

Retour sur les

"Commentaires sur les ROS-mètres"

Robert BERRANGER F5NB

Dans le Radio-REF de décembre 2010, F8DKK nous a fait part de ses déconvenues avec la fabrication d'un ROS-mètre basé sur l'utilisation de sondes de courant et de tension. J'ai fait une analyse de son problème, et je vous la livre ici.

Résumé du contexte : L'auteur voulant expérimenter un ROS-mètre HF décide de fabriquer deux variantes d'un ROS-mètre HF standard. Les deux schémas théoriques qu'il nous donne sont reproduits sur la figure 1.

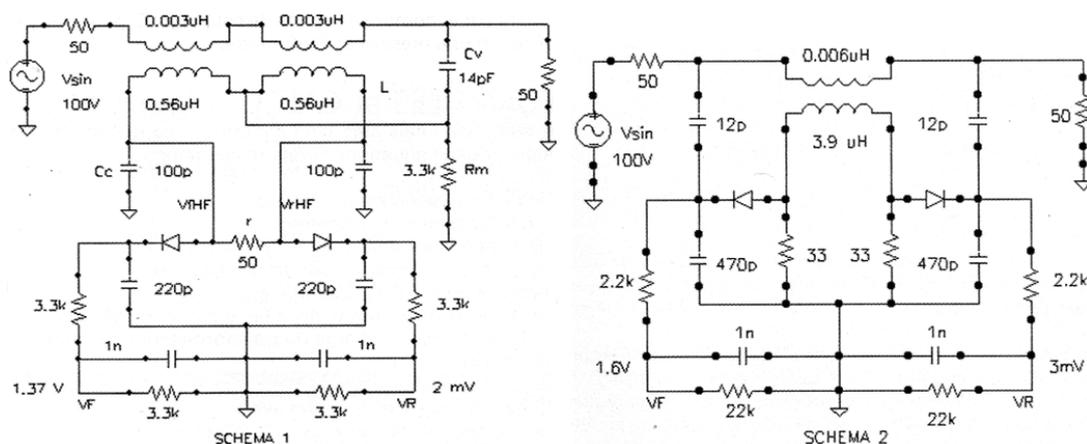


Figure 1.

Il a finalement opté pour la version "SCHEMA 1". N'obtenant pas de bons résultats de mesures, il en attribue la faute au principe de ce ROS-mètre. C'est aller un peu vite en besogne. Mes nombreuses déconvenues au cours de plusieurs années de métier m'ont appris qu'il fallait d'abord suspecter l'expérimentation avant d'incriminer la théorie.

Dans cet article, je commencerai par expliquer le fonctionnement "prototype" de ces ROSmètres ("copié-collé" d'un autre article personnel sur le sujet), puis j'analyserai le problème de l'OM.

Principe du ROS-mètre HF (début de l'extrait).

Un ROS-mètre HF ne mesure pas directement un rapport d'onde stationnaire, car la mesure se fait en un seul point. En réalité, il mesure un déséquilibre, en niveau et en phase, entre le courant circulant dans une charge ⁽¹⁾ et la tension à ses bornes. L'équilibre est obtenu par étalonnage lorsque la charge est égale à l'impédance nominale du ROS-mètre.

Il se trouve que ce déséquilibre est représentatif du rapport d'onde stationnaire, lorsque la mesure est faite en un point d'une ligne HF d'impédance égale à celle du ROS-mètre. Dans le cas où il n'y a pas de ligne, on mesure un ROS équivalent. Cela n'a aucune incidence sur l'émetteur, car on démontre qu'une ligne qui est le siège d'une onde stationnaire, a un comportement réactif ⁽²⁾.

Physiquement, on ne peut pas comparer un courant avec une tension, il faut, soit deux courants, soit deux tensions. La méthode consiste donc à faire circuler le courant dans une résistance et on obtient ainsi une deuxième tension (proportionnelle et en phase avec le courant) que l'on peut comparer avec la première. En pratique on utilisera des "échantillons" du courant et de la tension prélevés à l'aide de sondes. Nous avons sur la figure 2 le principe de base.

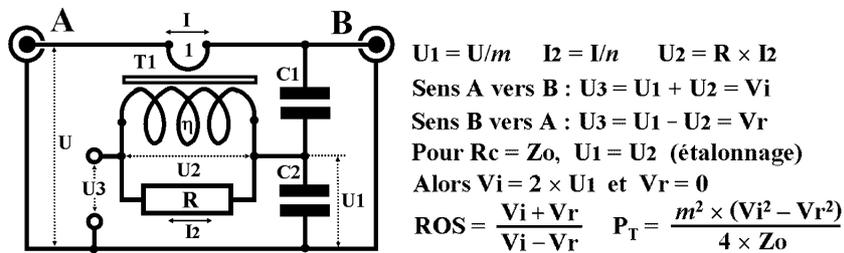


Figure 2

Une sonde de courant de rapport n est faite par T1. Le courant du secondaire de T1 circulant dans la résistance R développe une tension U2. Une sonde de tension U1 de rapport m est faite par le diviseur capacitif C1/C2⁽³⁾. On ajuste le rapport m de manière qu'avec une charge nominale (Z_0), U1 soit égale à U2.

Lorsque la source est en (A) et la charge nominale en (B), la tension U2 est en phase avec U1, et leur somme (U3) est appelée par convention, Vi.

Lorsque la source est en (B) et la charge nominale en (A), la tension U2 est en opposition de phase avec U1, et leur somme (U3) est égale à zéro. Elle est appelée par convention, Vr.

Lorsque la charge s'écarte de la valeur nominale Z_0 , en module, et/ou en phase, Vi augmente un peu et Vr augmente rapidement. La valeur du ROS s'obtient par calcul et est égale à $|Vi+Vr| / |Vi-Vr|$ (valeurs absolues de Vi et Vr). La puissance dissipée par la charge (puissance transmise) s'obtient en calculant : $P = K(Vi^2 - Vr^2)$, avec $K = m^2 / (4 \cdot Z_0)$.

Pour éviter d'avoir à retourner le ROS-mètre pour mesurer Vr, on peut utiliser un deuxième transfo de courant branché en sens inverse. Nous obtenons ainsi simultanément Vi et Vr, ce qui permet de calculer le ROS sans manipulation. Il est alors plus simple et plus précis d'utiliser un seul transfo avec deux enroulements secondaires symétriques. Pour supprimer le problème de l'appariement des deux résistances, on les remplace par une seule de valeur double. Tout ceci est montré sur la figure 3.

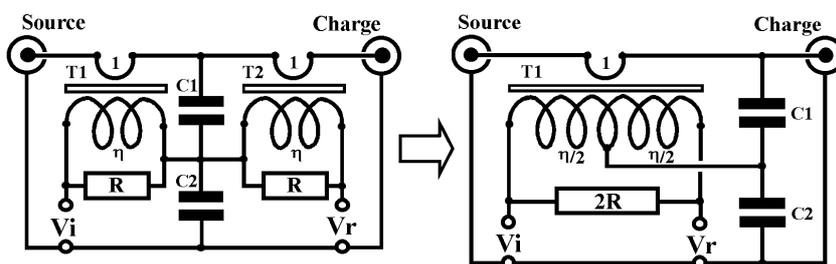


Figure 3

Enfin, il ne reste plus qu'à adjoindre deux détecteurs pour mesurer en continu les valeurs absolues de Vi et Vr. Nous arrivons ainsi à la figure 4 qui est un grand classique parmi les ROS-mètres HF. Ce n'est pas la seule façon d'obtenir Vi et Vr, mais c'est la plus simple à mettre en œuvre pour un radioamateur.

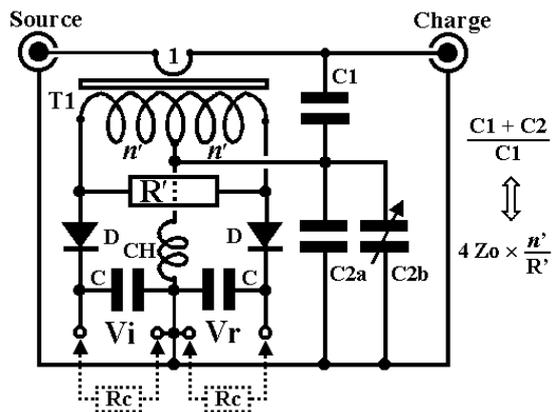


Figure 4

La self de choc en parallèle sur C2 permet de refermer en continu les circuits de détection. Par ailleurs, pour ne pas dégrader la précision, les diodes devront avoir un seuil de détection le plus faible possible. On prendra des diodes au germanium, ou à la rigueur, des diodes Schottky. On évitera de descendre en dessous de 100 kΩ pour les charges de détection Rc (résistance interne du voltmètre).

(Fin de l'extrait).

Le problème de l'auteur (et sans doute d'autres OM).

Il le résume ainsi :

"Pour le *Bruene bridge* (schéma 1), l'aiguille de ce ROS-mètre ne dévie pas pour des charges inférieures à 50 ohms". Ce que je traduis par : "Pour des charges inférieures à l'impédance nominale du **ROS-mètre de l'auteur**, celui-ci indique toujours un ROS de 1". La question qu'il faut alors se poser est celle-ci : "Est-ce que son ROS-mètre est une bonne réalisation du *Bruene bridge* ?". Je vais donc y répondre en commençant par en analyser le fonctionnement théorique.

Quand nous avons à résoudre un problème sur un système complexe, il vaut mieux séparer, autant qu'il est possible, le système en plusieurs sous systèmes indépendants, et examiner le problème sous ensemble par sous ensemble. Ici, nous avons deux sous ensembles **normalement** indépendants :

- le pont directif
- la mesure des tensions Vi et Vr après redressement (valeur absolue) à l'aide d'un voltmètre à tension continue.

Nous avons donc un problème possible de fonctionnement (le pont directif) et un problème possible de mesure (le voltmètre). Nous allons commencer par examiner le fonctionnement du pont directif.

Le pont directif "*Bruene bridge*".

Il sort de l'orthodoxie. En effet, on remarquera sur le schéma 1 que le condensateur "en pied" du diviseur capacitif n'est pas relié au point milieu des enroulements du transfo de courant, mais partagé par moitié à chaque extrémité. Cela va avoir pour principal effet d'introduire dans le diviseur capacitif une réactance inductive en parallèle avec une résistance. Qui dit association L-C dit résonance, même si elle est amortie. Le pont "*Bruene*" va alors perdre la (théorique) propriété apériodique du pont classique. Et c'est bien ce que vont nous montrer les simulations à l'aide du logiciel de simulation PSPICE.

Utilisation d'un simulateur temporel comme PSpice.

Les simulateurs de circuits électroniques sont classés en deux grandes catégories : les simulateurs fréquentiels et les simulateurs temporels, comme PSPICE (cœur "Spice"). Les simulateurs fréquentiels donnent des résultats équivalents aux analyseurs de réseaux (VNA) et aux analyseurs de spectres. Les simulateurs temporels donnent des résultats équivalents à un oscilloscope, mais ils peuvent également donner les mêmes résultats que les simulateurs fréquentiels. Les fréquentiels travaillent sur des signaux forcément stationnaires et les temporels sur des signaux stationnaires, mais également sur des signaux transitoires.

Or, la notion même d'onde stationnaire (ROS) impose un signal sinusoïdal stationnaire (CW). Il est donc judicieux, pour simuler le fonctionnement des ponts directifs, de travailler en mode fréquentiel.

L'auteur a travaillé en mode temporel, mode imposé par l'introduction des détecteurs. Ce mode demande un très grand nombre de calculs pour arriver à l'état stationnaire du système (attendre le chargement des condensateurs de détection, par exemple). On peut réduire le temps de calcul si l'on donne certaines conditions initiales connues (il faut être sûr de soi). Mais l'argument décisif concerne le fait que nous n'obtenons un résultat que pour **une seule fréquence**, alors qu'avec le mode fréquentiel, nous avons les résultats pour une multitude (des milliers) de fréquences, et dans un temps plus court. Le mode temporel est réservé pour des cas transitoires particuliers. Il est donc inadéquat pour notre cas. S'il est quand même utilisé, il faut s'assurer d'être bien arrivé à l'état stationnaire, sinon c'est un grand risque d'erreur de mesure.

Le "Bruene bridge" comparé au système classique.

Nous avons sur la figure 5 les performances comparées du "Bruene bridge" avec un système classique. Les schémas sont ceux que j'ai introduits dans le simulateur ⁽⁴⁾.

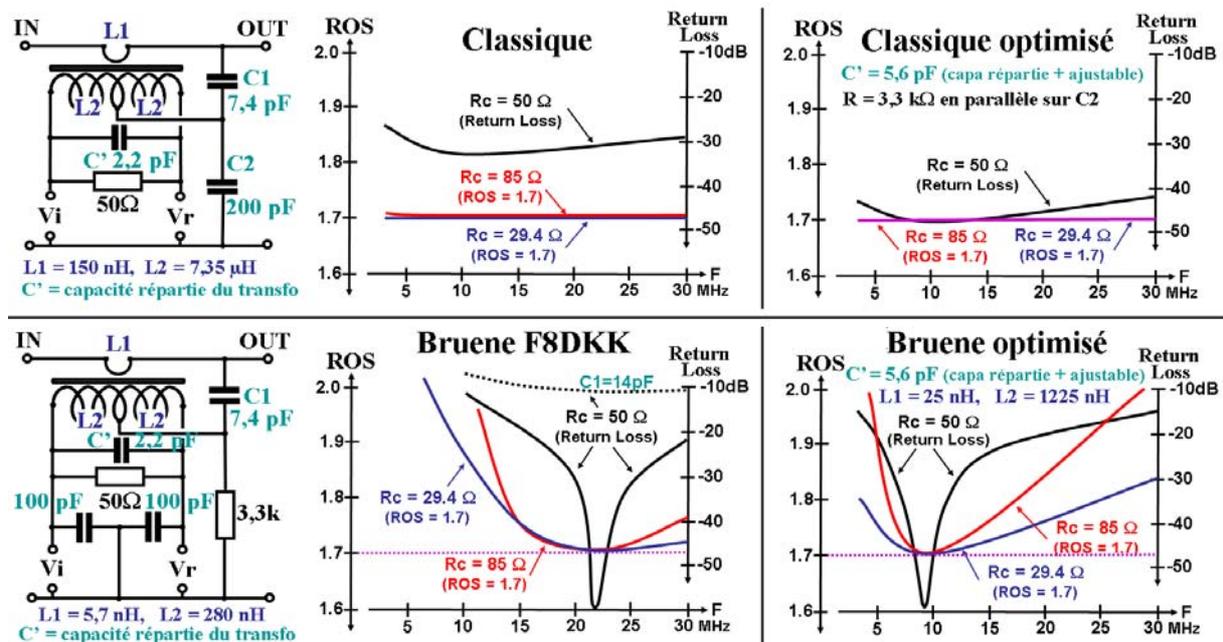


Figure 5.

Noter que pour le "Bruene F8DKK" j'ai simulé un transfo de courant symétrique correspondant à celui qui a été construit par l'OM, et pas deux transfos séparés comme il a mis dans sa simulation (schéma 1 de la fig.1). J'ai pris l'AL de 5,7 nH qu'il a donné pour son tore,

et 2 fois 7 spires comme on peut les compter sur sa photo N° 3. Pour le classique, j'ai pris un AL de 150nH, valeur des tores que j'utilise (valeur peu critique). Dans les deux cas, j'ai tenu compte de 2,2 pF de capacité répartie entre les secondaires du transfo pour lequel j'ai pris un coefficient de couplage $K = 0,999$. Cette valeur est peut être optimiste pour le transfo de F8DKK, étant donné son faible AL, car K est d'autant plus proche de 1 que la perméabilité de la ferrite est élevée.

Systèmes non optimisés :

Pour le classique, c'est le schéma de base minimum.

Pour le "Bruene", la courbe noire en pointillés donne le return-loss ⁽⁵⁾ pour la capacité d'ajustage de 14 pF de la fig. 1. Les autres courbes correspondent à une capacité de 7,4 pF, obtenue après optimisation du return-loss. Noter que la précision est conservée dans une bande de fréquence plus grande pour des charges inférieures à Z_0 , comme pour tous les ROS-mètres basés sur ce principe.

Systèmes optimisés :

Pour les deux systèmes, l'optimisation en bas de bande se fait grâce à la résistance de 3,3 k Ω en parallèle sur la 200 pF, et l'optimisation en haut de bande se fait en portant C' à 5,6 pF grâce à un petit ajustable.

Pour le Bruene, l'optimisation consiste en plus ici, à choisir un AL de telle manière que le return-loss soit le même aux deux extrémités de la bande HF.

Conclusions :

Avec le système classique "basique", bien que le return-loss ne soit pas démentiel, la précision reste très bonne dans toute la bande HF. Elle devient excellente après optimisation.

Le pont "Bruene bridge" fonctionne normalement avec une précision acceptable dans une bande de fréquence réduite qui est fonction de ses composants, transfo et condensateurs.

Attention : Les résultats de la simulation ne seront obtenus en pratique qu'avec une construction rigoureuse du système, en particulier du transfo de courant. Penser au blindage électrostatique entre primaire et secondaire et soigner la symétrie entre les secondaires. Le "design" détaillé d'un tel coupleur sort de l'objet de cet article. La figure 6 montre une réalisation personnelle pour un ROS-mètre automatique 3 - 1000 W, 1,5 - 30 MHz.

L'espacement de 2,54 mm entre les trous du CI donne l'échelle. Les écrous sont ceux des prises N d'entrée et de sortie.

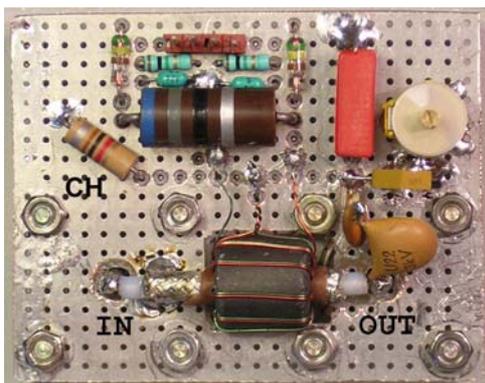


Figure 6.

Donc, si le pont fonctionne correctement, le problème devrait venir de la mesure de V_i et V_r . C'est ce que nous allons voir.

La mesure de V_i et V_r .

Nous avons sur la figure 7 le synoptique du circuit de détection de l'auteur.

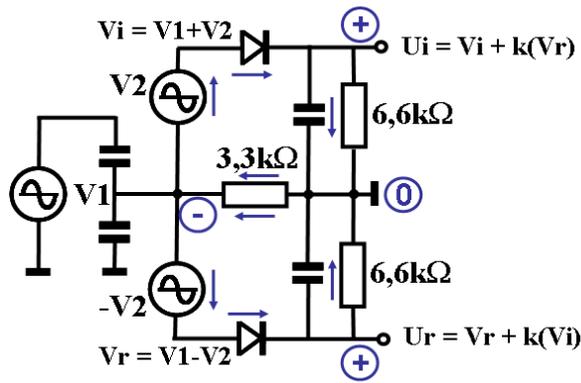


Figure 7.

La particularité des systèmes que nous avons vus réside dans la nécessité de lire, après redressement, les tensions V_i et V_r avec un **voltmètre à haute impédance** en trouvant un moyen pour refermer le circuit en continu.

Sur le schéma 1, le circuit se referme avec une résistance de 3,3 k Ω . Celle-ci n'a pas beaucoup d'influence en HF, mais elle en a beaucoup plus en continu si les résistances de charge sont faibles. Or celles-ci sont de 6,6 k Ω . Nous nous retrouvons avec une résistance de mode commun égale au tiers des charges totales. Alors les tensions détectées ne sont plus égales à V_i et V_r , mais à une combinaison des deux comme indiqué sur la fig. 7. Cela suffit pour fausser complètement la mesure.

La solution la plus simple consiste à augmenter fortement les résistances de charge des détections et à mettre en parallèle sur la résistance de 3,3 k Ω , une self de choc qui a une résistance très faible en continu⁽⁶⁾. La valeur de celle-ci doit être telle que sa propre fréquence de résonance soit en dessous de la bande de fréquence utile. Sur le ROS-mètre de la figure 6, cette self de choc a une valeur de 1 mH. Avec des diodes au germanium et des résistances de charge de 300 k Ω , la précision est encore bonne pour une puissance transmise de 3 watts seulement.

Pour la résistance de charge, un voltmètre de 20 k Ω /V (galvanomètre de 50 μ A) ne devrait pas diminuer sensiblement la précision avec quelques dizaines de watts (coupleur -23dB). En prenant les précautions d'usage pour la mise en oeuvre de ces types de ROS-mètres, classiques, de Bruene, ou d'autres inventeurs géniaux, il n'y a aucune raison pour qu'ils ne fonctionnent pas correctement dans les limites des bandes pour lesquels ils ont été **correctement** construits. Si une réalisation ne fonctionne pas comme attendue, il ne faut pas accuser le ROS-mètre, mais l'expérimentateur (erreur de fabrication ou erreur de mesure, parfois les deux, et il y a même des cas où elles se compensent).

Le ROS-mètre "reflectometer" (schéma 2).

Le fonctionnement de ce ROS-mètre est beaucoup plus complexe, dans la mesure où les diodes de détection sont insérées dans le pont. Ainsi, l'addition vectorielle de $V_1 + V_2$ ne se fait pas sur la sinusoïde complète, mais sur une demie sinusoïde. Pour obtenir du continu, il suffit de moyenner les résultats des additions grâce à des filtres passe-bas.

A priori, il est à large bande. Sa détection ne pose pas de problème en continu (pas besoin de selfs de choc) mais son étalonnage nécessite de régler séparément les voies V_r et V_i par retournement du ROS-mètre. Les 33 Ω et les 470 pF doivent être appariés. Les autres différences sont mineures.

Ce schéma, bien qu'il soit "élégant", me semble une complication inutile. Sachant que le point dur de ces types de ROS-mètres est la fabrication du transfo de courant, il n'est pas plus difficile à fabriquer avec un double enroulement au secondaire, bobiné deux fils en main. En

regardant la figure 5, on voit bien que la version classique est très performante tout en étant la plus simple à fabriquer.

Commentaires en vrac sur des extraits de l'article.

(Je résume). "Voulant *in fine* un ROS-mètre pour la bande 137 kHz, et ne disposant pour l'instant que d'un ampli de puissance à 28 MHz, j'ai commencé par réaliser un ROS-mètre HF. Au cours de l'étalonnage, j'ai rencontré un problème dont je vous donne une analyse".

- Effectivement, le principe utilisé pour un ROS-mètre HF est valable pour le 137 kHz, et même pour le secteur 50 Hz, mais naturellement avec des composants dimensionnés pour la bande de fréquence utilisée.

"J'ai voulu calibrer mon ROS-mètre puisque mon galvanomètre a une échelle linéaire"

- Connaissant mathématiquement la relation directe entre V_r et le ROS quand $V_i = 1$ (pleine échelle), la graduation du galvanomètre se fait indépendamment du ROS-mètre. Ensuite, on peut contrôler la précision de son ROS-mètre en comparant la position de l'aiguille par rapport à sa position idéale (et ce, pour toute la bande de fréquence, toutes les désadaptations, et toutes les puissances).

(Son ROS-mètre ne fonctionne pas pour des charges inférieures à Z_0 ...) "J'avais d'abord pensé à une erreur de câblage, mais après vérification et simulation sur Pspice, je me suis rendu compte que ça ne pouvait pas fonctionner"

- Il est certain que si le dysfonctionnement résulte d'une erreur dans le schéma d'application, le simulateur le confirmera.

"MANIPULATION"... "En connectant à la sortie de mon ICOM 720A qui a un ROS-mètre de ce type (Bruene) une charge de $28,6\Omega$ ($67\Omega/50\Omega$), l'aiguille du ROS-mètre reste à zéro (alors que le ROS est de 1,7)."

- Pour ma part, je pense que le ROS-mètre de l'ICOM 720A est du type "Classique", pour deux bonnes raisons, sa linéarité en fréquence, et son prix moins cher car il a une capa en moins (dans le domaine grand public, un sou est un sou). Ensuite, ce n'est sûrement pas un ROS-mètre comme on l'entend habituellement, car il se sert d'une manière différente de V_i et V_r . Se rappeler qu'avec V_i et V_r , on obtient le ROS par une division. Dans les ROS-mètres indépendants, c'est l'utilisateur qui fait la division manuellement avec un potentiomètre double sur V_i et V_r . Il ajuste V_i à la pleine échelle du galvanomètre et alors le ROS est indiqué directement en lisant V_r avec un galvanomètre correctement gradué. On peut faire l'opération automatiquement en effectuant un calcul analogique à l'aide d'amplis opérationnels suivant des détecteurs logarithmiques. Je doute, vu le coût de ce système qui n'apporte rien aux performances du poste, qu'il soit mis en œuvre par ICOM⁽⁷⁾. Nous avons la même problématique avec le S-mètre qui, comme le ROS-mètre, ne fait que de la figuration. A ne pas employer pour faire des mesures.

Les tensions V_i et V_r sont utilisées par le système ALC HF de régulation de puissance maxi (V_i) et de réduction de puissance au ROS (V_r). C'est d'ailleurs cette sécurité qui empêche de "voir" un ROS supérieur à 1,5 environ à pleine puissance. A l'intérieur de cette plage, le ROS indiqué est "vrai" pour la puissance maxi de sortie régulée par l'intermédiaire de V_i .

Important : On ne peut pas utiliser un émetteur HF pour **contrôler** un ROS-mètre, sauf à insérer entre l'émetteur et le ROS-mètre un atténuateur de puissance d'au moins 10 dB pour masquer le ROS vu par l'émetteur. Il ne reste plus alors qu'à espérer que la puissance restante soit suffisante pour le ROS-mètre.

"Le pont de Wheatstone, OK, ça marche toujours, mais un ROS-mètre, non. Les diodes montées sur les ponts sont des détecteurs de crête. Quand le pont est déséquilibré et que les tensions de crête augmentent, on peut lire leurs valeurs. Mais si la tension de crête diminue, et si le détecteur est réglé à zéro, le ROS-mètre ne dévie pas pour des charges inférieures à 50Ω ." (Suit le chapitre "ANALYSE").

- Sur la figure 7, le facteur K n'est pas un facteur linéaire, car les diodes sont insérées dans la boucle. On remarquera que le mode commun n'a d'effet que sur V1 (sonde de tension référencée à la masse) et pas sur V2 et -V2 (sondes de courant) qui sont des sources flottantes. Selon que V1 sera plus grand ou plus petit que V2 (donc que la charge sera plus grande ou plus petite que Zo), et compte tenu des seuils des diodes, l'effet de mode commun aura des conséquences différentes, non seulement en fonction de la charge, mais aussi en fonction de la puissance.

"POURQUOI CA MARCHE QUAND MEME, et POURQUOI C'EST TOUJOURS EMPLOYE... Il n'y a pratiquement pas de cas où l'impédance d'une antenne est inférieure à 50 Ohms. La seule que je connaisse est la ground plane à 37 ohms, où alors une antenne très courte..."

- Il ne faut pas oublier l'effet des lignes. En général, le ROS-mètre n'est pas connecté directement à l'antenne, mais à une ligne. Ainsi une G5RV à 3,75 MHz construite avec une ligne de 300Ω résonne avec une impédance d'une douzaine d'ohms. Avec une antenne LEVY, sur certaines bandes OM, selon les longueurs de la ligne et du doublet, on peut avoir des impédances de quelques ohms, alors que l'antenne est plus longue que lambda, etc. Bien souvent le ROS-mètre est inséré entre l'émetteur et une boîte de couplage. Pendant le réglage de celle-ci, elle présente des impédances qui peuvent être très éloignées de celle de la charge. Avec le problème de l'auteur, en manoeuvrant les boutons, l'aiguille du ROS-mètre aurait des mouvements bizarres. Je n'ai jamais rien remarqué de tel ⁽⁸⁾.

"FORMULES DE CALCUL"

- Il y a une erreur. Pour avoir les mêmes tensions aux sorties du diviseur de courant et du diviseur de tension, il faut que la résistance *r* en parallèle sur les **deux** enroulements du transfo fasse 100 Ω (2 x Zo). Le transfo a un rapport *n'* de 7 (secondaire de 2x7 spires). Conformément à l'égalité de la fig. 4, le rapport du diviseur capacitif doit être de 28 avec une résistance *r* de 50 Ω, ce qui nous donne une capacité Cv (C1) de **7,4 pF** (200/(28-1)), **exactement** celle qui correspond au maximum de return-loss dans la simulation (fig. 5).

"REMARQUES" "L'indication de ce type de ROS-mètre varie quand même avec la fréquence et la puissance d'émission"

- Pour la totalité de la bande HF (3-30 MHz), avec le *Bruene*, variation avec la fréquence, oui, cela est du au principe. Pour le classique, non, s'il est bien réalisé. Dans tous les cas, s'il y a une variation aux faibles puissances, c'est que les seuils des diodes sont trop élevés, et si c'est aux fortes puissances, c'est que la ferrite est mal dimensionnée ou de mauvaise qualité.

Conclusion.

Ma conclusion personnelle sera que pour un radioamateur peu outillé, il a intérêt à se contenter de la version basique qui est la plus facile à construire et à étalonner. Mais il faut qu'il respecte un minimum de conditions s'il veut obtenir un résultat satisfaisant ⁽⁹⁾. Le principe du ROS-mètre est simple, c'est sa mise en oeuvre qui est compliquée.

Bibliographie.

Vous saurez à peu près tout sur les ROS-mètres HF en lisant les articles suivants :

- "Fonctionnement du ROS-mètre HF" paru dans Radio-REF de mars 2003
- "Le ROS-mètre HF, thème et variations" paru dans Radio-REF de décembre 2003

Ces articles sont également consultables sur le site de f6krk.org, rubrique "Articles F5NB"

N-B : Corriger les erreurs dans les figures avec transfos symétriques où les rapports ne sont pas $n + n$, mais $n/2 + n/2$, comme montré sur la figure 3 de cet article.

Notes

- (1) *Au sens large, la charge comprenant la ligne quand celle-ci existe.*
- (2) *Bien que cela ne soit pas encore évident pour tout le monde.*
- (3) *Un diviseur capacitif est à large bande comme un diviseur résistif.*
- (4) *Si j'avais gradué l'échelle des fréquences en Log, les courbes auraient une belle symétrie.*
- (5) *Le return-loss, exprimé en décibels, est inversement proportionnel au ROS. Ici, il nous donne l'erreur du ROS-mètre pour une charge égale à Z_0 . Un return-loss de 40 dB correspond à un ROS de 1,02.*
- (6) *On peut se passer de la self de choc en utilisant comme détecteurs des doubleurs de tension. Mais, à précision égale, la sensibilité est bien plus faible (et inversement).*
- (7) *Il se peut que le circuit de détection du ROS-mètre du poste soit aussi mauvais que celui du schéma 1. Cela n'a pas d'importance si la sécurité du P.A. est assurée d'une manière ou d'une autre.*
- (8) *Je peux confirmer que mes ROS-mètres 50Ω (du type classique) fonctionnent correctement. Je viens d'aller le vérifier. Avec $P_{IN}=6W$, la précision est encore bonne pour $R_c = 250\Omega$, et très bonne pour $R_c=10\Omega$ (ROS 5). Pas de problème non plus pour les deux cas de ROS 1,7.*
- (9) *En ne cherchant pas à avoir une trop grande sensibilité et en s'accommodant d'une précision moyenne, on peut éviter la self de choc en prenant un galvanomètre de 50 μA .*