

Les erreurs de lecture du VSWR

KJ4EGU – Carlo

La nature et origine VSWR est un des sujets les plus commentés dans le milieu Radio amateur, il sert de paramètre d'évaluation sur la « qualité » d'antennes, coupleur, baluns, etc. Et en général sur n'importe quel élément utilisé en Radio fréquence.

Son origine, ses propriétés et ses conséquences sont largement bien documentées dans la littérature Ham radio mais aussi dans de nombreux ouvrages sur les antennes. De plus on trouve sur internet une infime quantité d'informations très complètes sur le sujet.

Néanmoins la précision de la mesure du VSWR est un sujet malheureusement peu ou pas publié dans la littérature radioamateur, car c'est complexe et même compliqué. Nous essayerons ici au fur et à mesure dans cet article d'en démystifier le pourquoi et le comment avec des exemples réels et concrets.

Les considérations, concernant les VNA, décrites dans ce document sont liées exclusivement à la mesure du S11.

Cet article ne prétend, en aucun cas, de juger la « qualité » d'une antenne et de ses performances en fonction de son VSWR. Il se limite uniquement à la précision de la mesure.

Nomenclature

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio, la *relation en tension d'ondes stationnaires*, ROS ou TOS dont la valeur se situe entre 1 et l'infini

Coefficient de réflexion : rapport en tension entre le signal réfléchi et le signal incident (direct), ou aussi la racine carrée de la puissance réfléchie/puissance directe, dont la valeur se situe entre 0 et 1

RL : Return Loss, *pertes de retour (dB)*, autre manière « d'exprimer » le VSWR, qui est la valeur logarithmique du coefficient de Reflection **VNA** : Vectorial Network Analyzer, analyseur de réseau vectoriel

RLB : Return Loss Bridge, pont de mesure du RL ou VSWR **externe** qui doit forcément se connecter à un analyseur de réseau scalaire, vectoriel ou un analyseur de spectre muni de tracking generator par exemple.

Reflective bridge (ou Resistive bridge) : pont résistif, élément **interne** des analyseurs d'antenne ou des VNA à bas prix, qui ont la fonction de « séparer » le signal réfléchi qui sera comparé au signal direct permettant de cette manière obtenir par calcul le S11, coef de réflexion, VSWR, RL, impédance, etc.

1. Quelques rappels très brefs sur la mesure du VSWR

Historique

Le mot VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), *relation en tension d'onde stationnaire (ROS)*, provient de la mesure réalisée à l'aide d'une ligne coaxiale fissurée, dans lequel on déplace une sonde RF qui aura la mission de mesurer la **tension** (V) maximale et minimale qui se crée sur une ligne de

transmission causée par des ondes réfléchies qui se superposent aux ondes incidentes

Fig.1. Le VSWR est simplement le rapport entre la tension max et min. C'est aussi simple que cela.

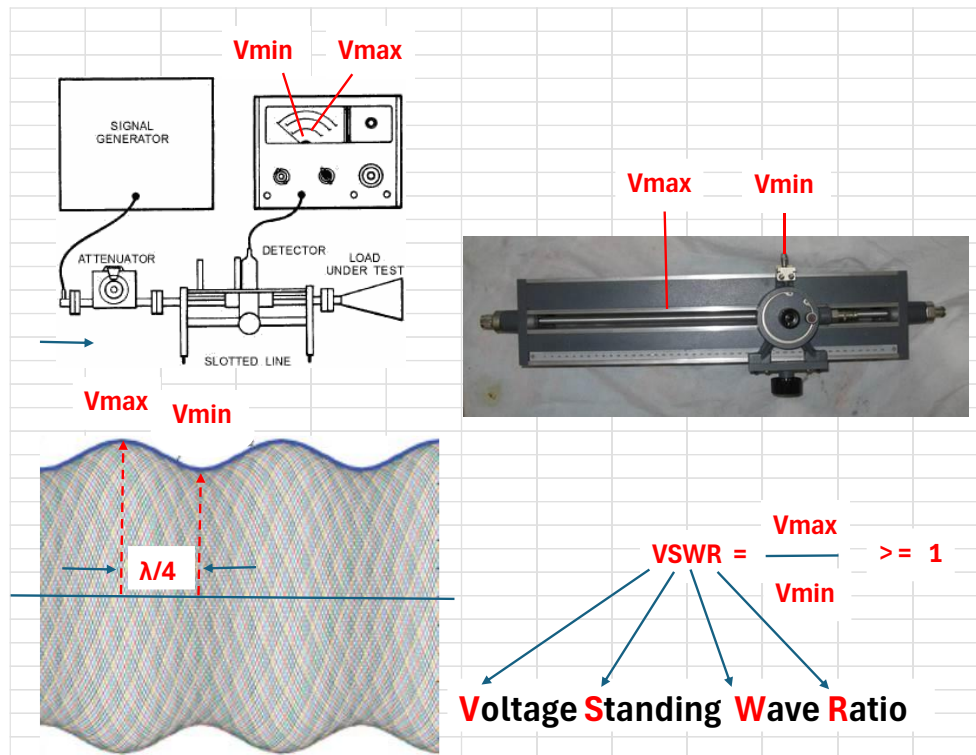


Fig. 1 Mesure du VSWR à l'aide d'une ligne coaxiale fissurée. Source : HP

La distance entre Vmax et Vmin est de 1 quart d'onde. Ce dispositif sert uniquement pour des mesures en laboratoire a faible puissance (quelques mW) et pour les longueurs d'onde de l'ordre du cm, valide pour des fréquences UHF jusqu'à quelques GHz. Si l'on souhaite réaliser des mesures à 7 MHz, la longueur de la ligne coaxiale devrait mesurer au moins 10 m de long ! Néanmoins la fig. 1 apporte de manière visuelle un élément très important qui nous servira tout au long de cet article.

La tension maximale (Vmax) est toujours plus grande que la tension minimale (Vmin), donc le ratio entre ces 2 valeurs est toujours supérieur à 1 au pire s'il n'y a pas d'ondes stationnaires Vmax= Vmin donc le VSWR serait égal à 1.

Par conséquent pour mesurer des VSWR avec de la puissance RF, il faut nécessairement un autre dispositif de mesure.

Mesure RF de puissance

L'idée est simple en soi. Il suffit d'insérer entre l'émetteur et l'antenne, un dispositif qui permettra de séparer (aiguiller) la puissance directe et réfléchi fig. 2. Ce dispositif s'appelle **coupleur directionnel** (fig3a). On aura donc 2 lectures. La puissance directe (Pforward — Pf) et la puissance réfléchi (Preflected – Pr)

Le VSWR est calculé grâce à la formule suivante :

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}}$$

Fig. 2 : Wattmètre de puissance RF et formule permettant de calculer le VSWR

Source : KJ4EGU



(b)

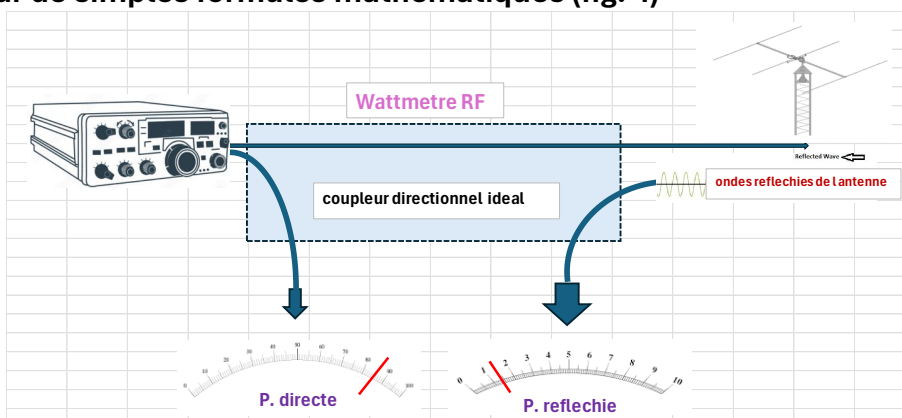
Fig. 3 : différents types de coupleur directionnel (a) — Affichage de la puissance et VSWR (b).

Source : diverse.

L'affichage du VSWR et/ou de la puissance peut prendre différentes formes (fig. 3 b). Tout wattmètre RF ou mesureur de VSWR de puissance comporte donc ces 2 éléments. Le coupleur directionnel + l'affichage sont souvent inclus dans le même boîtier.

Mesure du VSWR à faible puissance

Le principe reste le même, il s'agit de mesurer la puissance directe et réfléchi et de la convertir **par calcul** ces valeurs en VSWR. On peut également mesurer l'impédance de l'antenne pour ensuite calculer le VSWR. Nous n'allons pas ici rentrer dans les détails. Il existe une infinité de documentations qui expliquent très bien tous ces principes. Notons déjà que l'on peut exprimer le VSWR sous d'autres formes, comme le coefficient de réflexion, le RL (Return Loss — pertes de retour), S11, Impédance, etc. **Tous représentent la même chose, mais sous forme différente et sont liés par de simples formules mathématiques (fig. 4)**



Return Loss (dB) = $-10 \cdot \log \frac{\text{Forward Power}}{\text{Reflected Power}}$	$VSWR = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{1+\rho}{1-\rho}$
Return Loss (dB) = $-20 \cdot \log \Gamma $	$\rho = \frac{VSWR-1}{VSWR+1} = 10^{\frac{-RL}{20}}$
Reflection Coefficient $\Gamma = 10^{\frac{-\text{Return Loss}}{20}}$	$ML = -10 \log(1-\rho^2)$
Reflection Coefficient $\Gamma = \frac{VSWR-1}{VSWR+1}$	$RL = -20 \log(\rho)$
$VSWR = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}, \Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$	
$ \Gamma = \frac{VSWR-1}{VSWR+1}$	$Z = R + j\omega X$
$ \Gamma ^2 = \frac{P_{\text{reflected}}}{P_{\text{delivered}}}$	Using the analytical expression for impedance, the return loss becomes
$S_{11}[dB] = 20 \times \log(\Gamma)$	$S_{11} = \frac{(R_L^2 + X_L^2 - 50^2)}{(50 + R_L)^2 + X_L^2} + j \frac{100X_L}{(50 + R_L)^2 + X_L^2}$
	$VSWR = \frac{1 + \sqrt{P_{\text{ref}} / P_{\text{fwd}}}}{1 - \sqrt{P_{\text{ref}} / P_{\text{fwd}}}}$

Fig. 4 diverses expressions mathématiques qui relient le VSWR, RL, coefficient de réflexion, S11 et Z. Le coefficient de réflexion ici apparaît sous 2 symboles différents (Γ gamma et ρ rho). Source : divers internet

Voici quelques exemples qui permettront de nous familiariser avec ces petites formules :

Avec une puissance directe de 89 W et une puissance réfléchie de 6,2 W. quelle est la valeur du VSWR, RL et coefficient de réflexion (ρ ou Γ) ?

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{6.2W}{89W}}}{1 - \sqrt{\frac{6.2W}{89W}}} = 1.71 \quad \rho = \frac{1.71 - 1}{1.71 + 1} = 0.262 \quad RL = 20 \cdot \log_{10}(0.262) = -11.3 \text{ dB}$$

Mon instrument indique un RL de -19,7 dB. Quels est le VSWR et le ρ (coef de réflexion) et le % de puissance réfléchie ?

$$\rho = 10^{\frac{-19.7dB}{20}} = 0.111 \quad \rho^2 = 0.111^2 = 0.0123 = 1.23\% \text{ P reflechie}$$

$$VSWR = \frac{1+0.111}{1-0.111} = 1.25$$

Sur mon VNA je lis S11(lin) de 0,07, quel est le VSWR et RL ?

$$S_{11}(dB) = 20 \cdot \log_{10}(0.07) = -23.01 \quad VSWR = \frac{1+0.07}{1-0.07} = 1.15$$

$$RL (dB) = 20 \cdot \log_{10}(0.07) = -23.01$$

Avec un TX de 25 W et une antenne de RL = -17,6 dB, Quel est la puissance qui atteindra mon antenne ?

$$\rho = 10^{\frac{-17.6 \text{ dB}}{20}} = 0.816 \quad P_{\text{antenne}} = 25 \text{ W} \cdot [0.816^2] = 16.64 \text{ W}$$

Une antenne a une impédance de **84 ohms**, quel est le VSWR, RL et S11 ?

$$|S_{11}| \text{ ou } \rho = \frac{84 - 50}{84 + 50} = 0.253 \quad RL \text{ (dB)} = 20 \cdot \log_{10}(0.253) = -11.93 \text{ dB}$$

$$VSWR = \frac{1 + 0.253}{1 - 0.253} = 1.677$$

Une antenne présente une impédance complexe de **23-j12 Ohms**. Quel est le S11, RL, VSWR et % puissance réfléchie et puissance directe ?

$$S_{11} = \frac{[23^2 + (-12)^2 - 50^2]}{[(50 + 23)^2 + (-12)^2]} + j \frac{100 \cdot (-12)}{(50 + 23)^2 + (-12)^2}$$

$$S_{11} = 0.3338 - j 0.2193 \text{ nombre complexe (mag \& phase)}$$

$$|S_{11}| = \sqrt{0.3338^2 + 0.2193^2} = 0.3994 \text{ (coef de reflexion)}$$

$$RL = 20 \cdot \text{LOG}_{10}(0.3994) = -7.97 \text{ dB}$$

$$VSWR = \frac{1 + 0.3994}{1 - 0.3994} = 2.33$$

$$\text{Preflechie} = 0.3994^2 \cdot 100\% = 15.95 \%$$

$$P_{\text{directe}} = (1 - 0.3994^2) \cdot 100\% = 84.05 \%$$

Le VNA un Analyseurs d'antenne

Nous savons donc que pour mesurer le VSWR, il faut nécessairement connaître 2 données :

La puissance réfléchie (ou la tension de l'onde réfléchie) et la puissance directe (ou la tension de l'onde directe/incidente) qui nous servira aussi de signal de référence.

Ces 2 données sont extraites soit par un coupleur directionnel ou par un pont résistif (Résistive bridge) puis sont traitées numériquement afin d'en extraire par calcul le S11, VSWR, RL, impédance, réactance, etc.

Généralement les VNA à bas prix et analyseur d'antenne utilisent des ponts résistifs. Leur principale limitation est leur directivité qui affecte la précision de la mesure comme nous le verrons plus loin, la précision de la charge 50 ohms interne qui avec la fréquence commence à poser quelques problèmes et leurs pertes importantes qui limitent la dynamique de l'instrument (fig. 4).

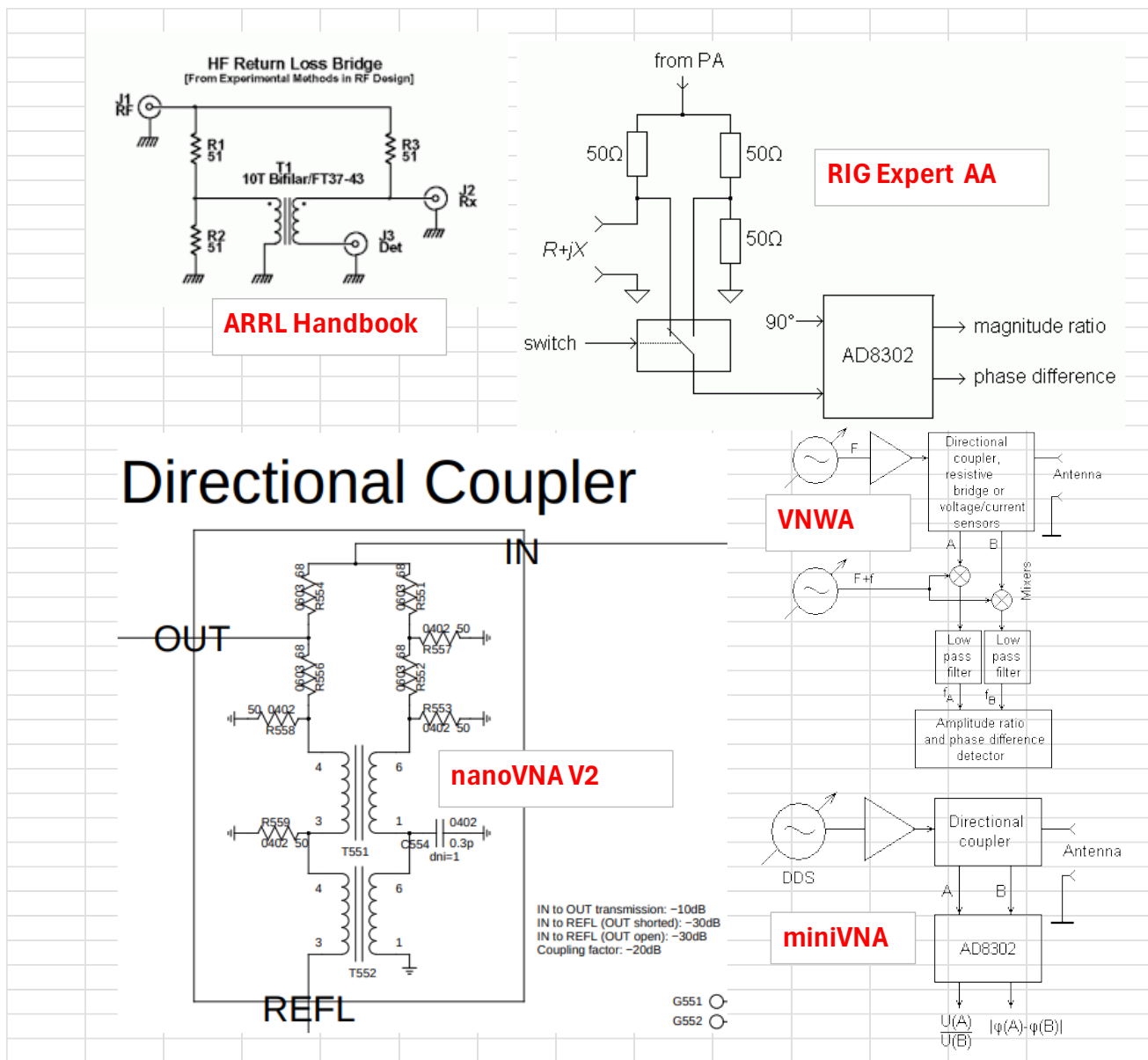


Fig. 4 : Les analyseurs antennes et VNA qui utilisent des ponts résistifs ou coupleurs directionnels. En voici quelques exemples. Source : divers internet

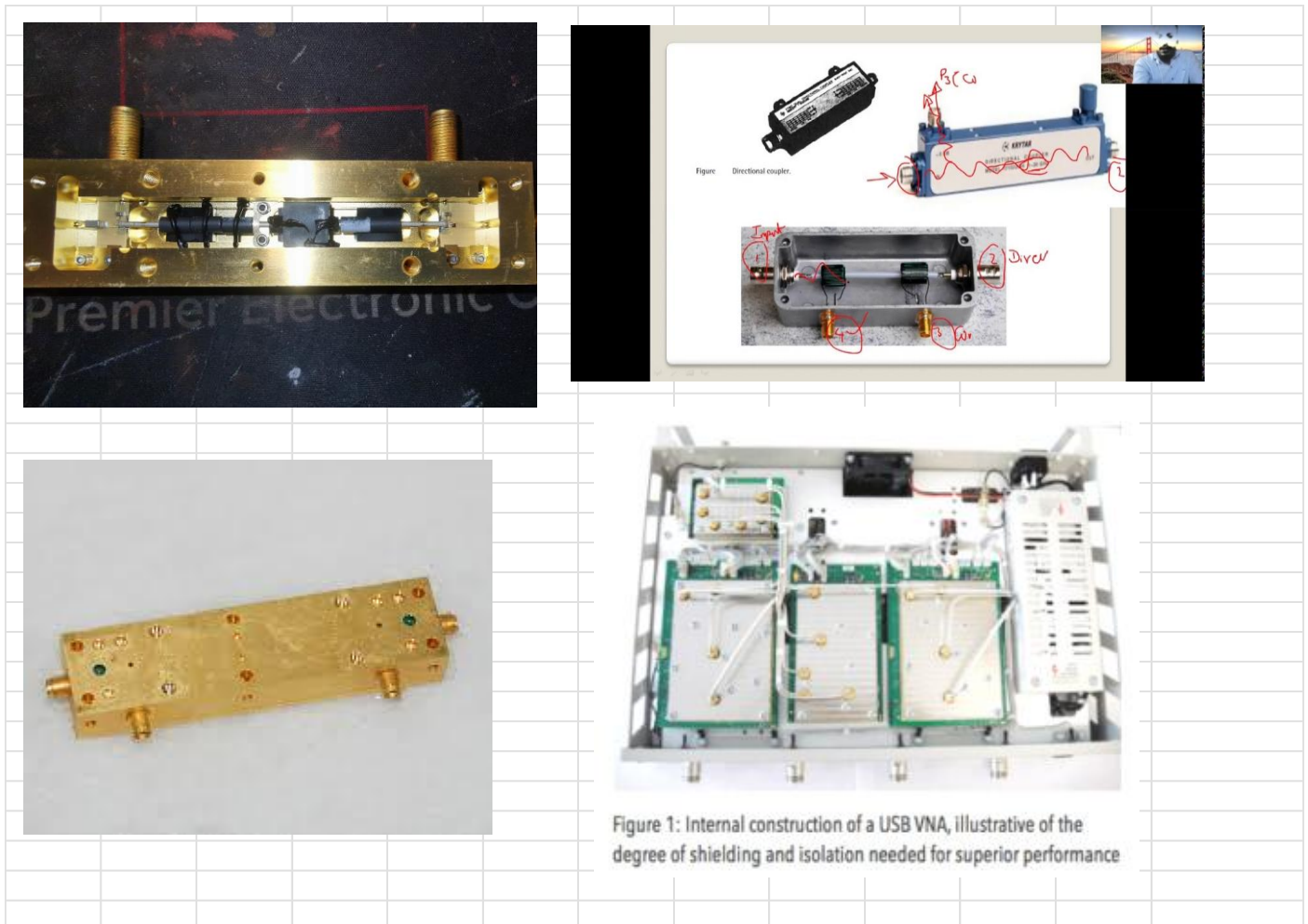


Fig. 5 : Les VNA « professionnels » avec leurs coupleurs directionnels. Source : divers — internet

Erreurs de mesure du VSWR

Exemple 1 : VSWR 1,00 antenne avec pertes câble coaxial

Examinons la fig. 1. Une antenne avec un **VSWR idéal (1,00)** est connectée à un transciever de 100W via un câble de 50 ohms ayant une perte de -0,223 dB. Les pertes du câble se traduisent en chaleur qui se dissipe tout au long de la ligne coaxiale. Comme l'antenne a un VSWR de 1,0, il n'y a pas de puissance réfléchie qui retourne vers le transciever.

La lecture du VSWR-mètre sur le transciever donne une lecture correcte du VSWR de l'antenne

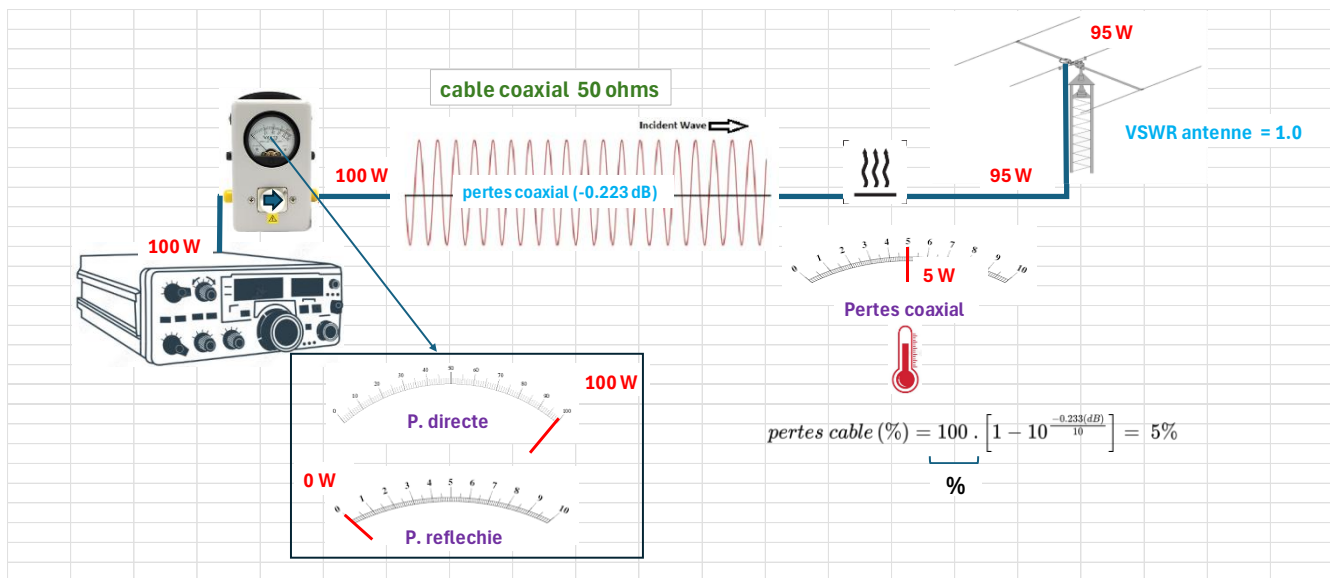


Fig.1 : Cas simple d'une installation idéale (VSWR antenne = 1,00). Source : KJ4EGU

Exemple 2 : VSWR 1 535 antennes avec les pertes du câble coaxial

Prenons le cas de la fig. 2, qui a priori est une situation plus réaliste. Une antenne avec un **VSWR de 1 535** avec un gain antenne de 6,2 dB connectés avec le même câble au transceiver de 100 W. Afin de mieux comprendre la situation nous connecterons 2 wattmètres étalons l'un a la sortie de l'émetteur et l'autre directement connecté à l'entrée de l'antenne. Le câble coaxial a toujours la même perte (-0,223 dB), mais son Impédance est parfaite 50 ohms (câble idéal).

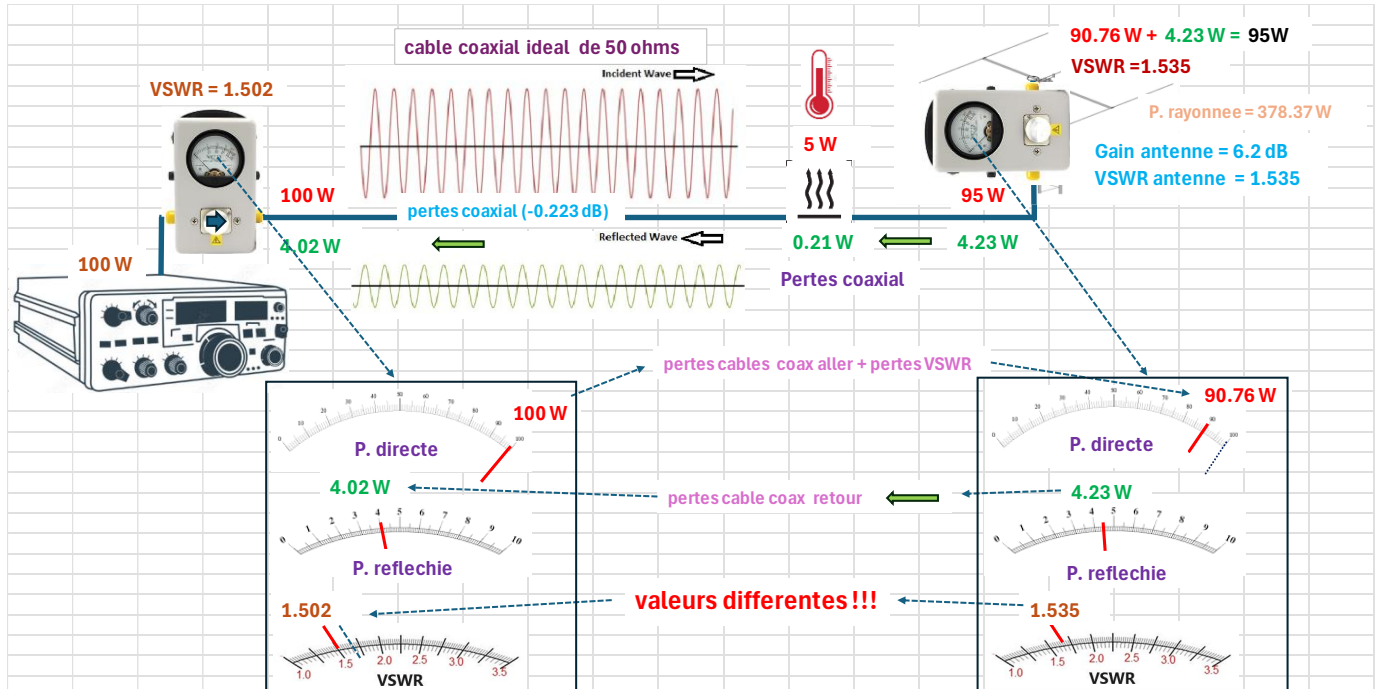


Fig.2 : le VSWR-mètre de l'émetteur ne lit pas la vraie valeur du VSWR antenne. Source : KJ4EGU

Ci-joint le jeu d'équations permet de calculer les différentes puissances et le VSWR final lu sur le wattmètre du transceiver.

$$P_{Tx} = 100 \text{ W}$$

$$\text{Gain antenne} = 6,2 \text{ dB}$$

VSWR antenne = **1.535**

Pertes câble coaxial = **-0.223 dB**

$$P. \text{dissipée coax aller} = P_{tx} \cdot \left[1 - 10^{\frac{PERTES \text{ COAX DB}}{10}} \right] = 100w \cdot \left[1 - 10^{\frac{-0.223 \text{ DB}}{10}} \right] = \mathbf{5 \text{ w}}$$

$$P. \text{entrée antenne} = P_{tx} \cdot \left[10^{\frac{PERTES \text{ COAX DB}}{10}} \right] = 100w \cdot \left[10^{\frac{-0.223 \text{ DB}}{10}} \right] = \mathbf{95 \text{ w}}$$

$$P. \text{retour antenne} = P_{tx} \cdot \left[10^{\frac{PERTES \text{ COAX DB}}{10}} \right] \cdot \left[\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right]^2 = 100w \cdot \left[10^{\frac{-0.223 \text{ DB}}{10}} \right] \cdot \left[\frac{1.535 - 1}{1.535 + 1} \right]^2 = \mathbf{4.23 \text{ w}}$$

$$P. \text{utile antenne} = 97.47 \text{ w} - 4.23 \text{ w} = \mathbf{90.76 \text{ w}}$$

$$P. \text{(apparente rayonnée)} = P_{tx} \cdot \left[10^{\frac{PERTES \text{ COAX DB}}{10}} \right] \cdot \left[1 - \left[\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right]^2 \right] \cdot 10^{\frac{G_{ant}}{10}} = 100 \text{ w} \cdot \left[10^{\frac{-0.223 \text{ DB}}{10}} \right] \cdot \left[1 - \left[\frac{1.535 - 1}{1.535 + 1} \right]^2 \right] \cdot \left[10^{\frac{6.2 \text{ dB}}{10}} \right] = \mathbf{378.37 \text{ w}}$$

$$P. \text{dissipée coax retour} = P_{tx} \cdot \left[10^{\frac{PERTES \text{ COAX DB}}{10}} \right] \cdot \left[\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right]^2 \cdot \left[1 - 10^{\frac{PERTES \text{ COAX DB}}{10}} \right] = 100 \text{ w} \cdot \left[10^{\frac{-0.223 \text{ DB}}{10}} \right] \cdot \left[\frac{1.535 - 1}{1.535 + 1} \right]^2 \cdot \left[1 - 10^{\frac{-0.223 \text{ DB}}{10}} \right] = \mathbf{0.21 \text{ w}}$$

$$P. \text{réfléchi} = P_{tx} \cdot \left[10^{\frac{2 \cdot PERTES \text{ COAX DB}}{10}} \right] \cdot \left[\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right]^2 = 100 \text{ w} \cdot \left[10^{\frac{2 \cdot -0.223 \text{ DB}}{10}} \right] \cdot \left[\frac{1.535 - 1}{1.535 + 1} \right]^2 = \mathbf{4.02 \text{ w}}$$

$$VSWR_{TX} = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_{refl}}{P_{directe}}}}{1 - \sqrt{\frac{P_{refl}}{P_{directe}}}} = \frac{1 + \sqrt{\frac{4.02 \text{ w}}{100 \text{ w}}}}{1 - \sqrt{\frac{4.02 \text{ w}}{100 \text{ w}}}} = \mathbf{1.502} \text{ qui est différent du VSWR antenne } \mathbf{1.535}$$

Les ondes réfléchies sur le trajet de retour antenne vers l'émetteur (générées par le VSWR de l'antenne) s'atténuent peu à peu dans la ligne coaxiale et se dissipent aussi en chaleur (0.21 W). Par conséquent le wattmètre de l'émetteur reçoit moins de puissance réfléchi (4 W) et par conséquent un moindre VSWR (fig.3).

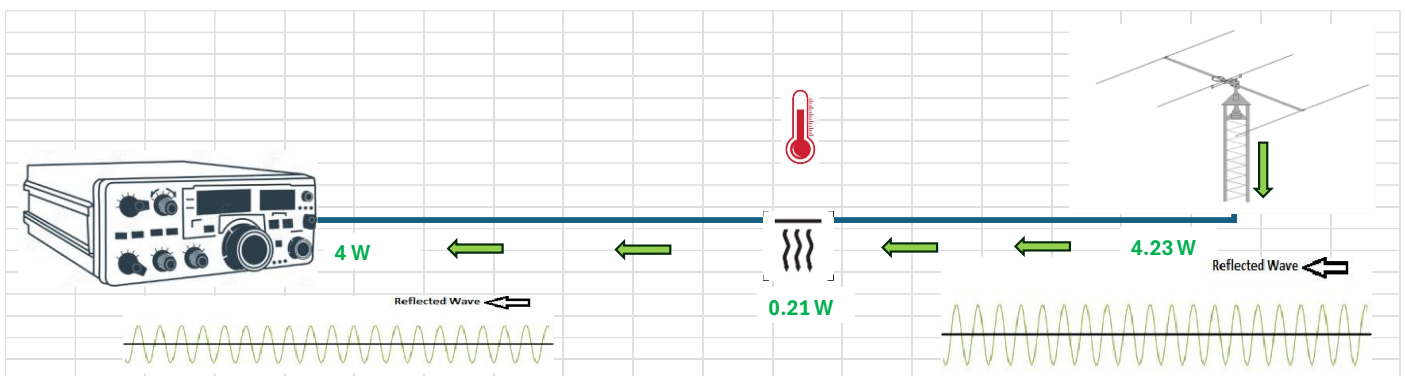


Fig.3 : le VSWR-mètre de l'émetteur ne lit pas la vraie valeur du VSWR antenne. Source : KJ4EGU

La puissance dissipée dans le coaxial uniquement sur le trajet de retour est calculée de la manière suivante :

$$pertes \text{ cable (retour)} = 100W \cdot \left[10^{\left(\frac{-0.223 \text{ dB}}{10} \right)} \right] \cdot \left[\frac{1.535 - 1}{1.535 + 1} \right]^2 \cdot \left[1 - 10^{\frac{-0.223 \text{ dB}}{10}} \right] = 0.21 \text{ W}$$

Essayons maintenant de donner une explication plutôt visuelle que mathématique

Mesurons, par exemple, une antenne avec un analyseur d'antenne ou un VNA (analyseur de réseau vectoriel) fig. 5.

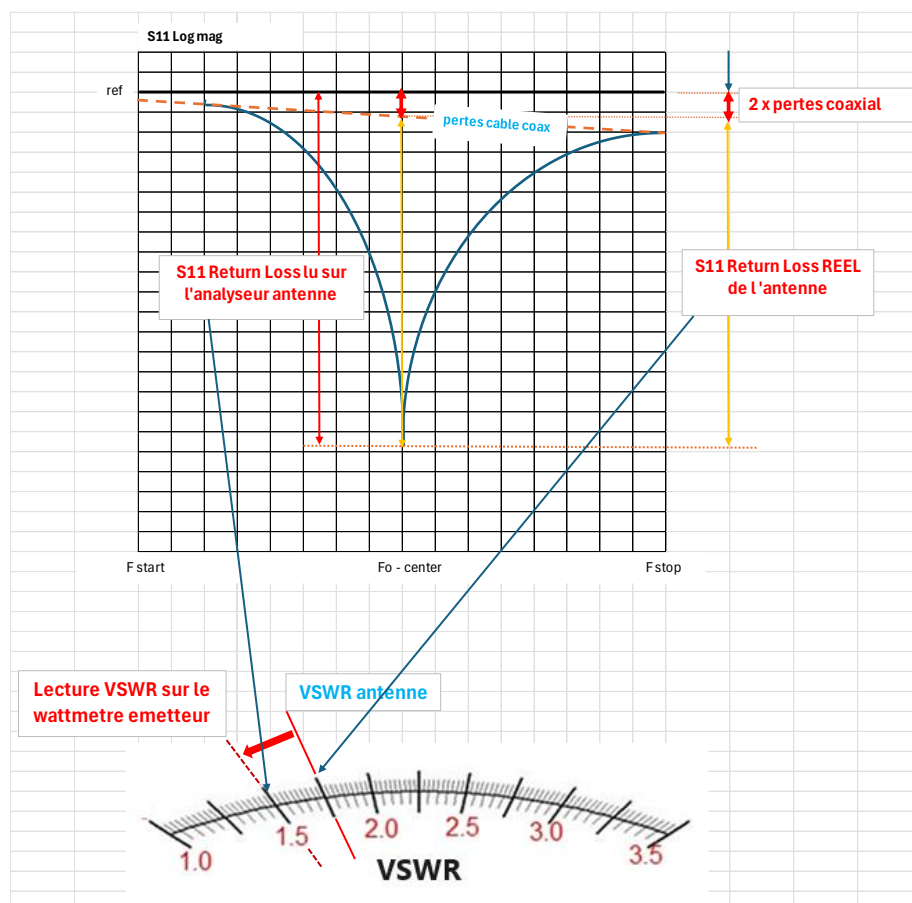


Fig.5 : l'erreur classique de lecture du VSWR ou S11 d'une antenne avec un câble coaxial. Source : KJ4EGU.

L'erreur provient du fait cette fois que l'on ne tient pas en compte des pertes du câble coaxial ou des autres pertes additionnelles entre l'émetteur et l'antenne (switch antenne, parafoudre, choke balun, antenna-tuner, balun antenne, etc.).

La mesure « *serait correcte* » si l'antenne était connectée directement à l'émetteur (par ex : Handy walkie) ou calibration du câble et accessoires inclue dans la calibration du VNA.

Tout élément RF inséré (ayant des pertes) entre émetteur et antenne donnera une lecture du VSWR différente.

Exemple 3 : VSWR 1 535 antenne + pertes câble + impédance du câble coaxial.

Voyons maintenant ce qui se passe si l'on tient compte des défauts d'impédance du câble coaxial.

Ci-joint des caractéristiques d'un câble coaxial 50 ohms **de qualité** — ECOFLEX 10 (fig. 6)

Key features

Diameter	10,2 ± 0,2 mm
Impedance	50 ± 2 Ω
Attenuation at 1 GHz/100 m	13,49 dB
f max	6 GHz
Euroclass acc. to EN 50575	Eca

Typ. Return loss

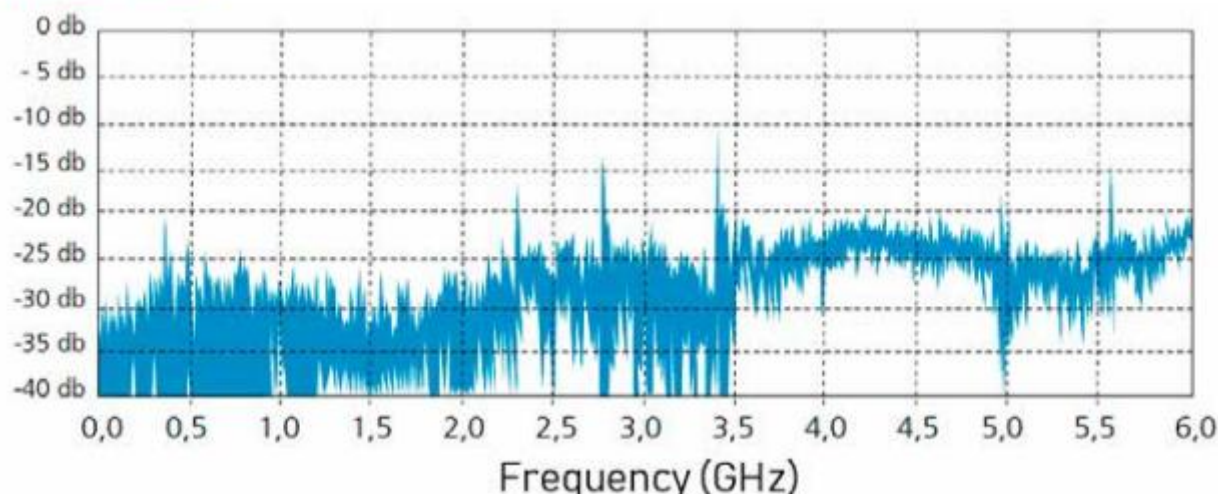


Fig.6 : Spécifications du câble coaxial ECOFLEX 10. Source : Ecoflex

Nous observons que le câble n'a pas une impédance caractéristique parfaite de 50 ohms. Jusqu'à 200 MHz il a un Return Loss (pertes de retour S11) de — 30 dB aprox, ce qui équivaut à un VSWR de 1,06. Aux fréquences supérieures la dégradation est encore plus importante.

$$VSWR = \frac{10^{\left(\frac{30}{20}\right)} + 1}{10^{\left(\frac{30}{20}\right)} - 1} = 1.06$$

La variation de l'impédance caractéristique du câble coaxial varie de 48 à 52 ohms (+/— 2 ohms) par rapport à son impédance caractéristique nominale (50 ohms). Cette variation s'appelle **SRL** « **structural return Loss** » dans le jargon professionnel, qui est une caractéristique importante pour juger la qualité d'un câble outre les pertes, puissance maximale, blindage, flexibilité, etc. Un long câble coaxial avec un "mauvais" SRL provoquera automatique des « bumps » (bosses) d'autant plus profondes que son SRL est faible (Fig. 8).

Certains fabricants le mentionnent dans leurs spécifications de la fig.7.

Max. Operating Voltage - Other:

Voltage	Description
Military Specification	900 V RMS

Typical Structural Return Loss:

Freq. (MHz)	Typical SRL (dB)
50	30
100	30
400	23
1000	21
3000	17

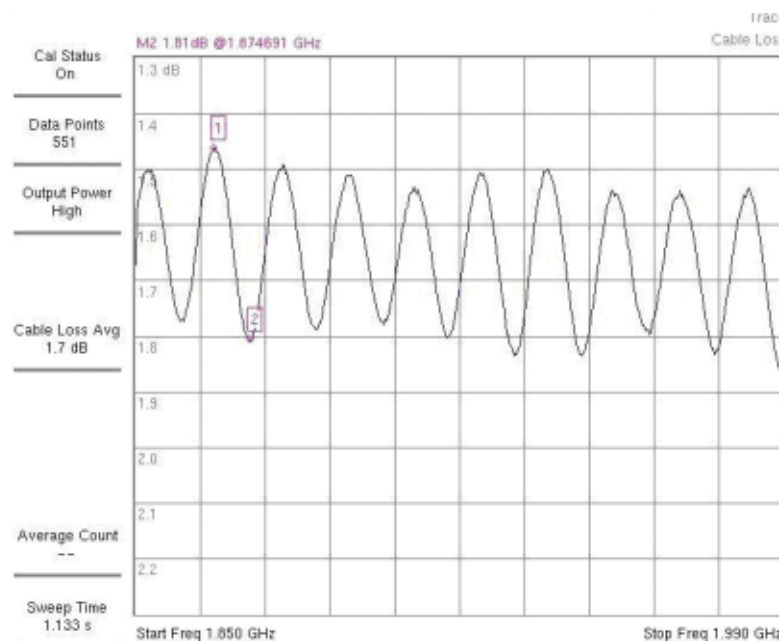
Fig.7 : **SRL** (Structural Return Loss) du câble Belden 84316. Source : Belden

Attention à ne pas confondre :

Le RL return Loss (pertes de retour S11) de l'antenne, qui est la variation de l'impédance de l'antenne par rapport à son impédance d'entrée (par exemple 50 ohms)

Le SRL (Structural Return Loss) du câble coaxial, qui est la variation de l'impédance du câble par rapport à son impédance caractéristique

Voyons de plus près maintenant l'impact d'un câble coaxial sur la lecture du VSWR. En mesurant les pertes d'un câble coaxial on s'aperçoit que la courbe présente des maxima et minima (fig.8). Ceux-ci sont dus, en partie, à la variation d'impédance du câble et des défauts (bosse et creux) de construction internes rémanents lors de la fabrication.



Picture 3: Cable Loss Measurement

Fig.8 : Mesure des pertes d'un câble coaxial à l'aide d'un VNA. Source : Anritsu

Examinons maintenant l'impact du VSWR du câble coaxial sur la lecture du VSWR à la sortie de l'émetteur (Fig.9). Nous observons cette fois-ci que **la lecture du VSWR a augmenté !!!!**, car la puissance réfléchie a aussi augmenté parce qu'on tient compte maintenant du VSWR du câble coaxial, ce qui complique la mesure.

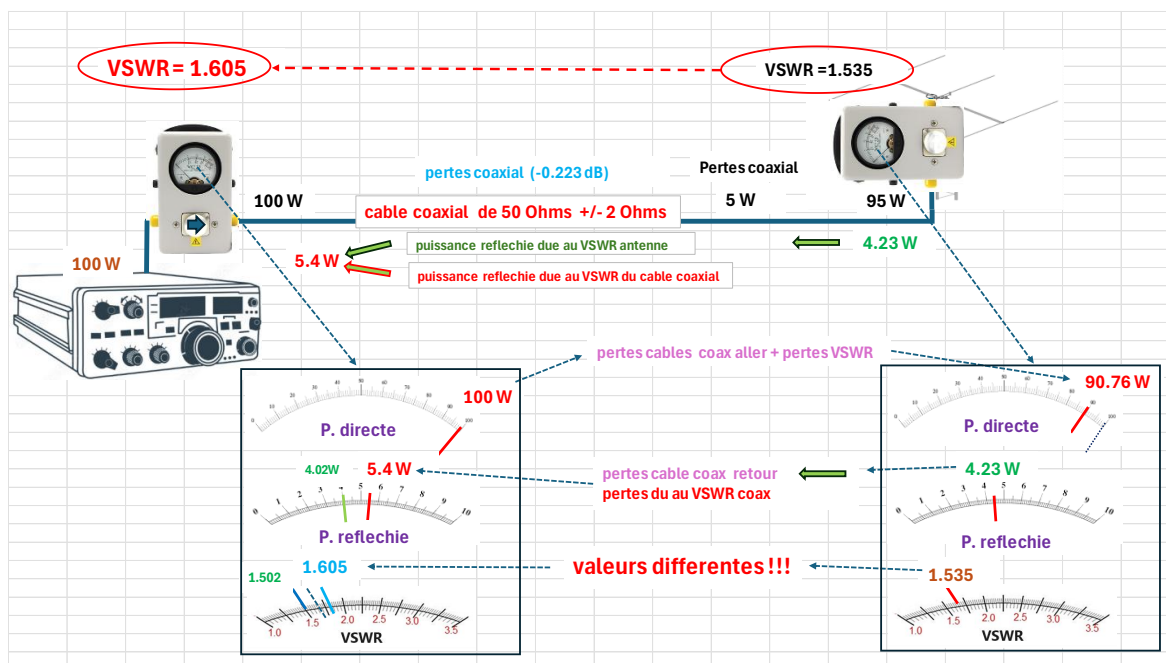


Fig.9 : le VSWR-mètre de l'émetteur ne lit pas la vraie valeur du VSWR antenne. Source : KJ4EGU

On avait au départ un VSWR antenne de 1 535, ensuite il a chuté à 1 502 à cause des pertes du câble coaxial et maintenant il augmente jusqu'à 1 605 à cause du VSWR du câble. La fig. 10 nous donne

l'explication. En effet le signal qui apparaît sur le port de la puissance réfléchie du coupleur directionnel n'est plus seulement dû aux ondes réfléchies par l'antenne, mais aussi aux ondes réfléchies dues aux imperfections du câble coaxial.

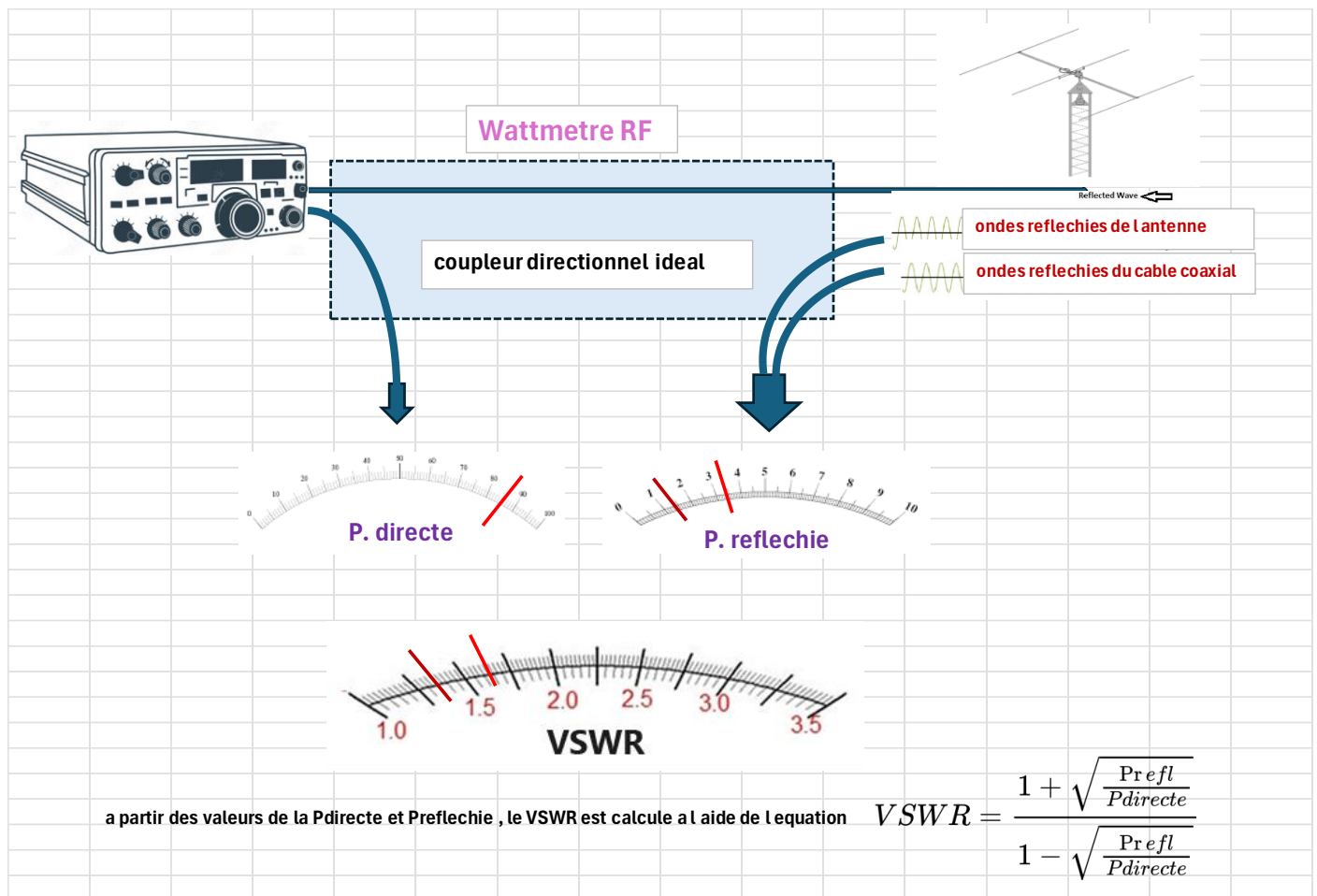


Fig.10 : la puissance réfléchie du wattmètre qui provient de 2 sources différentes et provoque des erreurs de mesure. Source : KJ4EGU

Puisque la puissance réfléchie augmente, le VSWR augmente également.

Puissance réfléchie = Puissance réfléchie VSWR antenne + Pertes dans le câble coaxial + Puissance réfléchie du au VSWR coaxial.

Attention cette équation n'est pas tout à fait exacte, la situation se complique et c'est justement l'intérêt de cet article d'essayer de comprendre cette situation, car :

- 1 — la difficulté provient du fait que chaque onde réfléchie a une amplitude et une phase particulière au moment où elle atteint le wattmètre. Donc la somme des différentes ondes réfléchies n'est pas arithmétique, mais plutôt **vectorielle**. Rappelons qu'un vecteur est une grandeur physique dotée d'une amplitude et d'une phase.
2. – la complexité provient aussi du fait que le wattmètre n'est en pas en mesure de distinguer les différentes sources d'ondes réfléchies et encore moins d'en connaître leur phase. A ce stade de notre analyse il est facile de comprendre **qu'il existera toujours une incertitude (source d'erreurs) avec la mesure du VSWR**, ceci est valable pour tous les wattmètres RF (aussi chers soient-ils) et même pour les VNA les plus performants sur le marché.

VSWR en serie (Cascaded VSWR)

Afin d'approfondir notre analyse, nous allons analyser la situation d'un système composé de 2 éléments avec 2 x VSWR en série et plus loin nous analyserons le cas de 7 VSWR successifs en série. Pour les aspects théoriques sur le sujet, des explications approfondies et des calculateurs « online ». Il suffit de googler 'Cascaded VSWR '.

Exemple 1 : 2 x VSWR en série

Jetons d'abord un coup d'œil sur la fig.11. Lorsque 2 éléments en série présentent 2 VSWR en série, nous avons déjà que nous aurons automatiquement des incertitudes de lecture du VSWR final (résultant) qui est impossible de prédire exactement, néanmoins ce l'on peut calculer ce sont les limites entre un VSWR min et VSWR max.

Aussi complexe est le thème, aussi simples sont les équations. Attention, ces équations sont valides seulement pour 2 VSWR en série. Notons-en bas de la fig. 11, une illustration montrant la somme vectorielle de ces valeurs.

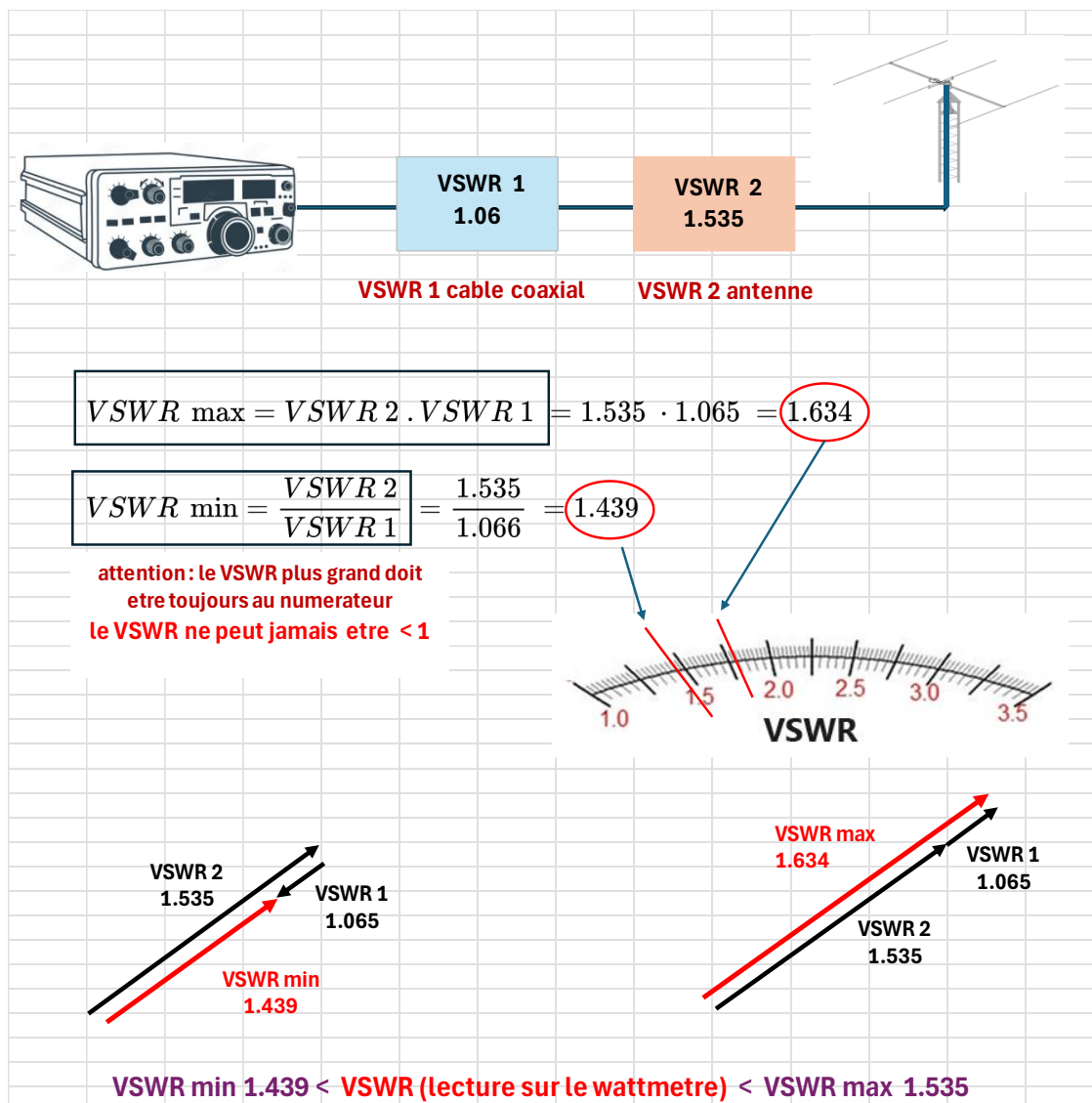


Fig.11 : cas simple de 2 VSWR en série — équations et représentation vectorielle. Source : KJ4EGU

Une meilleure illustration est visible sur la fig.12, où l'on peut remarquer que le VSWR final dépend non seulement de l'amplitude chaque VSWR (longueur des vecteurs VSWR1 et VSWR 2), mais aussi de son déphasage (angle α). Comme le wattmètre n'est pas capable de distinguer la grandeur de chaque onde réfléchie et encore moins de son déphasage, une erreur de lecture du VSWR final est inévitable. La valeur du VSWR 2 peut se situer sur n'importe quel point du cercle qui l'entoure, donc le

VSWR final peut avoir une infinité de valeurs comprises entre un VSWR min et un VSWR max que l'on peut calculer aisément grâce aux 2 simples formules de la fig. 11.

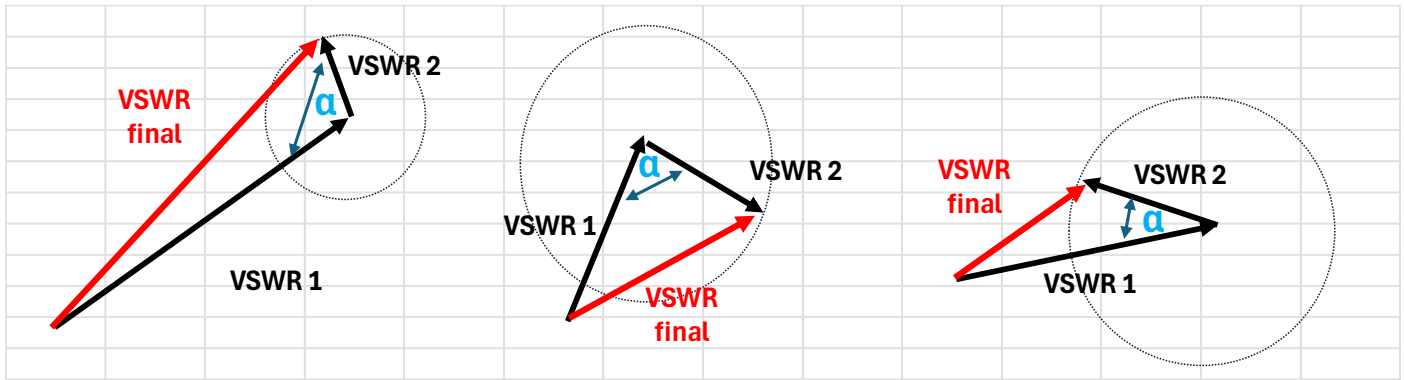


Fig.12 : représentation vectorielle des VSWR. Source : KJ4EGU

Exemple 2 : 2 x VSWR en série — situation extrême

Voyons maintenant un cas très particulier (fig. 13) qui peut paraître surprenant, mais qui permettra encore mieux d'illustrer la situation. Prenons le cas d'une antenne ayant un VSWR de 1,20. Un balun avec un VSWR de 1,20 est connecté entre le câble coaxial et l'antenne. On a donc à faire à un système comprenant 2 x VSWR de 1,20 en série.

Pour les plus sceptiques et minutieux au lieu d'utiliser un simple VSWR mètre (low-cost) nous utiliserons cette fois un VNA très performant pour réaliser la mesure du VSWR de l'antenne. Le VNA avec le câble coaxial qui alimente l'antenne est dûment calibré avec les procédures classiques (SOL — Short Open Load). Avec la calibration, on élimine donc le VSWR et pertes du câble coaxial et connecteurs (fig13), l'antenne se situe à sa hauteur définitive sur le pylône. On se trouve donc dans une situation idéale pour réaliser une mesure de « précision » dans les règles de l'art.

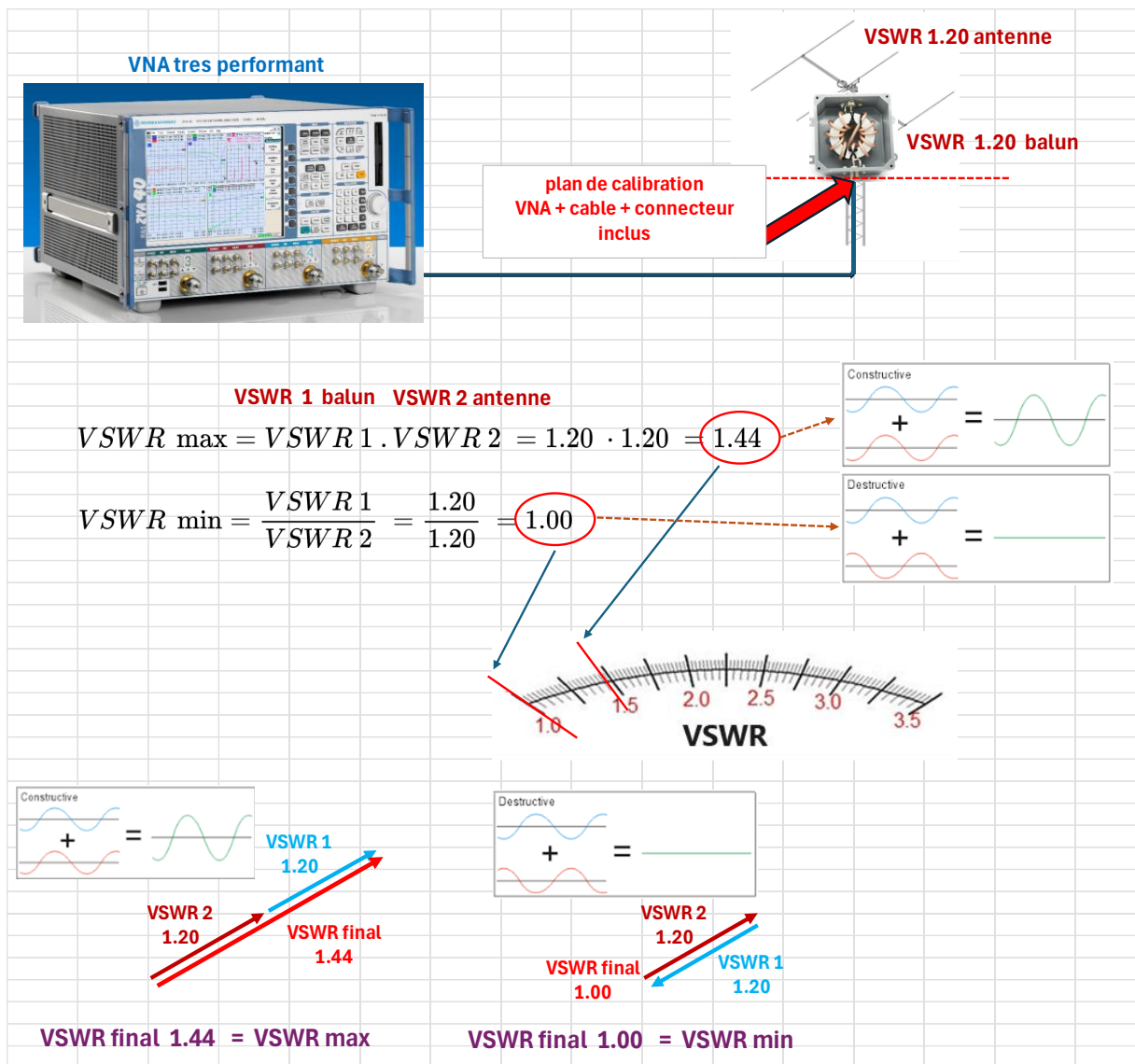


Fig.12 : Cas extrême d'erreurs de lecture du VSWR. Source : KJ4EGU

Dans ce cas bien précis le VSWR lu (mesuré) sur le VNA sera compris entre la valeur de 1,00 à 1.44. Donc une antenne de VSWR 1.2 avec un simple balun de VSWR 1.2 connecté en amont, pourrait dans ce cas extrême indiquer une valeur de très proche (à cause des pertes du balun) de VSWR 1.00 c'est-à-dire une adaptation d'impédance parfaite ! **Comme quoi un VNA de 70 000 euros serait capable de lire un VSWR proche de 1,0 d'une antenne qui en réalité a un VSWR de 1,2.** Le simple ajout d'un balun de VSWR 1.2 pourrait « changer radicalement » la précision de la mesure et de surcroît le balun servirait d'adaptateur d'impédance ! Il est donc assez facile de porter des jugements parfois erronés même avec des instruments ultras précis.

Je me permets de répéter que ce cas présent est une situation extrême, car il faudrait l'onde réfléchie du balun soit en opposition de phase avec l'onde réfléchie de l'antenne, c'est-à-dire à une distance bien précise et qu'il n'y ait pas de pertes dans le câble entre le balun et l'antenne. **Néanmoins cette situation pourrait exister** dans certains cas bien particuliers.

Exemple 3 : 2 x VSWR en série — approximation statistique

Étant donné que la valeur résultante des 2 VSWR sera comprise entre 1,00 et 1,44. L'incertitude est grande. Il existe plusieurs approches scientifiques afin d'obtenir un résultat plus approximatif avec moins d'incertitude.

Root Sum Square (RSS — racine de la somme des carrés). Cette métrique est souvent utilisée pour évaluer la précision d'un modèle, car un RSS inférieur indique que le modèle est capable de mieux prédire le résultat. Cette méthode statistique largement utilisée dans le monde professionnel RF que nous allons utiliser ici pour calculer l'incertitude dans la mesure de divers VSWR aléatoires. La formule RSS sera utilisée pour combiner différents VSWR afin d'obtenir une valeur d'incertitude globale plus réaliste.

$$RL (final) = 20 \cdot \log 10 \left[\left(\left(\frac{VSWR 1 - 1}{VSWR 1 + 1} \right)^2 + \left(\frac{VSWR 2 - 1}{VSWR 2 + 1} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Voyons plus en détail le résultat. Pour cela il faut d'abord convertir les 2 VSWR en RL (Return Loss — pertes de retour — S11) et avec quelques calculs nous arrivons à un VSWR résultant de 1 294. (Fig.13).

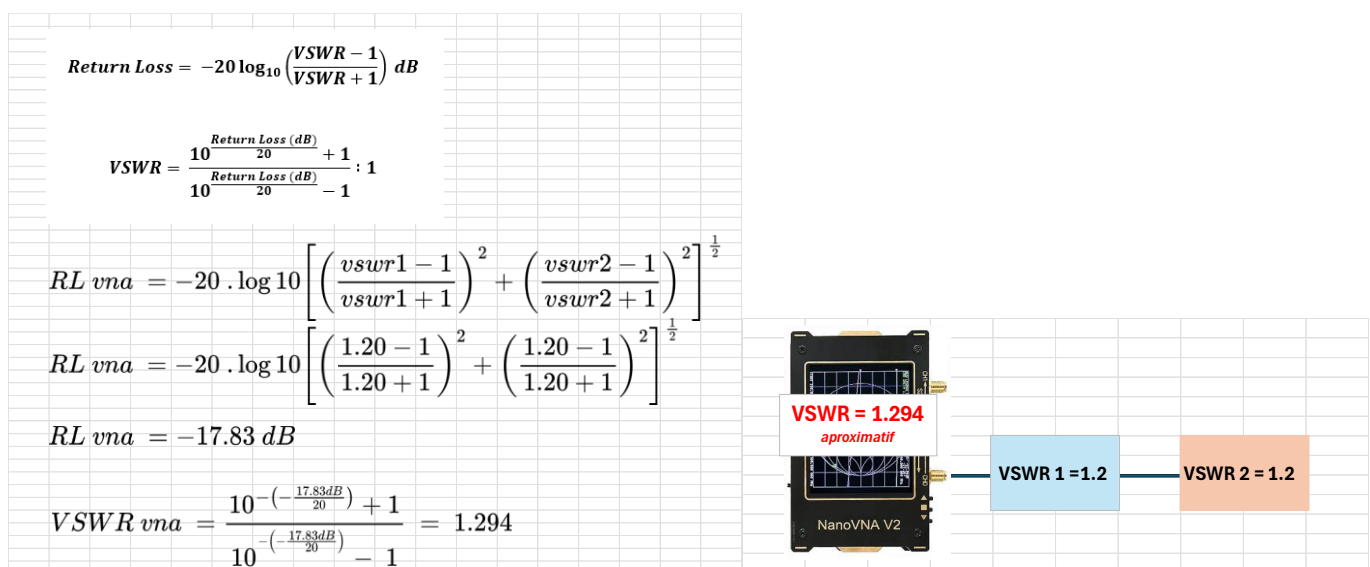


Fig.13 : Calcul approximatif de 2 VSWR de mêmes valeurs en série. Source : KJ4EGU

On voit donc que la valeur finale (VSWR = 1 294) est plus importante que chaque VSWR individuel (VSWR=1.2). Il s'agit cependant d'une valeur plus réaliste, plus approximative.

Multiple VSWR en cascade

Exemple 4 : 7 x VSWR en série — approximation statistique

Regardons maintenant la fig. 14. Nous y voyons une situation typique proche de la réalité de la plupart des stations radio amateurs. Nous sommes en face d'une longue série de 7 x VSWR différents en cascade. La situation se complique. Le défi ici est de connaître la valeur finale résultante sur le VSWR-mètre du transciever ou d'un wattmètre juste couplé à la sortie du transciever afin d'évaluer, à distance, le VSWR de l'antenne.

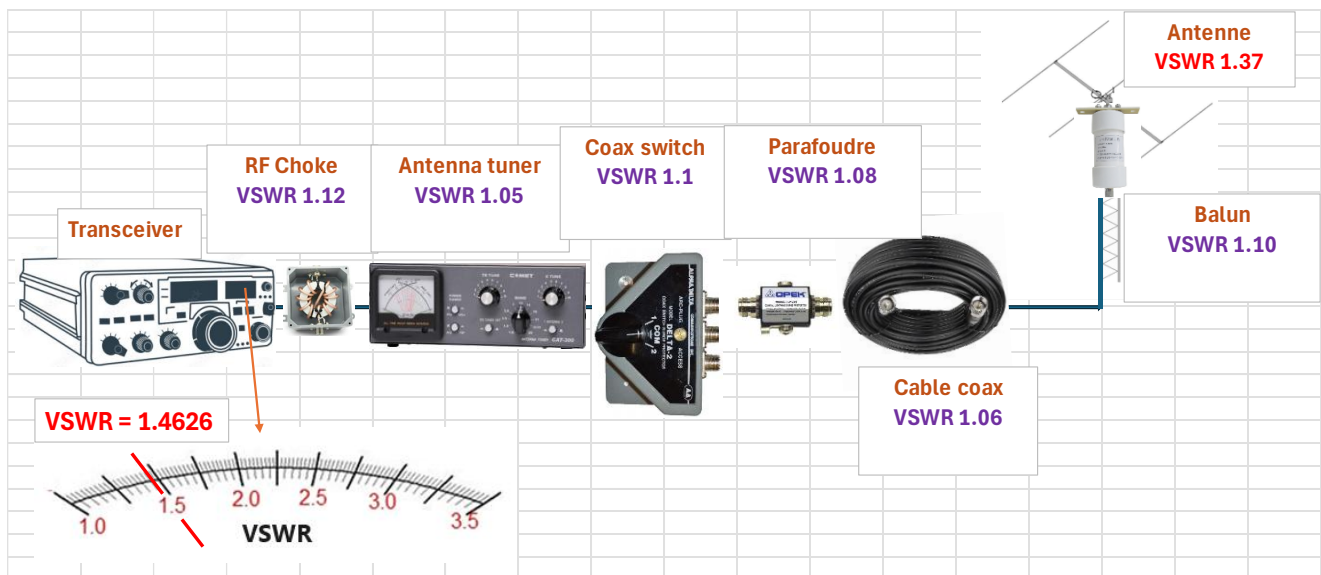


Fig.14 : Installation typique radio amateur avec 7 VSWR en série de valeurs différentes. Source : KJ4EGU

Nous allons maintenant calculer la valeur finale (approximative), avec la même approche utilisée précédemment avec la méthode statistique RSS.

Il est plus simple de calculer d'abord le RL final pour ensuite convertir le RL en VSWR avec les équations que nous connaissons déjà.

$$VSWR = 20 \cdot \log_{10} \left[\left(\frac{vswr1 - 1}{vswr1 + 1} \right)^2 + \left(\frac{vswr2 - 1}{vswr2 + 1} \right)^2 + \dots + \left(\frac{vswr7 - 1}{vswr7 + 1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$RL (final) = 20 \cdot \log_{10} \left[\left(\frac{1.12 - 1}{1.12 + 1} \right)^2 + \left(\frac{1.05 - 1}{1.05 + 1} \right)^2 + \dots + \left(\frac{1.37 - 1}{1.37 + 1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$RL (final) = -14.524 \text{ dB}$$

Transformons le RL en VSWR

$$VSWR (final) = \frac{10^{-\left(-\frac{14.524 \text{ dB}}{20}\right)} + 1}{10^{-\left(-\frac{14.524 \text{ dB}}{20}\right)} - 1} = 1.4626$$

La valeur finale reste néanmoins toujours approximative.

Exemple 4 : 7 x VSWR en série — approximation plus réaliste

Pour mieux comprendre la complexité de la situation, examinons la fig. 15. On y voit que chaque élément génère ses propres ondes réfléchies qui retournent vers le transceiver. Ces ondes réfléchies sont à leurs tours atténuées par les divers éléments sur le chemin de retour. Chaque atténuation est différente, car la réflexion de l'antenne (élément 7) est atténuée par les éléments 1... 6 pour atteindre le transceiver, tandis que les ondes réfléchies de l'élément 4 sera atténuée para les éléments 1,2 3.

De plus chaque onde réfléchie a une amplitude différente qui dépend du VSWR de chaque élément. Plus le VSWR d'un élément sera important, plus grande sera son onde réfléchie.

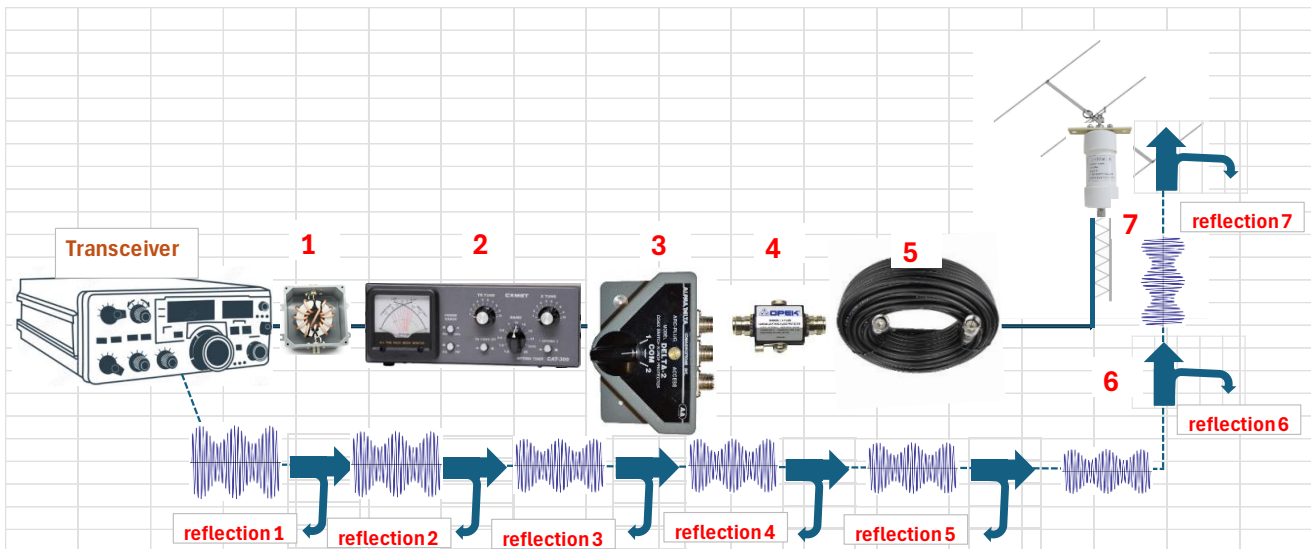


Fig.15 : chaque élément produit des ondes réfléchies qui retournent vers le transceiver. Source : KJ4EGU

Regardons maintenant ce qui se passe au niveau du wattmètre du transceiver (fig.16). Les 7 ondes réfléchies arrivent avec des amplitudes différentes, atténuations différentes, mais aussi avec des délais (phase) différents.

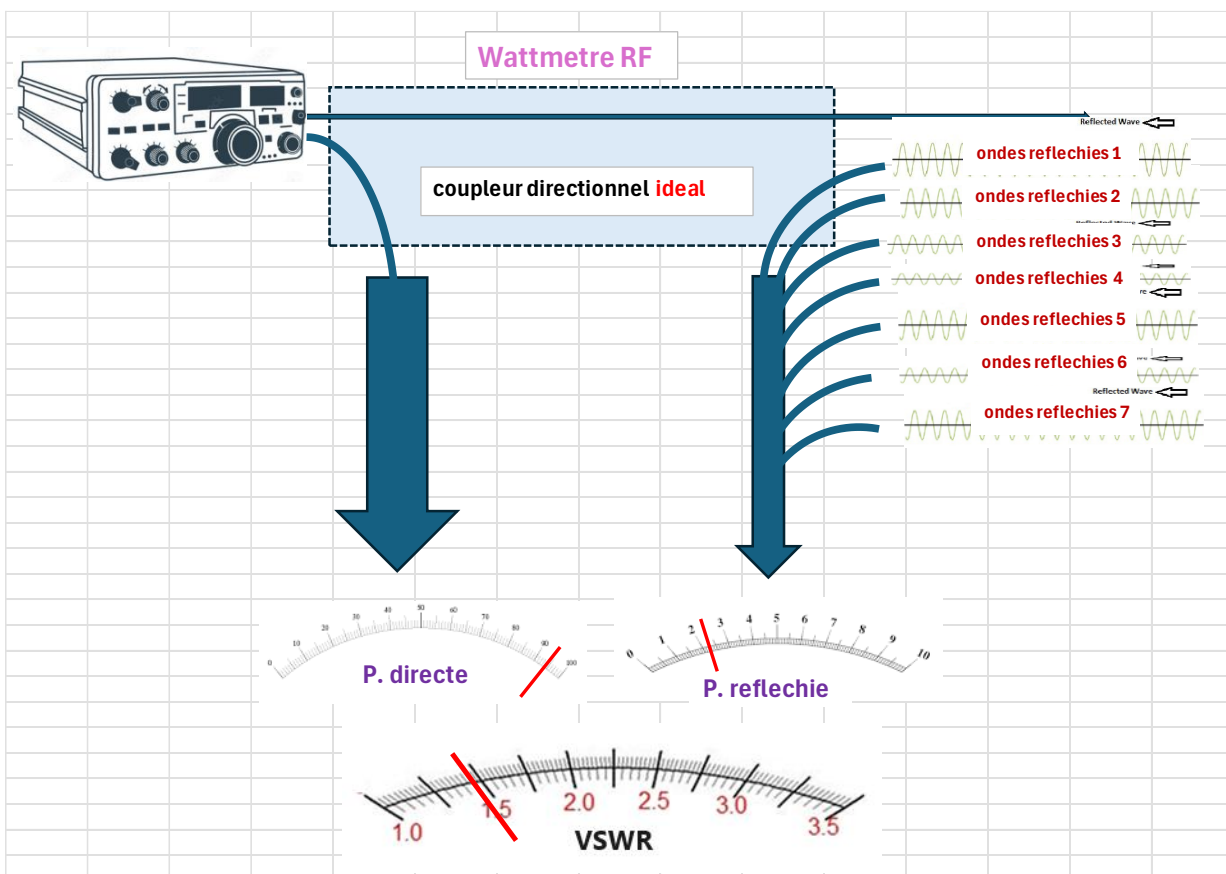
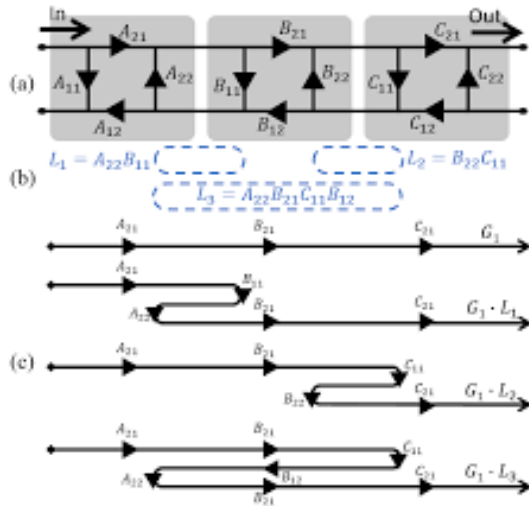


Fig.16 : Chaque élément produit des ondes réfléchies qui retournent vers le transceiver. Source : KJ4EGU

La lecture de la puissance réfléchie est la somme VECTORIELLE des 7 ondes réfléchies qui ont une amplitude et phase différente. **À ce stade, on est face à une complexité très importante.** La lecture du VSWR de l'antenne, à partir du VSWR mètre du transceiver ou même d'un wattmètre de précision (branché à la sortie du transceiver) n'arrivera pas (jamais ?) à donner une lecture précise du VSWR de l'antenne.

Il existe des approches théoriques dont la finalité est de prédire le VSWR final. À vrai dire, il y a assez peu de documentation dans la littérature technique classique et même de logiciels spécialisés.

Je recommanderai à ceux qui veulent en savoir plus, le livre de Somlo et Hunter, ‘Microwave Impedance Measurement’ qui préconise l’usage de matrices de transmission (T parameters) pour chaque élément en série et dont le résultat final est la multiplication matricielle. Un logiciel comme MATLAB est idéal pour effectuer aisément toutes ces opérations d’autant plus que Matlab dispose d’une toute une série de fonctions pour transformer et manipuler aisément les paramètres S, T, Z, Y, ABCD, etc.



La finalité de cet article n’est donc pas de réécrire des théories qui existent déjà, mais plutôt d’avoir une approche pratique et réaliste.

Nous avons vu qu’une première approximation du VSWR final pouvait être calculée à l’aide la formule

$$VSWR = 20 \cdot \log 10 \left[\left(\frac{vswr1 - 1}{vswr1 + 1} \right)^2 + \left(\frac{vswr2 - 1}{vswr2 + 1} \right)^2 + \dots + \left(\frac{vswr7 - 1}{vswr7 + 1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{équation 1}$$

$$VSWR (final) = \frac{10^{-\left(-\frac{RL \text{ dB}}{20}\right)} + 1}{10^{-\left(-\frac{RL \text{ dB}}{20}\right)} - 1}$$

Malgré que cette formule (éq. 1) est largement utilisée par de nombreux professionnels, elle prend en compte **seulement** le VSWR de chaque élément, **mais elle néglige les pertes**.

Ors, nous savons que les pertes de chaque élément atténuent le signal vers l’antenne, mais aussi les ondes réfléchies. Examinons maintenant la fig.17.

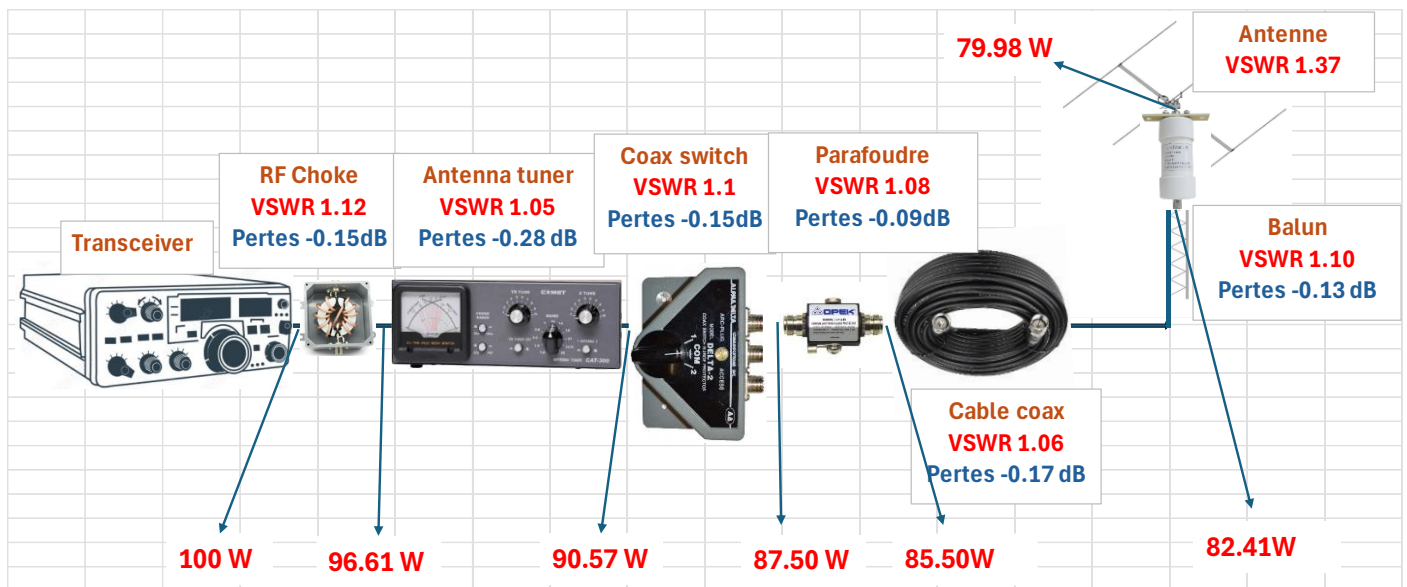


Fig.17 : VSWR et pertes de chaque élément avec la dégradation de puissance qui atteint l'antenne.
Source : KJ4EGU

Une correction de la formule s'impose. Avec 7 éléments en série et 7 pertes d'insertion, **les équations deviennent trop compliquées et trop longues**. Pour ma part j'utilise Matlab et Excel pour réaliser tous ces calculs, qui sont trop complexes pour être présentés ici dans cet article. Ci-joint un tableau (fig.18) récapitulatif avec la valeur des différents VSWR entre l'antenne et le transceiver (Fig.19).

		VSWR	Pertes	RL final	
	element	individuel	(dB)	(dB)	VSWR final
antenne	7	1.37	-0.00001	-16.1309	1.37
balun	6	1.10	-0.13	-15.7792	1.39
coax	5	1.06	-0.17	-15.2051	1.42
parafoudre	4	1.08	-0.09	-14.7696	1.45
switch	3	1.10	-0.15	-14.4135	1.47
tuner	2	1.06	-0.28	-13.8153	1.51
choke	1	1.12	-0.15	-13.5342	1.53

source : KJ4EGU Carlo F.

Fig.18 : Dégradation du VSWR entre l'antenne et le transceiver. Ces valeurs tiennent compte du VSWR et des pertes de chaque élément. La marge d'erreur diminue encore, mais la valeur finale restera néanmoins imprécise. Source : KJ4EGU

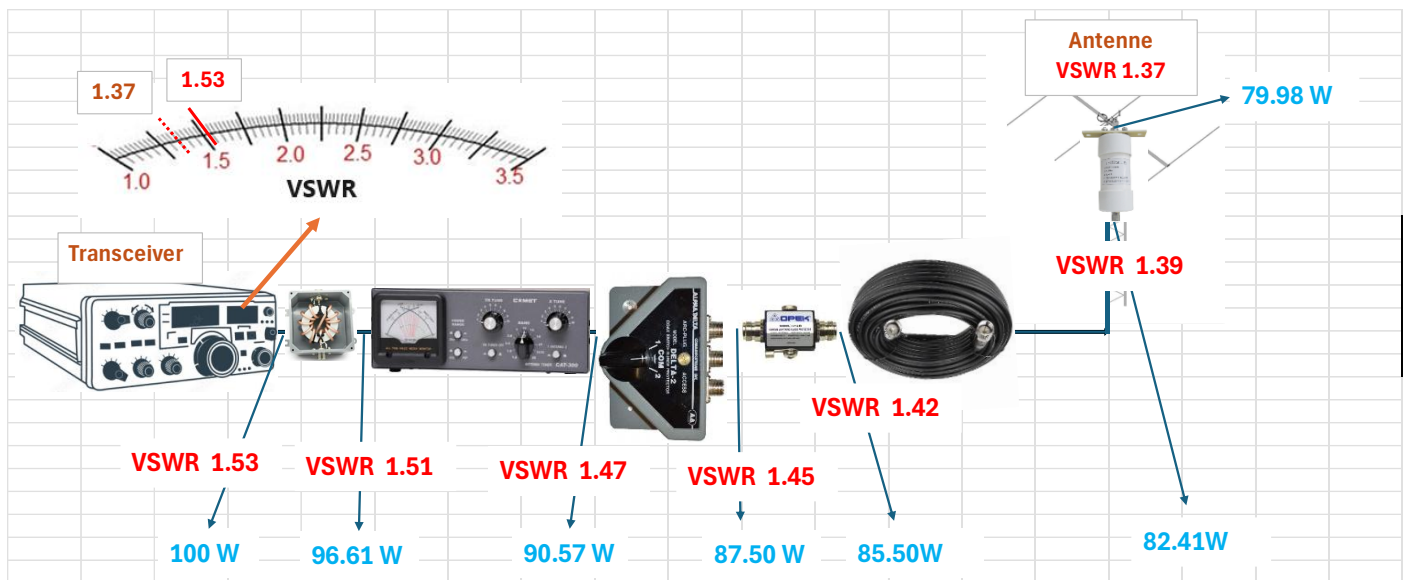


Fig.19 : À partir d'un VSWR d'antenne de 1,37, la lecture finale (la plus réaliste) serait de VSWR 1.53. Nous pouvons également apprécier la chute de puissance au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'antenne. Source : KJ4EGU

Remarques sur les Wattmètres (VSWR mètre) RF

Il en existe beaucoup sur le marché, pour tous les goûts et tous les prix. Néanmoins j'aimerais attirer votre attention sur un modèle qui est considéré comme un standard, une référence de précision et de qualité. Le Bird model 43 (fig. 20), que les OM les plus fortunés ont la chance d'en posséder un dans leur radio shack.

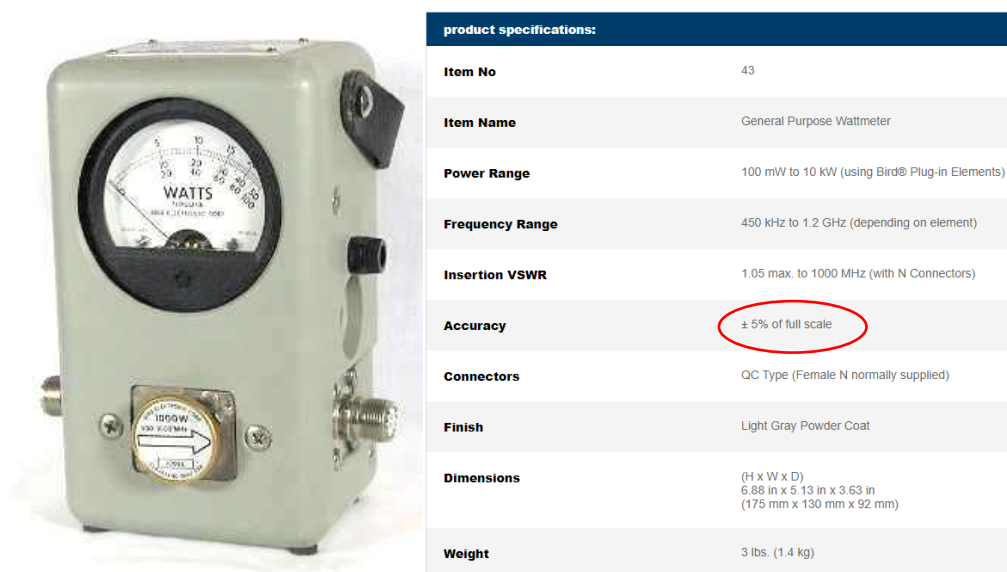


Fig.20 : Wattmètre Bird model 43 avec ses spécifications techniques. Source : BIRD

La précision d'un tel instrument est de $\pm 5\%$ à fond d'échelle (fig.20), ce qui n'est pas très performant en soi ! Lorsqu'on mesure la puissance réfléchie (en inversant le sens de la « pastille » ou « bouchon »), l'aiguille se déplace légèrement au début d'échelle (proche du zéro). À ce stade l'erreur de l'instrument est **supérieure à 5 %** à moins que l'on utilise une pastille de plus faible valeur pour que la puissance réfléchie soit le plus proche possible du fond d'échelle (maximum de précision). Même dans ce cas la précision ne sera jamais inférieure à 5 %.

À titre de comparaison un simple multi-tester à 25 euros est capable de lire une tension DC avec 0,5 % de précision.

Comme quoi la mesure précise du VSWR est difficile à évaluer, d'autant plus que les instruments que l'on utilise dans le monde Ham radio ne sont pas très précis non plus.

SOLUTIONS ?

Grâce à l'avènement sur le marché, ces dernières décennies, d'analyseur d'antenne performant (Cable Antenna analyzer - téléphonie cellulaire fig. 21a), mais surtout l'apparition des VNA (Analyseurs de réseaux vectoriels RF) très économiques (fig. 21 b) à 50 euros, toutes les incertitudes sur la mesure du VSWR 'devraient' disparaître.



(b)

Fig.21 : CAT et VNA low cost. Source : Anritsu et Ali express.

Nous avons vu tout au long de cet article qu'un simple câble coaxial, connecteurs RF, adaptateurs coaxiaux de tout genre et autres éléments entre l'appareil de mesure et l'antenne altèrent la précision de la mesure du VSWR. Bon nombre de problèmes préalablement analysés disparaissent ou tout au moins se réduisent fortement en « calibrant » le VNA. Je n'insisterai pas non plus sur la calibration d'un VNA car il existe d'excellents documents et vidéos qui expliquent de manière très claire le sujet.

En effet la calibration élimine (presque) totalement tous les éléments entre la sortie du VNA et le connecteur ou la calibration a été effectué, en déplaçant le plan de calibration. En d'autres mots tout se passe comme si tout ce qui se trouve entre la sortie du VNA et le connecteur final n'existe plus, donc (presque) plus de sources d'erreurs comme nous l'avons abordé depuis le début ce document.

L'idée reste toujours la même, c'est-à-dire mesurer à distance une antenne, sans erreur.

Appliquons maintenant cette méthode au cas qui nous intéresse en remplaçant le transciever par un VNA ou analyseur d'antenne, en effectuant la calibration au bout du câble coaxial juste avant la connexion à l'antenne (fig. 22). Tout se passe donc comme si le VNA serait connecté directement à l'antenne nous devrions obtenir une mesure très précise. En réalité, dans ce cas particulier la mesure est bien précise, **mais attention !**

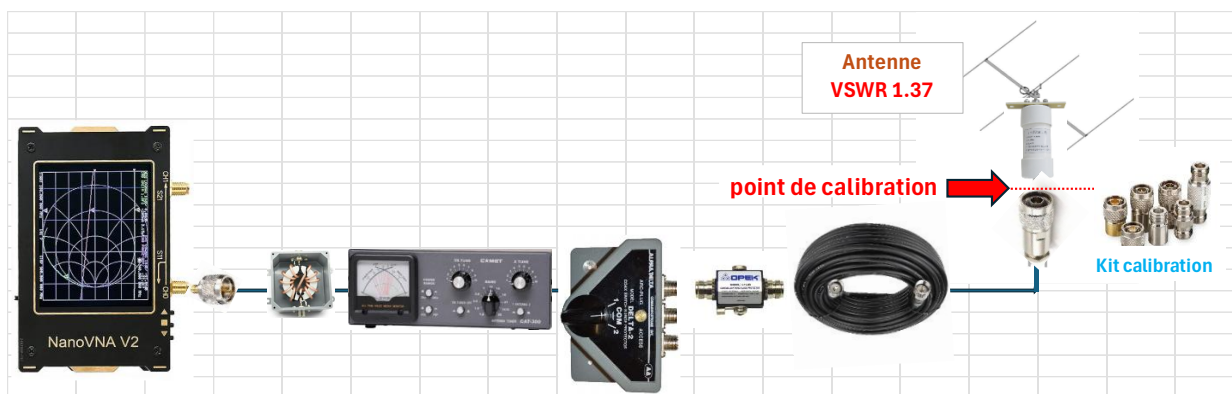


Fig.22 : Mesure précise d'une antenne ayant un VSWR de 1,37 à l'aide d'un VNA. Source : KJ4EGU

Imaginons maintenant la même situation, mais avec cette fois une antenne jouissant d'un excellent VSWR de 1,05 (RL de 32 dB) donc une antenne avec très peu d'ondes réfléchies (fig.20).

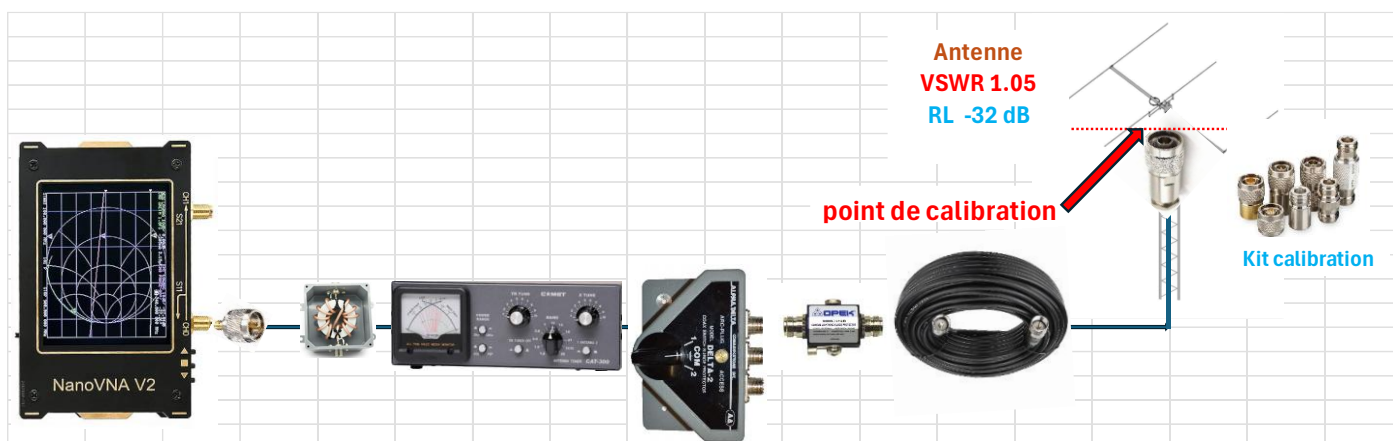


Fig.20 : Mesure d'une antenne ayant un VSWR de 1,05 à l'aide d'un VNA. Source : KJ4EGU

Dans les conditions de la fig.20 (**VSWR 1.05**) j'ai le regret de vous annoncer que la mesure du VSWR n'est plus précise ! L'intention n'est certainement de vous embêter ou de vous confondre, le problème n'est plus lié aux câbles, connecteurs et autres accessoires qui ont été éliminés grâce à la calibration, maintenant nos soucis proviennent de la **directivité du VNA** ou analyseur d'antenne. Il est capital de bien comprendre l'origine et les causes, car malheureusement **maintenant il n'y a plus de solutions.** Regardons en détail la fig. 21. L'élément essentiel de tout VNA ou d'un wattmètre de puissance RF est constitué d'un coupleur directionnel ou un pont de réflexion résistif qui permet « d'aiguiller » la puissance directe et réfléchiée sur chaque port de sortie qui lui correspond.

Prenons comme exemple un coupleur directionnel (le raisonnement est similaire pour les ponts résistifs).

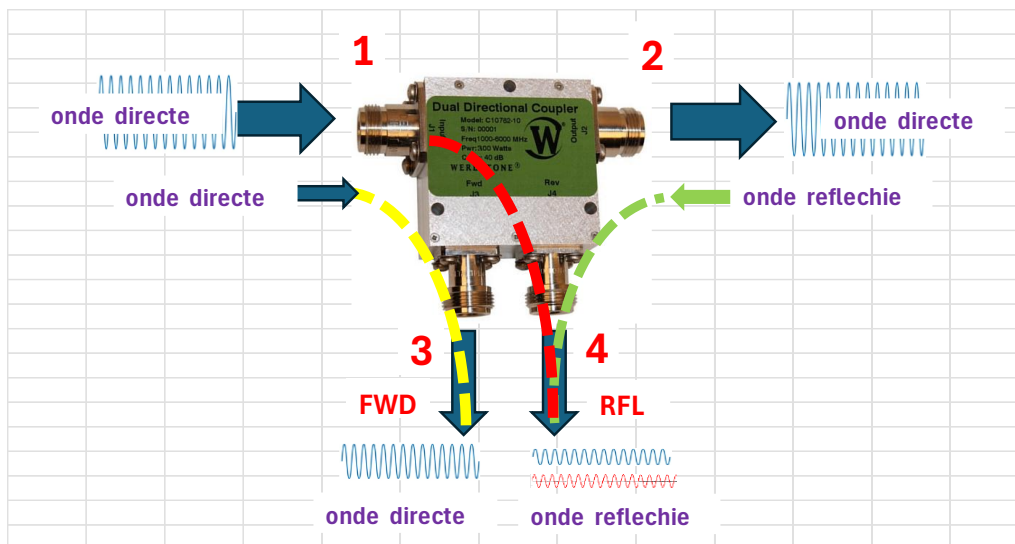


Fig.21 : Coupleur directionnel. Source : KJ4EGU

En voici une brève description de son fonctionnement :

Le signal entre par la porte 1 et sort par la porte 2 avec très peu de pertes.

Une faible partie du signal de la porte 1 est prélevé (couplé) et se dirige (aiguillage) uniquement vers la porte 3. La porte 3 porte le nom de FWD (Forward) ou est acheminée l'onde incidente (onde directe).

L'onde réfléchie de l'antenne revient vers le coupleur via la porte 2 et se dirige (aiguillage) uniquement vers la porte 4. La porte 4 porte le nom de RFL (Reflected) ou est acheminée l'onde réfléchie (onde réfléchie).

Malheureusement l'aiguillage des signaux n'est pas parfait. Une partie du signal de la porte 1 s'achemine également (courant parasite, courant de fuite) vers la porte 4, **c'est là le nœud du problème.**

Donc le signal qui apparaît sur la porte 4 (RFL) n'est pas seulement le signal de l'onde réfléchie, mais une partie également du signal direct qui se dirige vers l'antenne. **Ce courant parasite (1 vers 4) se superpose au signal de l'onde réfléchie et « pollue » la lecture.** En clair le signal qui apparaît à la porte est la **somme vectorielle** de l'onde réfléchie et ce courant perturbateur (1 vers 4 — en trait rouge sur la fig. 21).

Ce qui fausse en partie la lecture et par conséquent la précision de la mesure. L'erreur peut être positive ou négative. Cela dépendra une nouvelle fois de la phase des 2 signaux.

La directivité d'un coupleur directionnel est donc sa capacité à aiguiller correctement chaque signal sur chaque port qui lui correspond. D'un point de vue technique, c'est la différence (en dB) de niveau du signal entre les ports 3 et 4.

Nous voyons donc que la directivité d'un VNA est la caractéristique essentielle de l'instrument qui va déterminer la précision (l'incertitude) de la mesure du VSWR (S11, RL). Tous les VNA et analyseurs d'antenne ont le même problème. Plus la directivité est grande, plus la mesure du S11 (VSWR, RL, abaque de Smith, impédance, etc.) sera précise.

En général la directivité initiale des coupleurs directionnels d'un VNA pro n'est pas très bonne (entre 10 et 20 dB), mais grâce à la calibration une correction interne des erreurs se réalise via software et améliore de manière drastique la directivité des VNA.

Aujourd'hui les « nanoVNA » atteignent (après calibration) des valeurs de 35 à 40 dB, les VNA professionnels atteignent 45-46 dB et les VNA à plus de 100 000,00 euros atteignant les 50 dB sur une large plage de fréquence. En général la directivité diminue quand la fréquence augmente. Donc au fur et à mesure que l'on « monte » en fréquence la précision diminue (fig. 21).

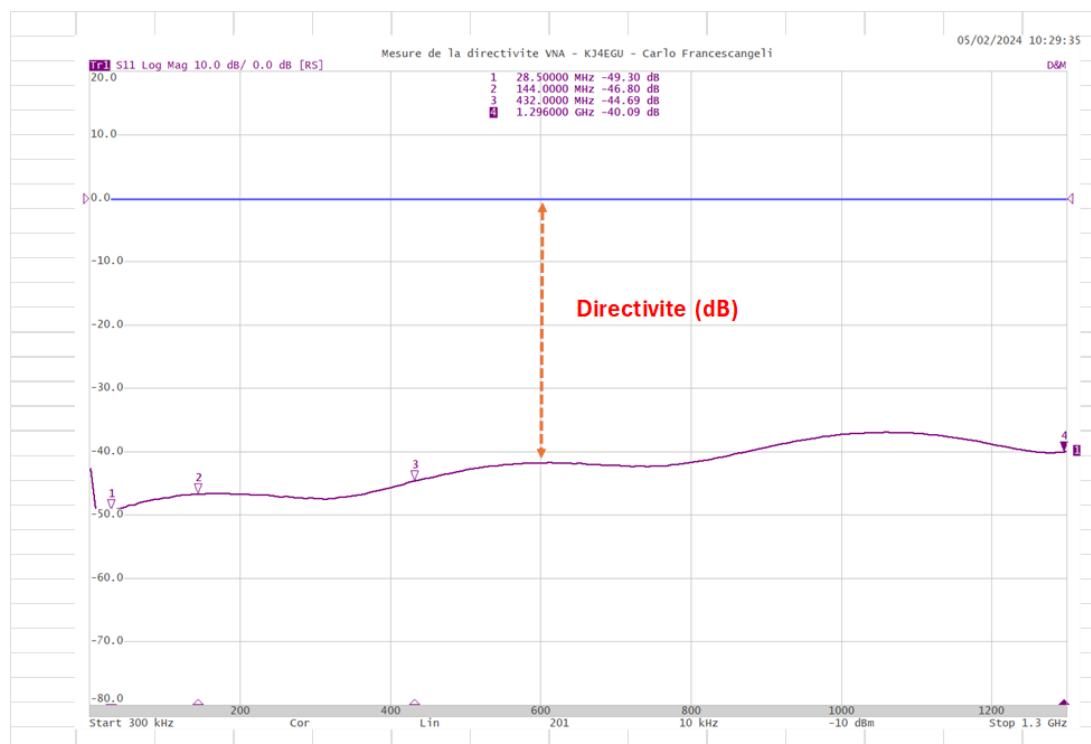


Fig.22 : Lecture directe de la directivité d'un VNA sur écran, on s'aperçoit que la directivité des VNA diminue avec la fréquence. Source : KJ4EGU

La directivité est directement liée à la calibration, mais la qualité de la calibration dépend de la qualité des étalons (OSL – Open Short Load) que l'on utilise. Donc la précision de tout VNA est directement liée au prix d'achat des étalons ! Cela ne veut pas dire qu'un jeu d'étalons SMA d'origine asiatique que l'on trouve sur internet pour 5 euros est inutile. Au contraire, ils peuvent rendre de très bons et loyaux services pour autant que l'on connaisse leurs limites et le niveau de précision que l'on souhaite. En général au niveau Ham radio c'est largement suffisant pour autant que l'on ne monte pas très haut dans les GHz !

Il est donc important de connaître la directivité du VNA que l'on utilise et pas tellement se confier aux spécifications du constructeur. À titre d'information, les VNA professionnels et haut de gamme en général sont renvoyés périodiquement chez le fabricant pour un calibrage et étalonnage. À notre niveau Radioamateur, il faudra donc se débrouiller avec les moyens de bord.

On peut facilement mesurer la directivité d'un VNA (analyseur antenne, return Loss Bridge, etc.), procédure que je conseille dûment de réaliser par chaque lecteur qui en possède un. La procédure est simple. La seule condition est de disposer d'une charge de 50 ohms extrêmement précise. À titre personnel, j'utilise et je vous recommande le modèle KARN50+ (Connecteur N mâle) ou le modèle ANNE50X (SMA mâle) du fabricant Mini Circuits pour un prix de 20 euros approximativement.

Mesure d'une antenne (VSWR 1.37) à l'aide d'un VNA

Jetons un coup d'œil sur la fig. 23. L'antenne que l'on souhaite mesurer n'a pas un très bon VSWR (1,37) donc des ondes réfléchies relativement importantes retourneront vers le VNA et seront aiguillées, grâce au coupleur directionnel, vers le port RFL (onde réfléchie). Le port de l'onde réfléchie

reçoit également un signal parasite qui va perturber ou polluer « légèrement » la correcte lecture du VSWR (S11). Dans ce cas l'erreur de lecture du VSWR serait de l'ordre de $\pm 1\%$. Ce qui est remarquable.

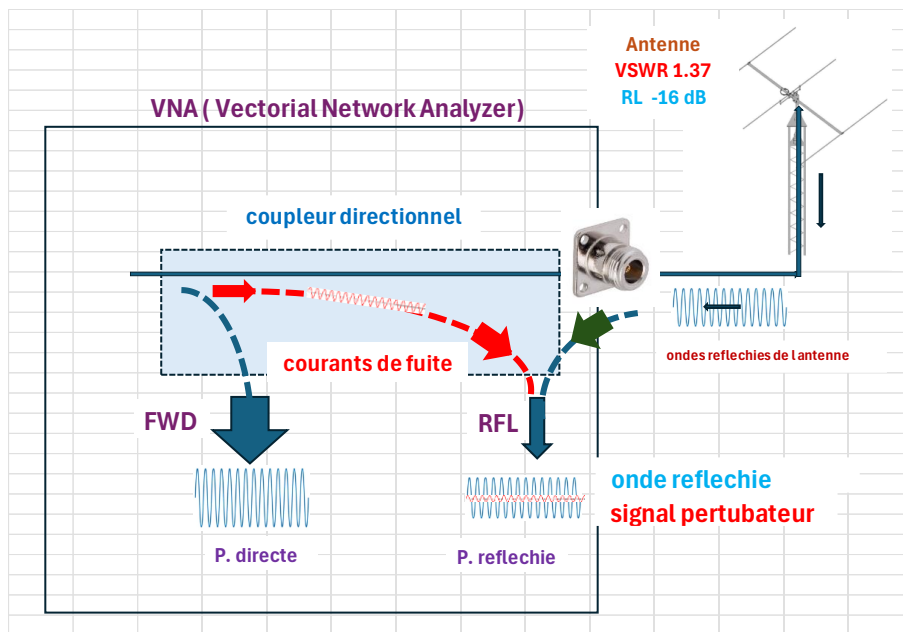


Fig.23 : Influence de la directivité du VNA pour un VSWR antenne de 1,37. Faible impact du signal perturbateur sur l'onde réfléchie. La précision est bonne. Attention les grandeurs sont représentées de forme illustrative et ne sont pas à échelle, source : KJ4EGU

Mesure d'une antenne (VSWR 1.05) à l'aide d'un VNA

Regardons maintenant la fig. 24. Cette fois, le VSWR de l'antenne est excellent. Très peu d'ondes réfléchies retournent vers l'instrument de mesure. L'amplitude du signal perturbateur est importante et viendra « polluer » considérablement l'amplitude de l'onde réfléchie en provenance de l'antenne. Nous sommes dans le cas d'une marge d'erreur entre ± 5 à 10% pour un VNA dûment calibré de 40 dB de directivité.

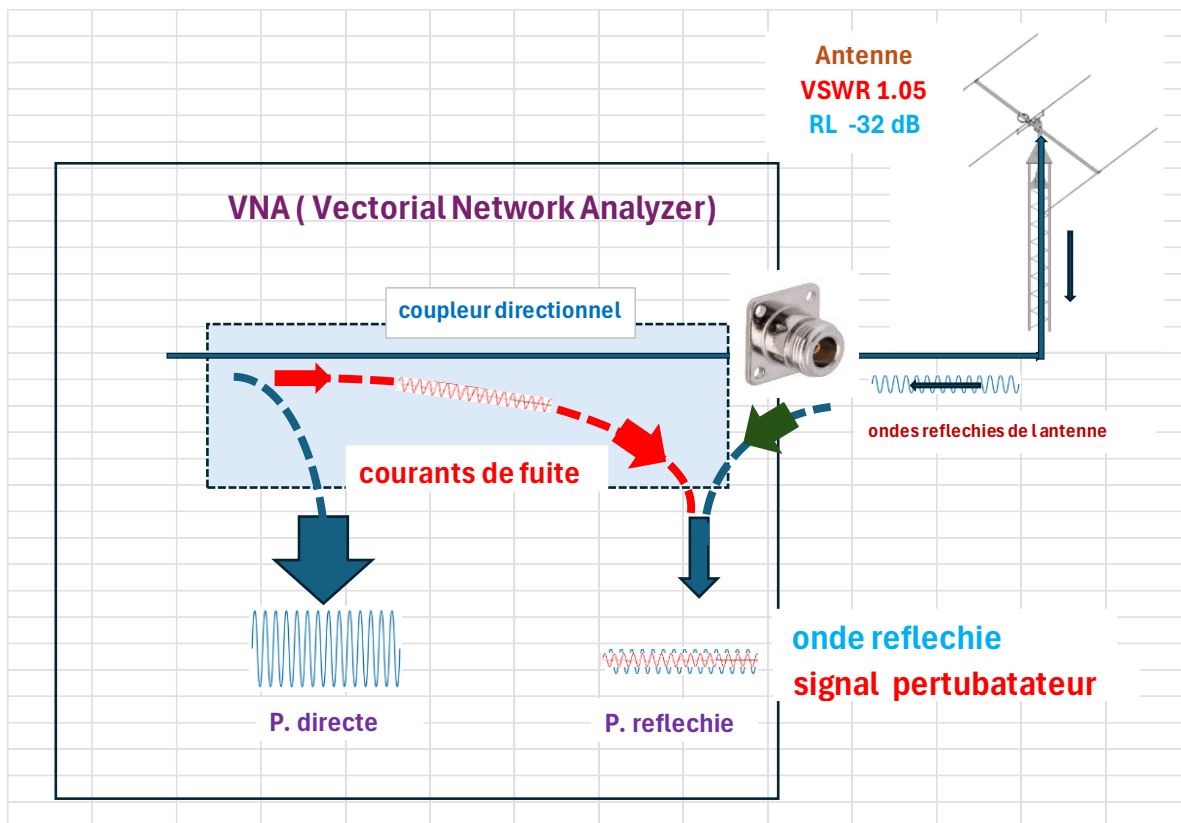


Fig.24 : Influence de la directivité du VNA pour un VSWR antenne de 1,05
Impact **important** du signal perturbateur (**courants de fuite**) sur l'onde réfléchi.
Attention les grandeurs sont représentées de forme illustrative et ne sont pas à échelle. Source : KJ4EGU.

Comme quoi, il faut être extrêmement prudent et méfiant lorsqu'on voit dans la littérature radio amateur des mesures de VSWR de 1,04 avec un nanoVNA ou même VSWR 1.0 dans le cas de l'analyseur MFJ 259 ! Les marges d'erreur deviennent importantes.

Dans ce cas du MFJ 259 (fig25), il est préférable de penser que l'impédance de l'antenne est proche des 50 ohms donc avec un faible VSWR, mais pas aussi faible que d'avoir une valeur de VSWR 1.0. L'instrument est très utile pour accorder facilement une antenne, c'est pourquoi il est si populaire, le problème ici **provient également de l'affichage trop optimiste** sur l'écran LCD.

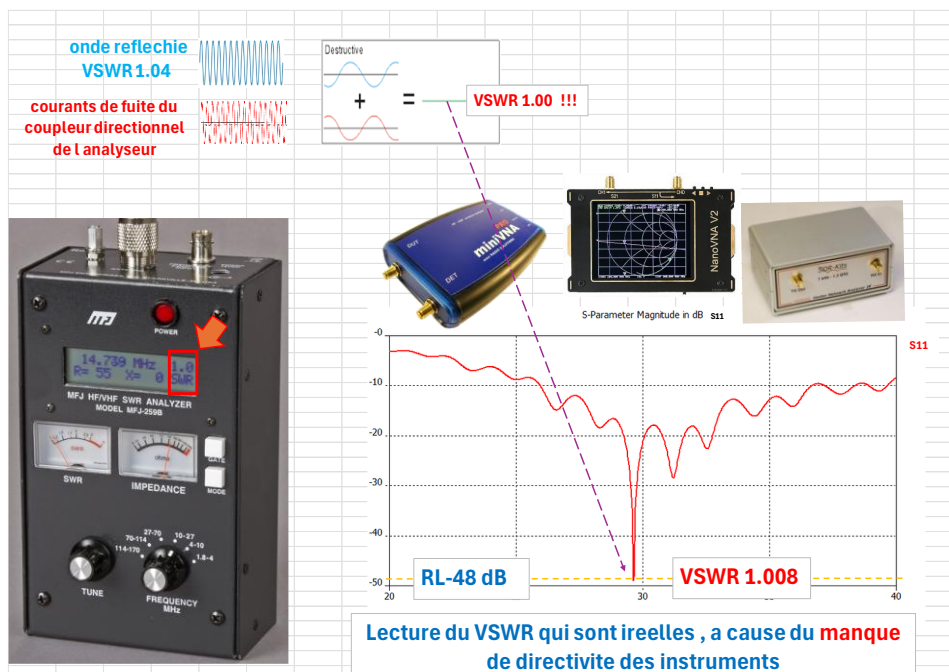


Fig.25 : Analyseurs d'antenne et VNA low cost qui indique un VSWR de 1,0 (pas d'ondes réfléchies). Cela est dû au manque de directivité de l'appareil, qui n'est pas capable de distinguer correctement de très faible valeur du signal réfléchi. Des valeurs surréalistes (RL -48 dB — VSWR 1 008) apparaissent sur l'écran. Source : KJ4EGU.

Pour des VSWR faibles, on peut arriver de l'amplitude de l'onde réfléchie soit égale et même inférieure au signal perturbateur. (Fig. 26) **Dans ce cas, la lecture est complètement faussée** et n'est plus réaliste. Il a est souligné que ces appareils de mesure, largement utilisés dans le monde radio amateur, sont très utile et performant pour autant que ne l'on ne prétende pas vouloir réaliser des mesures avec de faibles valeurs de VSWR et aussi ne surtout pas confondre l'affichage du VSWR avec sa précision.

3. Précision de la mesure du VSWR à l'aide d'un VNA

Cela dit, on peut essayer de connaître la limite de précision des mesures du VSWR avec des VNA (ou analyseurs d'antennes). Il existe une relation directe entre la directivité (capacité d'aiguiller correctement les signaux d'ondes directes et réfléchies sur leur port respectif **uniquement**) de l'instrument et la précision de la mesure. On peut aborder le thème de façon mathématique simple. Regardons d'abord la fig.26. **On s'aperçoit que la mesure affichée par le VNA ne correspond pas à la mesure réelle de l'antenne** et que le résultat final peut prendre n'importe quelle valeur entre un min et un max situé sur le cercle. La valeur affichée est donc la somme **vectorielle** de la valeur réelle de l'antenne et l'erreur causée par la directivité du VNA.

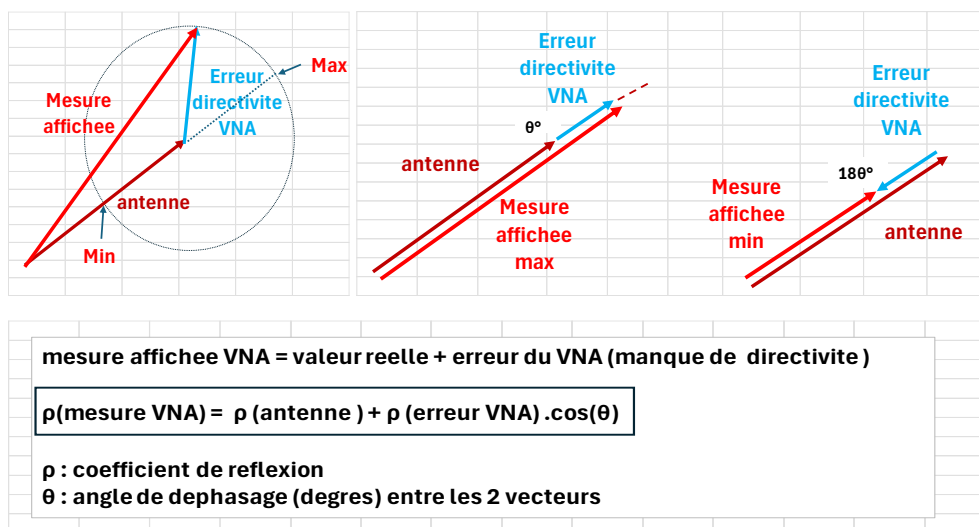


Fig.26 : Le manque de directivité du VNA génère une erreur qui produira inévitablement une lecture différente de la valeur réelle. Source : KJ4EGU

Afin de se familiariser face à cette nouvelle situation, prenons quelques exemples pratiques :

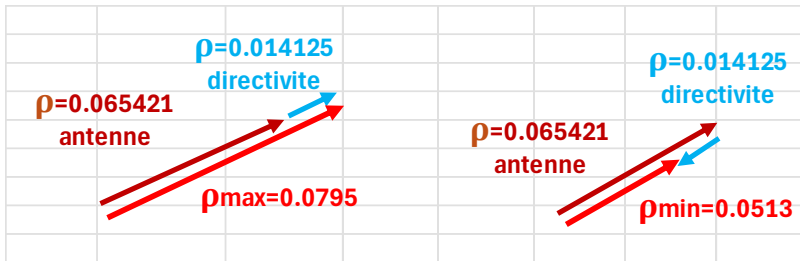
Un VNA de 37 dB de directivité donne une lecture VSWR antenne de 1,14. Quelle est la marge d'erreur de la mesure du VSWR ?

P = coefficient de réflexion

$$\rho(\text{erreur vna}) = \left(10^{\left(\frac{-37\text{dB}}{20} \right)} \right) = 0.014125$$

$$\rho(\text{ant}) = \frac{1,14-1}{1,14+1} = 0,065\,421 \quad \text{RL ant} = 20 * \log_{10}(0,065\,421) = -23,68 \text{ dB}$$

$\rho_{\text{mesure max}} = \rho(\text{ant}) + \rho(\text{erreur vna}) \cdot \cos(0^\circ) = 0,065\,421 + 0,014\,125 = \mathbf{0,079\,5}$ 2 signaux sont en phase.



$\rho_{\text{mesure min}} = \rho(\text{ant}) + \rho(\text{erreur vna}) \cdot \cos(180^\circ) = 0,065\,421 - 0,014\,125 = \mathbf{0.0513}$ les 2 signaux sont déphasés de 180°

$$\text{VSWR mesure min} = \frac{1 + \mathbf{0,0513}}{1 - \mathbf{0,0513}} = 1,10$$

$$\text{VSWR mesure max} = \frac{1 + \mathbf{0,0795}}{1 - \mathbf{0,0793}} = 1,17$$

Pour un VSWR antenne de 1,14, l'erreur de la mesure avec le VNA se situe entre 1,10 et 1,17

Une antenne a un RL de $-33,72\text{ dB}$, la directivité de mon instrument est 42 dB , le déphasage entre les 2 signaux est de 79° . Quelle est la valeur de la mesure finale ?

ρ = coefficient de réflexion

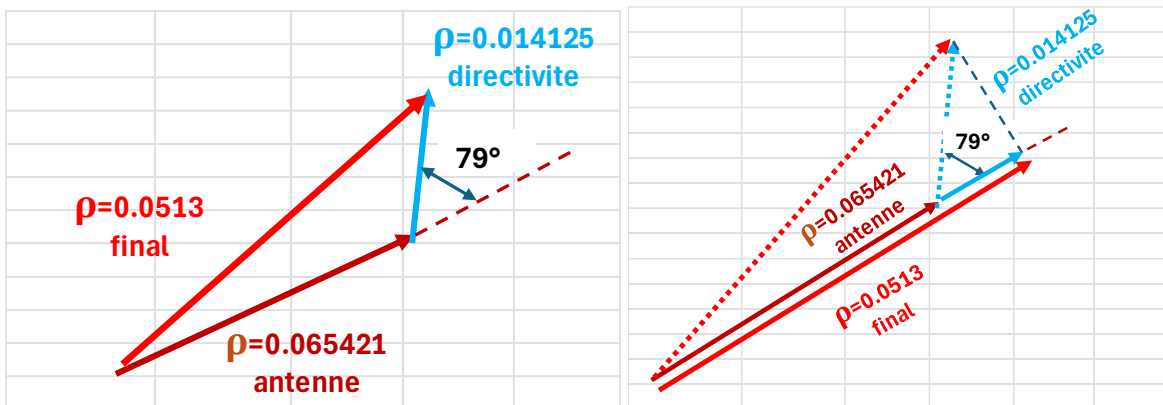
$$\rho(\text{erreur vna}) = 10^{\left(-\frac{\mathbf{42\text{ dB}}}{20}\right)} = 0.0079$$

$$\rho(\text{ant}) = 10^{\left(-\frac{\mathbf{33.72\text{ dB}}}{20}\right)} = 0.02026$$

$$\rho(\text{mesuré}) = 0,007\,9 + [0,020\,26 \cdot \cos(\mathbf{79^\circ})] = 0,011\,8$$

$$\text{RL (mesuré)} = 20 \cdot \log_{10}(0,011\,8) = \mathbf{-38,58\text{ dB}} \quad (38,58\text{ dB} - 33,72\text{ dB}) = \mathbf{\text{aprox. } 5\text{ dB d'erreur !}}$$

$$\text{VSWR (mesuré par le VNA)} = \frac{1 + 0,011\,8}{1 - 0,011\,8} = 1\,024$$



Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de calculer le VSWRmin et VSWRmin, car nous connaissons le déphasage

Sur mon émetteur de 1KW, mon wattmètre indique une puissance directe antenne de 920 W et une puissance réfléchie de 50 W . La directivité du wattmètre est de 32 dB . Quelle est la marge d'erreur de ma puissance réfléchie ?

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{50 \text{ W}}{920 \text{ W}}}}{1 - \sqrt{\frac{50 \text{ W}}{920 \text{ W}}}} = 1.61$$

ρ = coefficient de réflexion

$$\rho(\text{directivité wattmetre}) = 10^{\left(\frac{-32 \text{ dB}}{20}\right)} = 0.0251$$

$$\rho(\text{ant}) = \sqrt{\frac{50 \text{ W}}{920 \text{ W}}} = 0.2331 \quad RL(\text{ant}) = 20 \cdot \text{Log}_{10}(0.2331) = -12.64 \text{ dB}$$

$$\rho_{\min} = \rho(\text{ant}) + \rho(\text{directivité wattmetre}) \cdot \cos(180^\circ) = 0.2331 - 0.0251 = 0.2080$$

$$VSWR_{\min} = \frac{1 + 0.2080}{1 - 0.2080} = 1.52$$

$$RL_{\min} = 20 \cdot \text{Log}_{10}(0.2080) = -13.63 \text{ dB}$$

$$\text{Prefl. min} = (0.2080)^2 \cdot 920 \text{ W} = 39.20 \text{ W}$$

$$\rho_{\max} = \rho(\text{ant}) + \rho(\text{Directivité wattmetre}) \cdot \cos(0^\circ) = 0.2331 + 0.0251 = 0.2582$$

$$VSWR_{\max} = \frac{1 + 0.2582}{1 - 0.2582} = 1.69$$

$$RL_{\max} = 20 \cdot \text{Log}_{10}(0.2582) = -11.76 \text{ dB}$$

$$\text{Prefl. max} = (0.2582)^2 \cdot 920 \text{ W} = 61.33 \text{ W}$$

Le VSWR de mon antenne sera compris entre 1,52 et 1,69.

La valeur réelle de ma puissance réfléchie sera comprise quelque part entre 39.2W et 61,33 W, pour une lecture de 50 W.

Exemples pratiques à l'aide du diagramme (Anritsu)

Un diagramme très pratique, publié par Anritsu, permet d'estimer très rapidement d'évaluer l'erreur de mesure des coupleurs directionnels ou pont résistif (fig. 27).

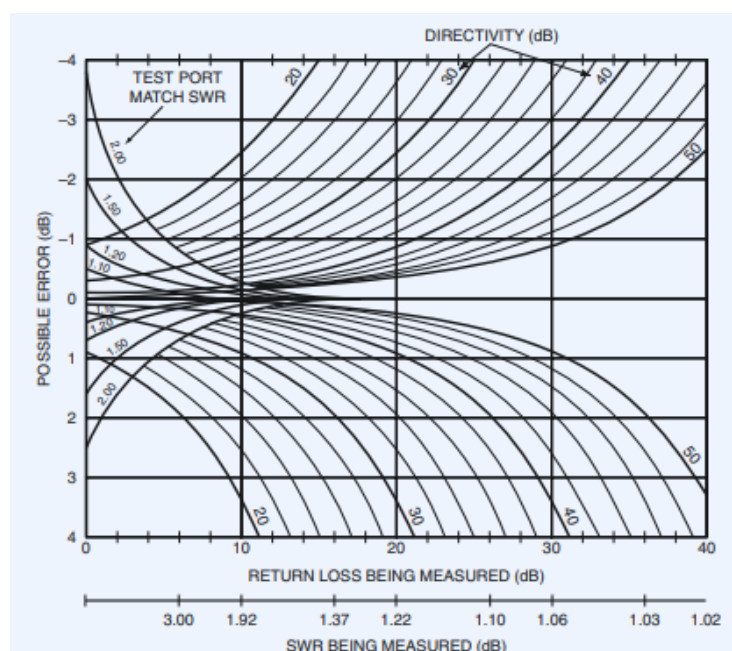


Fig.27 : Diagramme permettant d'estimer la marge d'erreur d'une mesure du RL ou VSWR en fonction de la directivité de l'instrument de mesure. Source : Anritsu

Exemple 10 : VSWR 1.1 avec un VNA de 40 dB de directivité

Imaginons une lecture d'une antenne dotée d'un VSWR de 1,1 (RL -26 dB). La mesure s'effectue avec un VNA dûment calibré jusqu'au connecteur de l'antenne ayant une directivité de 40 dB.

À l'aide du diagramme de la fig. 27, la marge d'erreur de la lecture est estimée sur la fig.28.

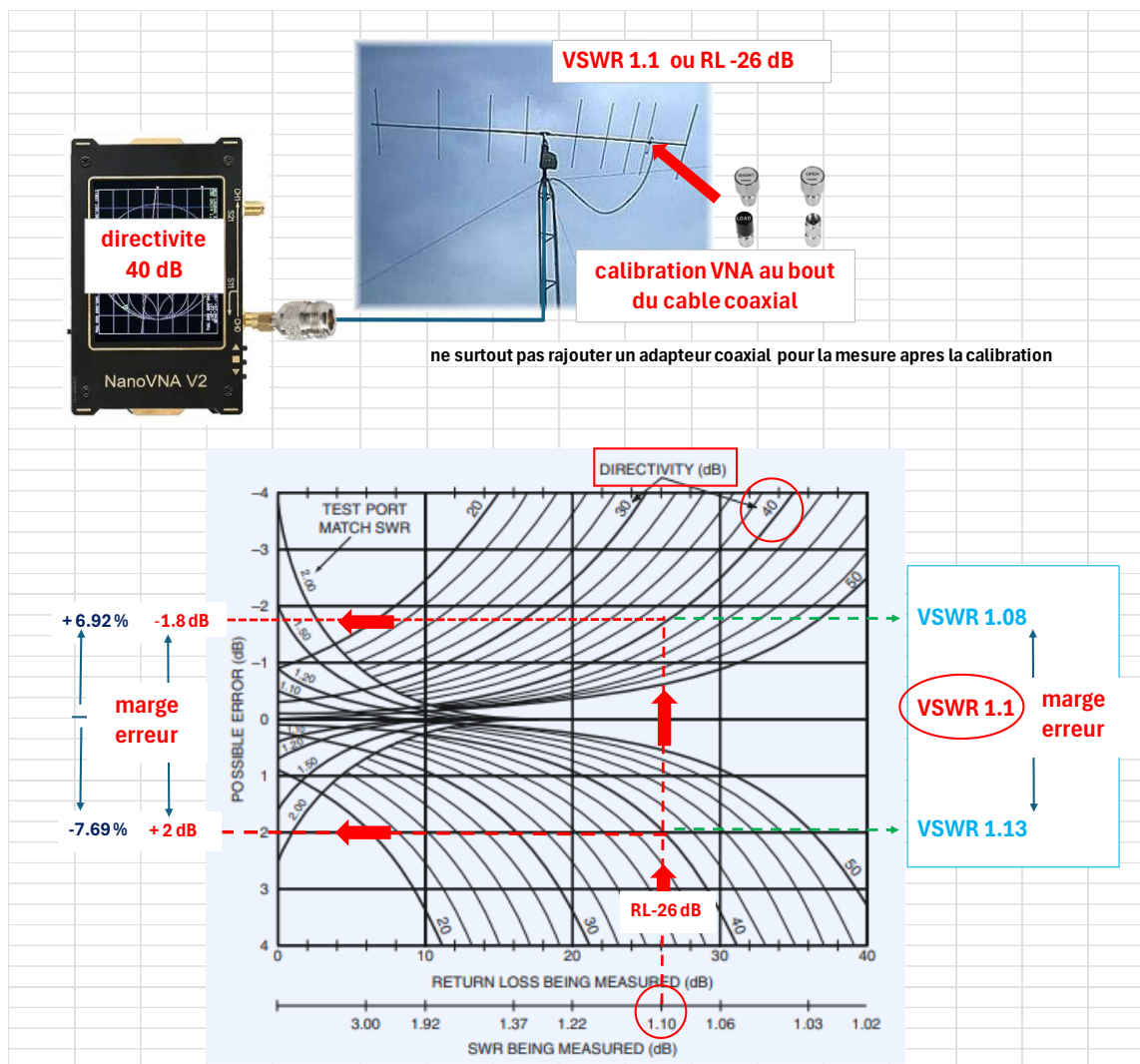


Fig.28 : Diagramme permettant d'apprécier oh combien il est difficile de réaliser une mesure précise du VSWR (RL) d'une antenne, même en prenant toutes les précautions afin de réduire au maximum les sources d'erreur (VSWR en cascade). Source : KJ4EGU.

À ce stade, certains d'entre vous peuvent être tentés d'acquérir un VNA beaucoup plus onéreux pour faire des mesures comme des « pro ».

Rappelons tout d'abord encore une fois que la qualité de la calibration (pour atteindre une directivité maximale, aux alentours de 46 dB) dépend de la qualité des standards (bouchons) de calibration utilisée.

Exemple 11 : VSWR 1.1 avec directivité VNA de 46 dB

Remplaçons le nanoVNA par un VNA professionnel de 6000 euros + 1500 euros pour le kit de calibration. Regardons les résultats sur la fig. 29.

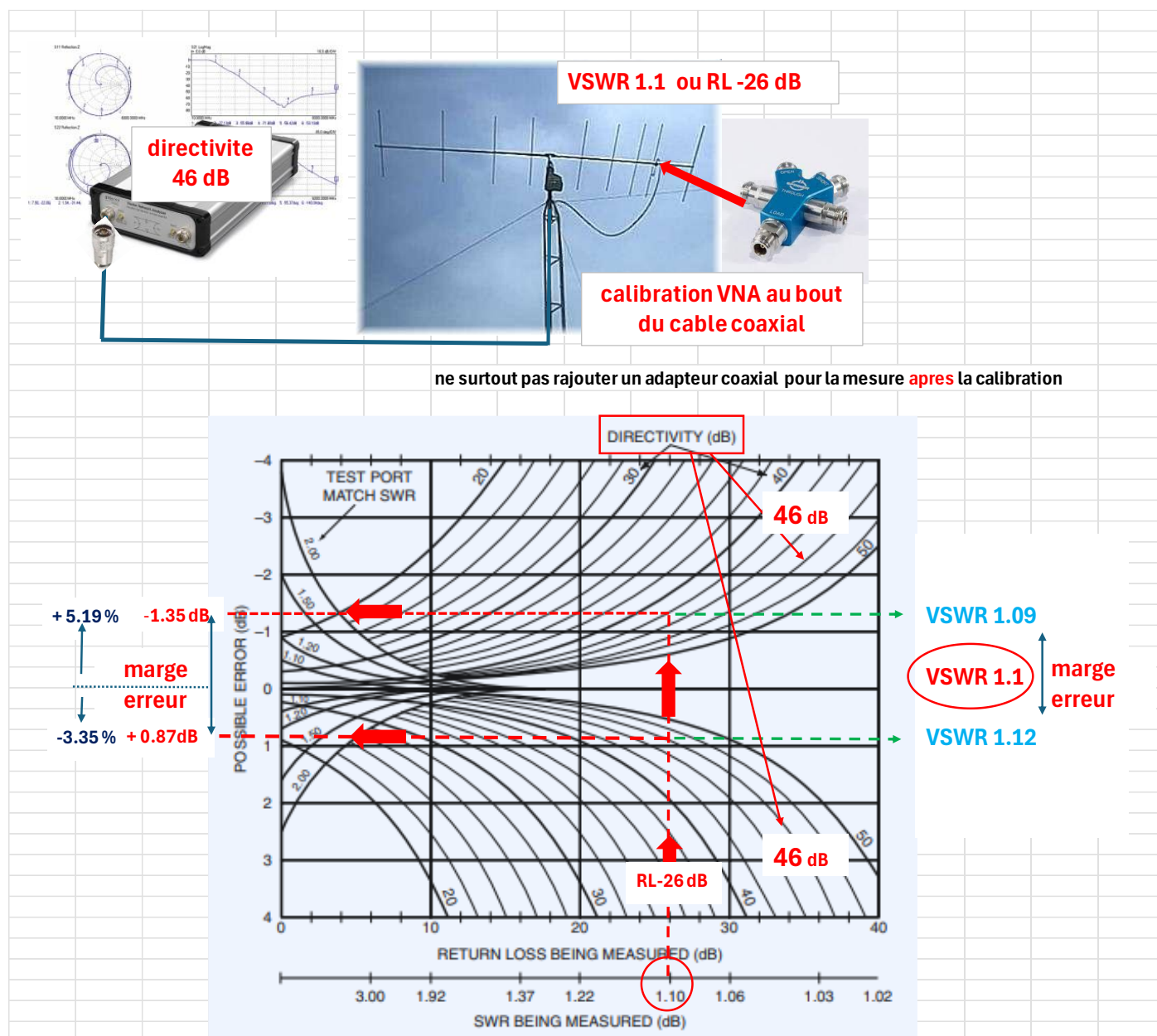


Fig.29 : Mesure d'un VSWR estimée de 1,10 (RL — 26 dB) à l'aide d'un VNA professionnel correctement calibré à haute performance ayant une directivité de 46 dB. On s'aperçoit que la marge d'erreur diminue par rapport à l'exemple précédent, **malgré cela l'erreur reste néanmoins considérable**. Source : KJ4EGU.

Précision et résolution.

Avec l'apparition sur le marché de VNA et/ou analyseur d'antenne à display numérique, la valeur du VSWR est parfois affichée avec une **résolution** de 2, 3 voire 4 digits après la virgule. Nous venons juste de voir que lorsque le VSWR atteint une faible valeur de 1,10, la marge d'erreur (**précision**) est de l'ordre +/- 7 % pour un VNA dûment calibré avec 40 dB de directivité.

Donc des valeurs d'affichage de VSWR de 1,105 **7** ou un RL de -26,876 dB apparaissent simplement comme du simple tape-à-l'œil pour donner l'impression que l'instrument de mesure est très précis.

Des instruments « State of the art » pour la mesure du VSWR

Afin de compléter toute cette longue explication. J'aimerais vous présenter les caractéristiques techniques de quelques VNA les plus sophistiqués et récents sur le marché, de précieux jouets à plus de 70 000 euros. Avec des kits de calibrations atteignant les 10 000 euros.

Measurement accuracy of the R&S®ZNA26

The data below is valid between +18 °C and +28 °C, provided the temperature has not varied by more than 1 °C after calibration. Validity of the data is conditional on using an R&S®ZNA26 calibration kit in order to achieve the effective system data specified below. Frequency points, measurement bandwidth and sweep time have to be identical for measurement and calibration (no interpolation of the calibration). Specifications are based on a matched DUT for transmission measurements and on an isolated DUT for reflection measurements. In both cases, a measurement bandwidth of 10 Hz and a nominal source power of 0 dBm apply for the base unit without options.

Uncertainty of transmission measurements		Magnitude		Phase
10 MHz to 40 MHz	0 dB to -20 dB	0.04 dB	0.04 dB	0.5°
	-20 dB to -30 dB	0.23 dB	0.23 dB	1.0°
	-30 dB to -40 dB	0.60 dB	0.60 dB	3.0°
	-40 dB to -50 dB	1.50 dB	1.50 dB	5.0°
	-50 dB to -60 dB	4.50 dB	4.50 dB	25.0°
> 40 MHz to 200 MHz	0 dB to -30 dB	0.04 dB	0.04 dB	0.5°
	-30 dB to -40 dB	0.05 dB	0.05 dB	0.6°
	-40 dB to -50 dB	0.15 dB	0.15 dB	0.7°
	-50 dB to -60 dB	0.45 dB	0.45 dB	3.0°
	-60 dB to -70 dB	0.04 dB	0.04 dB	0.7°
> 200 MHz to 10 GHz	0 dB to -30 dB	0.05 dB	0.05 dB	0.8°
	-30 dB to -40 dB	0.05 dB	0.05 dB	0.8°
	-40 dB to -50 dB	0.09 dB	0.09 dB	1.0°
	-50 dB to -60 dB	0.05 dB	0.05 dB	1.3°
	-60 dB to -70 dB	0.06 dB	0.06 dB	1.4°
> 10 GHz to 26.5 GHz	0 dB to -30 dB	0.05 dB	0.05 dB	1.3°
	-30 dB to -40 dB	0.06 dB	0.06 dB	1.4°
	-40 dB to -50 dB	0.06 dB	0.06 dB	1.4°
	-50 dB to -60 dB	0.13 dB	0.13 dB	1.5°
	-60 dB to -70 dB	0.13 dB	0.13 dB	1.5°

Uncertainty of reflection measurements		Logarithmic Reflection level	Magnitude	Phase	Linear Reflection range	Magnitude
10 MHz to 10 GHz	0 dB	0.10 dB	0.6°	0 dB to -3 dB	0.011	
	-3 dB	0.10 dB	0.6°	-3 dB to -6 dB	0.008	
	-6 dB	0.11 dB	0.7°	-6 dB to -15 dB	0.006	
	-15 dB	0.25 dB	1.7°	-15 dB to -25 dB	0.005	
	-25 dB	0.74 dB	5.1°	-25 dB to -35 dB	0.005	
> 10 GHz to 20 GHz	-35 dB	2.16 dB	18.0°	-35 dB	0.005	
	0 dB	0.13 dB	0.9°	0 dB to -3 dB	0.015	
	-3 dB	0.13 dB	0.8°	-3 dB to -6 dB	0.010	
	-6 dB	0.14 dB	0.9°	-6 dB to -15 dB	0.008	
	-15 dB	0.31 dB	2.1°	-15 dB to -25 dB	0.007	
> 20 GHz to 26.5 GHz	-25 dB	0.93 dB	6.5°	-25 dB to -35 dB	0.006	
	-35 dB	2.64 dB	20.0°	-35 dB	0.006	
	0 dB	0.14 dB	0.9°	0 dB to -3 dB	0.016	
	-3 dB	0.14 dB	1.0°	-3 dB to -6 dB	0.012	
	-6 dB	0.17 dB	1.1°	-6 dB to -15 dB	0.010	
> 20 GHz to 26.5 GHz	-15 dB	0.39 dB	2.6°	-15 dB to -25 dB	0.008	
	-25 dB	1.15 dB	8.1°	-25 dB to -35 dB	0.008	
	-35 dB	3.21 dB	26.0°	-35 dB to -35 dB	0.008	
	-35 dB	3.21 dB	26.0°	-35 dB to -35 dB	0.008	
	-35 dB	3.21 dB	26.0°	-35 dB to -35 dB	0.008	

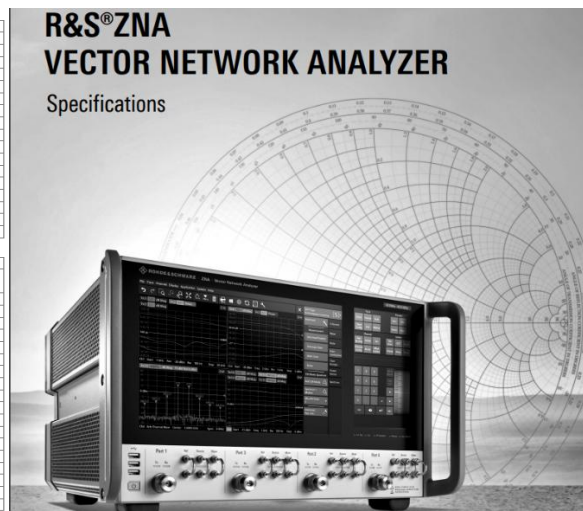


Fig.30. Spécifications techniques d'un VNA top class Rohde Schwarz. On s'aperçoit que le fabricant ne garantit aucune mesure plus basse que — 35 dB (VSWR 1.04). À ce niveau l'incertitude de la mesure atteint déjà 2,16 dB ! Source : R&S.

Table 4. 85052B Calibration Kit

Description	Specification (dB)						
	10 MHz to 50 MHz	50 MHz to 500 MHz	500 MHz to 2 GHz	2 GHz to 8.5 GHz	8.5 GHz to 13.5 GHz	13.5 GHz to 20 GHz	20 GHz to 26.5 GHz
Directivity	48	48	48	44	44	44	44
Source Match	40	40	40	31	31	31	31
Load Match	48	48	48	44	43	43	43
Reflection Tracking							
Mag	±0.0030	±0.0030	±0.0030	±0.0061	±0.0061	±0.0061	±0.0061
Phase (°)	±0.020	±0.020	±0.020	±0.040	±0.040	±0.040	±0.040
Transmission Tracking							
Mag	±0.035	±0.017	±0.017	±0.066	±0.092	±0.11	±0.12
Phase (°)	±0.23	±0.11	±0.11	±0.44	±0.61	±0.70	±0.80



Fig. 31. Directivité du VNA KEYSIGHT (HP) modèle PNA — X — directivité garantie (après calibration) 48 dB. Source : Keysight.

REFLECTION MEASUREMENT UNCERTAINTY

- For $\delta = -46$ dB, $T_1 = 0.1$ dB, $\mu_1 = -40$ dB, μ_2 is assumed to be a perfect match and $R=0$, the Reflection Uncertainty may be charted as shown here.
- Calibration with an Automatic Calibration Module (ACM) is required to attain $\delta = -46$ dB
- The measurement uncertainty goes to infinity at -46 dB

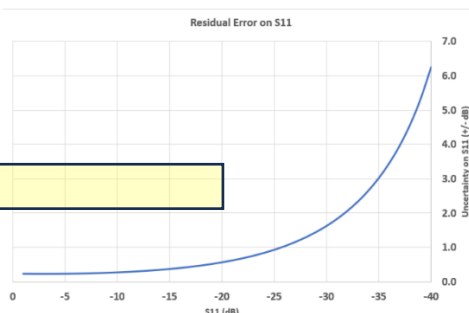


Fig. 32 : Incertitude (erreur) de mesure du S11 (RL) après calibration. On remarque les mêmes valeurs que nous avons calculées (fig.29). À -40 dB (VSWR 1.02) l'erreur est de -6,2 dB ce qui est énorme. Lorsqu'on atteint un VSWR de 1,01 (RL -46 dB) la marge d'erreur (l'incertitude **est infinie** !!!)
Source : Copper Mountain (USA).

Conclusions

Une mesure précise du VSWR (S11, Return Loss ou équivalent) n'est pas simple, elle est même souvent imprécise. Elle est « faussée » d'emblée par quel n'importe quel accessoire (câble coaxial, connecteurs, adaptateurs coaxiaux, filtres, balun, etc.) entre l'instrument de mesure et l'élément que l'on souhaite mesurer. Cela est dû à la succession en série de divers dispositifs ayant un VSWR et des pertes. Il faut tenir compte de ces éléments.

Avec l'apparition sur le marché de VNA ou analyseurs d'antenne, toutes les erreurs mentionnées au point 1, peuvent être éliminées, grâce à la calibration de l'instrument qui va 'annuler' toutes ces erreurs en déplaçant le plan de calibration au point de mesure et supprimer tous les éléments en aval. C'est donc une avancée majeure spécialement avec l'arrivée sur le marché des nanoVNA à 50 euros, qui sont de petites merveilles technologiques et sont à la portée de tout radioamateur et/ou expérimentateur RF.

Il existe une règle d'or concernant la précision de la mesure du RL ou VSWR. Pour atteindre une marge d'erreur de l'ordre de ± 1 dB, il faut nécessairement que le VNA ou l'analyseur d'antenne dispose d'une directivité de plus de 20 dB supérieurs au RL que l'on souhaite mesurer. L'exemple de la fig. 23 en est une preuve. Ce qui démontre que les performances se dégradent rapidement dès que l'on franchit le seuil inférieur VSWR de 1,10. L'incertitude de la mesure augmente. Pire encore si l'on dépasse les GHz. La totalité des instruments à bas prix, utilise un pont résistif (Reflection Resistive Bridge) interne à large bande comme détecteur du signal réfléchi. Il est difficile d'atteindre avec ces dispositifs une directivité réelle de 40 dB, même après calibration.

Avant d'acquérir un nouvel instrument VNA ou analyseur d'antenne, il est fortement recommandé de vérifier la valeur de la directivité dans les spécifications techniques, qui est une caractéristique déterminante. Si cette information n'apparaît pas, comme c'est souvent le cas, le fabricant vous cache une surprise. **Soyons vigilants et toujours critiques lorsqu'une faible valeur de VSWR apparaît sur un écran ou dans un document technique.**

Si le fabricant ne vous donne pas la valeur de la directivité de son instrument, pas de problème. La solution est simple, il vous reste à la mesurer vous-même. Pour cela, il suffit de disposer d'une charge étalon 50 ohms de très haute qualité (20 euros) qui rendra aussi beaucoup de bons et loyaux services pour d'autres applications également.

Une description détaillée et complète de la procédure apparaîtra dans un prochain article.

Les nanoVNA, VNWA, miniVNA et autres analyseurs antenne (Rig Expert, MFJ259, etc..) sont très utiles pour autant que l'on n'essaye pas d'atteindre des valeurs VSWR trop basses afin d'obtenir une précision de mesure acceptable et que l'on dispose d'un kit de calibration performant.

73's à tous.

KJ4EGU – Carlo Francescangeli (*Liégeois de naissance, de jeunesse et de merveilleux souvenirs*) — kj4egu@gmail.com

Quelques références utiles :

<https://www.anritsu.com/en-US/test-measurement/solutions/en-us/understanding-directivity>

<https://g3ynh.info/zdocs/bridges/reflectom/part1.html>

