émetteur par un câble coaxial d'une longueur $\lambda/4$ ayant une impédance caractéristique de 75Ω . A l'extrémité émetteur nous avons une impédance de $50 \Omega + j0$. Alors le ROSmètre indique un ROS de 1 (pas de puissance réfléchie). C'est-à-dire que l'émetteur est parfaitement chargé alors que la ligne est le siège d'une onde stationnaire ayant un rapport de 1,5, soit une puissance réfléchie de 4%.

Question : D'où provient et où va cette puissance réfléchie ?

En (C) nous avons notre antenne demi-onde avec son impédance de $75 \Omega + j0$. Elle est reliée à l'émetteur par un câble coaxial d'une longueur quelconque ayant une impédance caractéristique de 50Ω . Entre elle et l'émetteur on a inséré un ROSmètre ayant une impédance de référence de 50Ω qui est l'impédance de charge optimale de notre émetteur. Le ROSmètre indique un ROS de 1,5, ce qui est normal. Ici, on peut dire que l'impédance de la ligne étant celle du ROSmètre, le ROS qu'il indique est bien celui dans la ligne et la puissance réfléchie correspond à l'onde stationnaire dans la ligne. Donc on "pourrait" admettre que la puissance réfléchie retourne à l'émetteur.

En (A) comme en (C) la charge de l'émetteur est désadaptée et on est obligé d'insérer une boîte d'adaptation entre le ROS-mètre et la ligne. Alors une fois la boîte réglée, elle présente à

l'émetteur une impédance de $50 \Omega + j0$. Donc aucun échange de puissance réfléchi entre elle et l'émetteur. Par contre en (C) il y a une puissance réfléchi dans la ligne.
 Question : D'où provient et où va cette puissance réfléchi ?

Noter que dans les exemples ci-dessus, on aura les mêmes résultats si l'on remplace les antennes par des résistances miniatures. On se demande alors comment des champs HF puissent être réfléchis par une simple résistance.

En conclusion, si l'on admet qu'il y a de la puissance réfléchi, on se trouve devant un problème physique avec des puissances "balladeuses" provenant ou allant nulle part. Mais si on traite le système à la manière EDF, nous n'avons plus qu'un problème électrique d'adaptation qui ne tient aucun compte des puissances directes et réfléchies et qui donne la bonne valeur de la puissance transmise. C'est d'ailleurs ce que tout le monde fait sans se douter pour certains que, concernant ce problème, ils y a contradiction entre leur "action" et leur "croyance".

Je rappelle que tous ces calculs supposent un système sans perte, sinon cela complique sérieusement les calculs. Par ailleurs tout ce que j'ai dit d'une manière imagée est démontrable mathématiquement, comme l'a fait magistralement F6FQX sur son site :

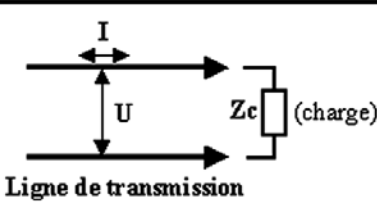
[http://f6fqx.chez-alice.fr/articlesF6FQX/article%20054/lignes_HF_sans_pertes%20 & math.pdf](http://f6fqx.chez-alice.fr/articlesF6FQX/article%20054/lignes_HF_sans_pertes%20&_math.pdf)

Pour contacter l'auteur : "f5nb@orange.fr"

Annexe A : Equations du ROS-mètre

Elles sont résumées dans le tableau 1 (les lecteurs doivent être familiers avec les vecteurs).

Equations fondamentales du ROSmètre ($Z_o = Z_{Ligne}$)



Sonde de courant : $\vec{I}_1 = \frac{\vec{I}}{k_1}$

Sonde de tension : $\vec{U}_1 = \frac{\vec{U}}{k_2}$

$\vec{U}_2 = \vec{I}_1 \times R = \frac{R \cdot \vec{I}}{k_1}$

$\vec{V}_i = \vec{U}_1 + \vec{U}_2$

$\vec{V}_i = \frac{\vec{U}}{k_2} + \frac{R \cdot \vec{I}}{k_1}$

$\vec{V}_r = \vec{U}_1 - \vec{U}_2$ ou $\vec{U}_1 + \vec{U}_2$ ou $\vec{U}_1 + \vec{U}_2$ ou...

$\vec{V}_r = \frac{\vec{U}}{k_2} - \frac{R \cdot \vec{I}}{k_1}$ ou $\frac{\vec{U}}{k_2} + \frac{R \cdot \vec{I}}{k_1}$ ou...

Impédance nominale $Z_o = \frac{k_1}{k_2} \cdot R$ Si $R = Z_o$, alors $k_1 = k_2$

Coefficient de réflexion = $\frac{|\vec{V}_r|}{|\vec{V}_i|}$

Rapport d'onde stationnaire (ROS) = $\frac{|\vec{V}_i| + |\vec{V}_r|}{|\vec{V}_i| - |\vec{V}_r|}$

Puissance transmise = $K \times (V_i^2 - V_r^2) = U \times I \times \cos(\varphi)$ (K dépend de Z_o, k_1 et k_2)

Variation de k_n	\nearrow	\searrow
Sensibilité	\searrow	\nearrow
Précision	\nearrow	\searrow

Tableau 1 : Equations fondamentales du ROSmètre

On remarquera dans ce tableau qu'il n'y a ni ligne, ni condensateur, ni bobine, ni transformateur si l'on fait k_1 et $k_2 = 1$. Par ailleurs, il n'y a qu'une résistance R. Cette seule résistance de mesure plus un ampli opérationnel (AOP + résistances) suffisent pour fabriquer un ROSmètre. Je laisse les électroniciens imaginer le schéma. Pour les autres, un exemple applicatif est fourni dans le Radio-REF de septembre 2012 (plus erratum en novembre). L'article est intitulé "ROS-mètre 137 kHz".

Annexe B : *Emetteur avec impédance de charge variable*

Depuis quelques années, on trouve sur le marché des émetteurs HF radioamateurs avec une boîte d'accord incorporée. Ce principe n'est pas nouveau, car il existait déjà dans les émetteurs à lampes du "bon vieux temps". La différence réside dans l'automatisation actuelle de l'accord.

Physiquement, la "sortie antenne" se trouve alors après la boîte d'accord et le ROSmètre est incorporé. Dans ce cas, la mesure du ROS nous renseigne seulement sur la réussite de l'accord par la boîte automatique. L'impédance de référence du ROSmètre n'a aucune importance. Elle est déterminée par le concepteur de la boîte selon des critères internes à l'émetteur. Alors, la sortie "physique" de l'émetteur peut avoir une impédance interne "conjuguée" à celle de la charge dans une grande plage de valeurs. Ainsi on compense un comportement inconnu de la ligne et/ou de l'antenne. De ce côté on est en présence d'une onde plus ou moins complexe, donc avec puissance directe et puissance réfléchie selon la théorie des ondes et de l'autre, on a un système purement électrique avec une impédance complexe, donc sans puissance réfléchie. Question : D'où provient et où va la puissance réfléchie dans la ligne ?

Conclusion : Quelle que soit la manière dont on aborde le problème, on ne trouve que contradictions dans l'application de cette théorie des "puissances baladeuses".

Annexe C : *Les guides d'ondes*

J'entends la question d'un hyperman : "Et dans les guides d'ondes, comment cela se passe-t-il d'après vous ?". Noter que dans ma réponse, je ne parle des micro-ondes qu'à travers la théorie du rayonnement. Je ne m'exprime pas avec le jargon des Hypermen car je ne connais que celui des "électriciens" de la radio.

Je commencerai par une précision importante : Le guide d'onde se trouve "derrière" l'antenne, dans le domaine du rayonnement, alors qu'une ligne se trouve "devant" l'antenne, dans le domaine électrique. Donc entre un câble coaxial et un guide d'onde on trouve une antenne. C'est en général un monopôle quart d'onde inséré dans une cavité qui s'ajuste mécaniquement au guide d'onde. Ce système antennaire est appelé "guide de transition" car les utilisateurs le voient comme un élément spécial d'un guide d'onde. Chacun a sa "vision" de l'électromagnétisme puisque les champs sont immatériels (un grand physicien les comparait à des "anges").

Un guide d'onde "parfait" est terminé par un cornet d'adaptation entre l'impédance du guide d'onde et l'impédance du milieu de propagation. Une mauvaise adaptation entraîne une "vraie" réflexion de l'onde E-M. Cette réflexion va créer une onde stationnaire dans le guide avec un effet sur l'antenne. Comme son fonctionnement est réversible, cela aura pour effet de modifier son impédance, donc une désadaptation qui sera répercutée dans la ligne. Ici, la formule de l'onde aller et de l'onde retour semble proche de la réalité, mais les deux hypothèses que l'on a prises pour les lignes fonctionnent car l'électromagnétisme est universel et il obéit aux mêmes lois, que ce soit entre les deux fils d'une ligne ou à l'intérieur d'un guide d'onde. Il y a quand même une différence fondamentale concernant les dimensions des deux systèmes : En effet,

avec une ligne le champ E-M est concentré entre deux fils espacés d'une très petite fraction de longueur d'onde alors qu'avec un guide d'onde il se propage à l'intérieur d'un tube ayant une section aux dimensions proches de la longueur d'onde. Si l'on raisonne en longueur électrique (α), une ligne est un système E-M "miniature" et un guide d'onde est un système E-M "gigantesque" (imaginez un guide d'onde pour la bande des 80 m !). Mais il existe des guides d'ondes gigantesques naturels, par exemple, pour les VLF (sol - ionosphère couche D), pour les HF (conduits ionosphériques couche E) et pour les VHF (conduits troposphériques). Par ailleurs, toute surface conductrice de grande importance "guide" une onde émise au ras de celle-ci avec une polarisation perpendiculaire. Ainsi on a la propagation par onde de sol pour toutes les fréquences (polar V) mais il faut tenir compte de la conductivité du sol qui diminue comme la racine carrée de la fréquence. Le phénomène est encore sensible en VHF, ce qui permet une propagation à la surface de la mer au-delà de l'horizon (l'eau salée est bonne conductrice).

Pour terminer, voici une méthode pour mesurer les pertes dans un guide d'onde :
Connecter à l'antenne (guide de transition) un analyseur d'impédance complexe (genre VNA).
Noter que le réflecteur parabolique devra être en place.
Mesurer la partie "réelle" de l'impédance, soit **R_a** (résistance d'antenne).
Obturer la sortie du guide d'onde par une plaque métallique très bonne conductrice.
Mesurer à nouveau la partie réelle, soit **R_p** (résistance de pertes).
Alors la résistance de rayonnement **R_r** est égale à $R_a - R_p$ et le rendement est égal à $R_r / (R_r + R_p)$. Si R_p est égal à zéro, le rendement est de 100%.
Noter que la partie "réactive" de l'impédance ne joue aucun rôle.
Cette méthode est également valable pour n'importe quelle antenne à partir des VHF (pour sa taille) en enfermant l'antenne dans une enceinte métallique close. C'est plus facile à mettre en œuvre avec les monopôles.

Note (1) : *Il existe des antennes à ondes progressives, en particulier du type " antenne monopôle long-fil". Son extrémité est reliée à la terre à travers une résistance égale à son impédance linéique (de l'ordre de 600 Ω). La moitié de la puissance est consommée dans cette charge (-3 dB) mais comme l'opération entraîne une unidirectionnalité, la directivité augmente alors de deux fois et concernant le gain, elle compense la perte dans la charge. L'avantage du système sort du cadre de cet article.*