

Métrologie des paramètres S : vers une meilleure traçabilité des analyseurs de réseaux vectoriels en France

P. Vincent¹, D. Allal¹, JM Lerat¹, A. Litwin¹ et F. Le Sidaner²

¹LNE – 29 avenue Roger Hennequin – 78197 Trappes – France

²IUT de CACHAN – 9 avenue de la division Leclerc – 94230 Cachan – France

Abstract. In metrology, the vector network analyzer replaced the compensated reflectometer as broadband system, measuring the adaptation into account the complex nature and sources of error are not minimized, but simply determined and corrected by appropriate calibration procedures. The calibration procedure is based on the subsequent measurement of known components. In order to check the validity of a calibration, the user should measure the so-called verification components (lines for reflection, and attenuators for transmission) calibrated in a national metrology laboratory (NML) and thus guarantees the traceability of its measures. This article describes a method of primary calibration parameters based on S dimensional contact-less measurements of different types of coaxial air line (50 ohms and 25 ohms). In this method, we determine the characteristic impedance of the air line and the S parameters regardless of the frequency range. The uncertainty of the various measurands is derived from the uncertainty of measurements by a method of numerical calculation. There is thus provided, in France, a solution for the traceability of vector network analyzers.

1. Traçabilité au SI des paramètres S

Généralement, la traçabilité des mesures de paramètres S effectuées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (ARV) est assurée via un ensemble de composants de référence (affaiblisseurs, lignes de transmission adaptées et non adaptées) dits étalons de vérification. Afin d'obtenir la traçabilité, le laboratoire utilisateur d'analyseur de réseau vectoriel envoie ses étalons de vérification à son laboratoire de référence pouvant être le Laboratoire national de métrologie ou tout laboratoire détenant une accréditation dans ce domaine. Le laboratoire de référence mesure les caractéristiques électriques en termes de réflexion et de transmission des étalons de vérification et délivre le certificat d'étalonnage correspondant. Afin d'obtenir la traçabilité de ses mesures, le laboratoire utilisateur, après avoir étalonné son analyseur de réseau vectoriel en mesurant un ensemble de composants d'étalonnage (calibration kit), doit mesurer ses étalons de vérification et comparer les résultats affichés avec ceux du certificat d'étalonnage, les écarts obtenus permettant de valider le calcul d'incertitude préalablement évalué.

Sur ligne coaxiale, deux grandes familles de méthodes d'étalonnage sont généralement employées. La première (SOLT) applique le modèle d'erreur à 10 termes, pouvant être étendu à 12 termes pour tenir compte des fuites dans le système de mesure, et nécessite l'utilisation de six

charges : trois charges à connecteur mâle et trois charges à connecteur femelle, sachant que trois charges au total sont suffisantes dans le cas de connecteurs hermaphrodites comme le connecteur PC7. La seconde (TRL) applique le modèle d'erreur à 8 termes et nécessite l'utilisation d'une ou plusieurs lignes de transmission étalons et un couple de charges à facteurs de réflexion élevés et égaux (R pour Reflect), qu'il n'est cependant pas nécessaire de connaître ; ce qui n'en fait pas des étalons.

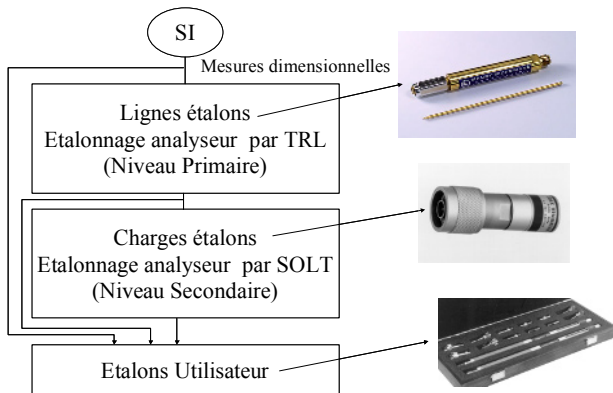
Dans ce qui suit, les charges étalons utilisées pour l'application de la méthode SOLT seront dénommées charges étalons et les lignes de transmission utilisées pour l'application de la méthode TRL seront dénommées lignes étalons.

Les lignes étalons sont directement traçables au Système international d'unités SI par des mesures dimensionnelles (mesure des diamètres a et b des deux conducteurs) et peuvent être considérées comme étalons primaires. [1][2] De manière classique, les charges étalons sont calculées à partir de modèles physiques et l'incertitude qui est associée aux mesures, peut être évaluée par la mesure d'étalons de « vérification » ou par des techniques permettant d'estimer les erreurs résiduelles de l'étalonnage et utilisant une ligne de transmission traçable au SI par des mesures dimensionnelles.

Cependant, les charges étalons peuvent également être étalonnées à l'aide d'un analyseur de réseau étalonné par une méthode TRL, elles sont ainsi traçables au SI via les

lignes étalons et sont alors considérés comme étalons secondaires. Plusieurs chemins de traçabilité sont alors possibles comme le montre la figure ci-dessous.

Figure 1 Chemins de traçabilité déterminant le niveau d'incertitude espéré.

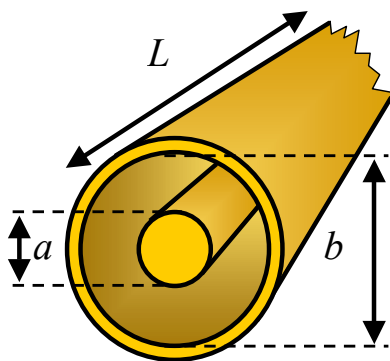


2. Caractérisation d'une ligne à air étalon

2.1. Mesure dimensionnelle d'une ligne coaxiale

Les caractéristiques des lignes coaxiales dites étalons peuvent être déterminées par des mesures dimensionnelles de la ligne coaxiale : mesure du diamètre extérieur du conducteur central, mesure du diamètre intérieur de la ligne et de sa longueur, comme le montre le schéma suivant sur la Figure 2.

Figure 2 Coupe d'une ligne coaxiale de longueur L où a représente le diamètre extérieur du conducteur central et b le diamètre intérieur du guide



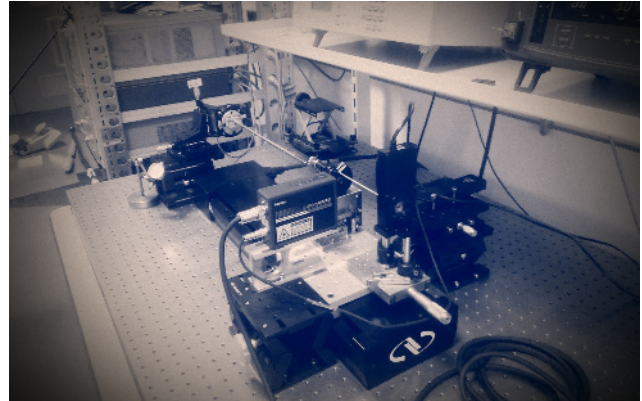
Pour assurer la traçabilité au SI des lignes coaxiales, nous utilisons :

- Des bagues étalons dont la valeur de référence correspond au diamètre type de la ligne coaxiale (diamètre intérieur du guide).
- Des piges étalons dont la valeur de référence correspond au diamètre type du conducteur central de la ligne (diamètre extérieur du conducteur), permettant de définir l'impédance caractéristique (50Ω et 25Ω , pour les lignes des kits de vérification).

Afin de caractériser les lignes coaxiales, le laboratoire a réalisé un banc automatique de mesure trois dimensions NEWPORT, associé à une jauge PRETEC pour les

mesures des diamètres internes du conducteur externe ainsi qu'à un micromètre laser MITUTOYO pour les mesures des diamètres externes du conducteur central.

Figure 3 Photo du banc de mesure dimensionnelle des lignes à air coaxiales



Le banc de mesure permet la mesure des caractéristiques dimensionnelles de la ligne coaxiale tout au long de la ligne, avec un pas d'échantillonnage de $(0,100 \pm 0,010) \text{ mm}$ ($k = 2$).

L'incertitude donnée sur le pas d'échantillonnage est liée à l'utilisation d'une platine de translation.

Grâce à la détermination des différents paramètres (longueur, diamètres a et b et leurs incertitudes associées), nous pouvons déterminer l'impédance caractéristique de cette ligne, avec son incertitude associée.

2.2. Estimation des incertitudes des diamètres de la ligne coaxiale

Les mesures des diamètres dépendent des paramètres suivants :

- Résolution du moyen de mesure
- Incertitudes des piges étalons et des bagues lisses étalons
- Répétabilité de la mesure
- Effet de la température sur les équipements

Estimation de l'incertitude du diamètre extérieur (a) du conducteur central de la ligne coaxiale

- A_1 : Composante liée à la répétabilité de la mesure des diamètres extérieurs

Pour le diamètre extérieur du conducteur central de la ligne coaxiale, l'opérateur effectue la mesure des diamètres (tous les $100 \mu\text{m}$) de la ligne complète suivant 10 axes espacés de 18° chacun.

Ainsi, pour la ligne de 125 mm qui a servi de validation, nous avons au moins (10×1250) valeurs de diamètres.

Les données recueillies sont alors utilisées pour estimer la valeur du diamètre moyen et la dispersion associée (les diamètres de l'embout du conducteur central sont retirés). Dans le cas présent, nous avons pris en compte l'écart maximal des mesures, soit $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$. Par conséquent nous considérerons :

$$A_1 = 0,7.10^{-3} \text{ mm}$$

- BR_1 : Composante liée au raccordement des piges étalons

La composante d'incertitude associée au raccordement des piges étalons pour une ligne coaxiale de type 50 Ω est tirée du dernier certificat d'étalonnage et est égale à $0,12.10^{-3}$ mm ($k = 2$).

Par conséquent nous considérerons :

$$BR_1 = \frac{0,12.10^{-3}}{2} = 0,06.10^{-3} \text{ mm}$$

- BR_1' : Composante liée au coefficient de dilatation des piges étalons

L'étalonnage des piges étalons a été effectué dans une salle climatisée à $T_{ref} = (20,0 \pm 0,3)$ °C. Les mesures dimensionnelles sont réalisées dans un laboratoire régulé à $T = (23,0 \pm 1,5)$ °C.

Le coefficient de dilatation dépend du matériau des piges étalons et se calcule de la façon suivante :

$$\Delta L = \alpha \cdot L_{T_{ref}} \cdot (T - T_{ref})$$

avec :

ΔL : la variation de longueur en mètre (m) ;

α : le coefficient de dilatation linéaire en K^{-1} . Dans notre cas, $\alpha = 11,5.10^{-6} K^{-1}$;

$L_{T_{ref}}$: la longueur initiale, soit $3,039.10^{-3}$ m ;

$T - T_{ref}$ la variation de température en K

Pour déterminer la loi de propagation de l'incertitude [4] due à la dilatation du matériau, nous allons différencier l'équation :

$$u_c^2(\Delta L) = \left(\frac{\partial \Delta L}{\partial L_{T_{ref}}} \right)^2 u^2(L_{T_{ref}}) + \left(\frac{\partial \Delta L}{\partial T} \right)^2 u^2(T) + \left(\frac{\partial \Delta L}{\partial T_{ref}} \right)^2 u^2(T_{ref})$$

$$u_c^2(\Delta L) = (\alpha(T - T_{ref}))^2 u^2(L_{T_{ref}}) + (\alpha L_{T_{ref}})^2 u^2(T) + (-\alpha L_{T_{ref}})^2 u^2(T_{ref})$$

$$u_c^2(\Delta L) = (\alpha(T - T_{ref}))^2 u^2(L_{T_{ref}}) + 2 \cdot (\alpha L_{T_{ref}})^2 (u^2(T) + u^2(T_{ref}))$$

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{(\alpha(T - T_{ref}))^2 u^2(L_{T_{ref}}) + 2 \cdot (\alpha L_{T_{ref}})^2 (u^2(T) + u^2(T_{ref}))} \quad (1)$$

avec : $u(L_{T_{ref}}) = BR_1 = 0,06.10^{-3}$ mm

$u(T) = 1,5$ °C

$u(T_{ref}) = 0,3$ °C

donc :

$$BR_1' = u_c(\Delta L) = 0,08.10^{-3} \text{ mm}$$

- L_1 : Composante liée à la résolution du micromètre laser

La résolution du micromètre laser utilisé pour la mesure des diamètres extérieurs est de $0,01.10^{-3}$ mm. Par conséquent nous considérerons :

$$BL_1 = \frac{0,01.10^{-3}}{\sqrt{3}} = 5,8.10^{-6} \text{ mm}$$

- Incertitude composée

L'incertitude composée pour le diamètre extérieur (a) du conducteur central de la ligne coaxiale vaut donc (à $k = 1$) :

$$u_a = \sqrt{A_1^2 + BR_1^2 + BR_1'^2 + BL_1^2} = 0,744.10^{-3} \text{ mm}$$

Estimation de l'incertitude du diamètre intérieur (b) de la ligne coaxiale

- A_2 : Composante liée à la répétabilité de la mesure des diamètres intérieurs

Pour le diamètre intérieur du conducteur externe de la ligne coaxiale, l'opérateur effectue la mesure des diamètres (tous les 100 μm) de la ligne complète suivant 10 axes espacés de 18° chacun.

Soit pour la ligne de 125 mm qui a servi de validation, nous avons au moins (10×1250) valeurs de diamètres.

Les données recueillies sont alors utilisées pour estimer la valeur du diamètre moyen et la dispersion associée. Dans le cas présent, nous avons pris en compte l'écart maximal des mesures, soit $0,52.10^{-3}$ mm. Par conséquent nous considérerons :

$$A_2 = 0,52.10^{-3} \text{ mm}$$

- BR_2 : Composante liée au raccordement des bagues lisses étalons.

La composante d'incertitude associée au raccordement des bagues étalons de référence pour une ligne coaxiale de type N est tirée du dernier certificat d'étalonnage et est égale à $0,11.10^{-3}$ mm ($k = 2$).

Par conséquent nous considérerons :

$$BR_2 = \frac{0,11.10^{-3}}{2} = 0,055.10^{-3} \text{ mm}$$

- BR_2' : Composante liée au coefficient de dilatation des bagues lisses étalons

L'étalonnage des bagues lisses a été effectué dans une salle climatisée à $T_{ref} = (20,0 \pm 0,3)$ °C. Les mesures dimensionnelles sont réalisées dans un laboratoire régulé à $T = (23,0 \pm 1,5)$ °C.

Le coefficient de dilatation dépend du matériau des bagues lisses étalons et se calcule de la façon suivante :

$$\Delta L = \alpha \cdot L_{T_{ref}} \cdot (T - T_{ref})$$

avec :

ΔL : la variation de longueur en mètre (m) ;

α : le coefficient de dilatation linéaire en K^{-1} . Dans notre cas, $\alpha = 11,5.10^{-6} K^{-1}$;

$L_{T_{ref}}$: la longueur initiale, soit $6,9949.10^{-3}$ m ;

$T - T_{ref}$ la variation de température en K

L'équation (1) s'applique pour déterminer la propagation de l'incertitude due à la dilatation du matériau, nous avons donc pour :

$$u(L_{T_{ref}}) = BR_2 = 0,055.10^{-3} \text{ mm}$$

$$u(T) = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$u(T_{ref}) = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$BR_{2'} = u_c(\Delta L) = 0,17.10^{-3} \text{ mm}$$

- BL_2 : Composante liée à la résolution du mesureur à jauge

La résolution de la jauge utilisée pour la mesure des diamètres intérieurs est de $0,1.10^{-3}$ mm. Par conséquent nous considérerons :

$$BL_2 = \frac{0,1.10^{-3}}{\sqrt{3}} = 5,8.10^{-5} \text{ mm}$$

- Incertitude composée

L'incertitude composée pour le diamètre intérieur (b) du conducteur externe de la ligne coaxiale vaut donc (pour $k=1$) :

$$u_b = \sqrt{A_2^2 + BR_2^2 + BR_{2'}^2 + BL_2^2} = 0,6.10^{-3} \text{ mm}$$

2.3. Impédance caractéristique de la ligne coaxiale

L'étalonnage primaire consiste à utiliser les lignes étalons pour déterminer les termes de correction de l'analyseur de réseau puis évaluer l'incertitude associée à la mesure des charges étalons.

A partir des mesures dimensionnelles du conducteur central et du conducteur externe des lignes à air, nous pouvons déduire l'impédance caractéristique de cette ligne à air coaxiale.

Une ligne coaxiale peut être modélisée comme un circuit électrique composé de résistances linéiques en série R, d'inductances linéiques en série L, de conductances linéiques en dérivation G et de capacités linéiques en dérivation C.

Dans ce cas, l'impédance caractéristique (Z) et la constante de propagation (γ) de la ligne coaxiale sont données par les équations suivantes [3] :

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2)$$

et

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (3)$$

avec la pulsation $\omega = 2\pi f$ (f : la fréquence).

Dans le cas d'une ligne coaxiale idéale, R et G sont nulles.

Et pour le cas de l'inductance linéique et de la capacité linéique sans perte, nous avons :

$$L_0 = \frac{\mu \cdot \log_e(b/a)}{2\pi} \text{ et } C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\log_e(b/a)}$$

avec :

$$\mu = 4\pi.10^{-7} \text{ kg.m.A}^{-2}.\text{s}^{-2} : \text{perméabilité du conducteur}$$

$$c = 299792458 \text{ m.s}^{-1} : \text{célérité}$$

$\epsilon = 1,000649 \cdot \epsilon_0 \text{ kg}^{-1}.\text{m}^{-3}.\text{A}^2.\text{s}^4$: la permittivité de l'air dans la ligne

avec $\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} \text{ kg}^{-1}.\text{m}^{-3}.\text{A}^2.\text{s}^4$: permittivité du diélectrique dans le vide

On en déduit donc que l'impédance caractéristique (Z_0) de la ligne coaxiale idéale (sans pertes) vaut :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \log_e\left(\frac{b}{a}\right)$$

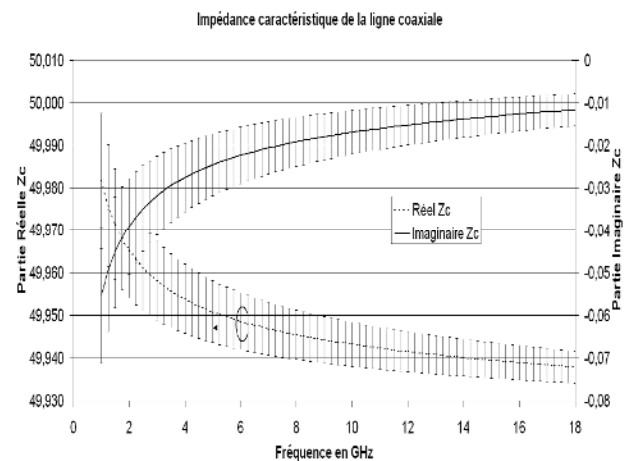
Dans le cas par exemple d'une ligne Type N où nous obtenons $a_{moyen} = 3,038$ mm et $b_{moyen} = 6,991$ mm, nous déduisons comme valeur d'impédance caractéristique Z_0 : $Z_0 = 49,957 \text{ } \Omega$ pour une valeur théorique de $50 \text{ } \Omega$.

Le calcul de l'incertitude de l'impédance Z_0 est fait de manière automatique. En effet nous avons développé un programme sous le langage Python avec les outils de propagation automatique des incertitudes développés par Blair Hall. [4]

Nous obtenons ainsi $Z_0 = (49,957 \pm 0,030) \text{ } \Omega$ ($k = 2$)

Pour cette même ligne et en utilisant notre programme [5], nous obtenons l'impédance caractéristique avec son incertitude sur la partie réelle et imaginaire, comme le montre la figure 4 :

Figure 4: Impédance caractéristique de la ligne coaxiale modélisée à partir des mesures dimensionnelles et leurs incertitudes



Grâce au développement de notre nouveau banc de mesures dimensionnelles entièrement automatisé, l'incertitude sur l'impédance caractéristique sans perte de la ligne a été améliorée de $8.10^{-3} \text{ } \Omega$.

2.4. Calcul des Paramètres S de la ligne coaxiale

Pour déterminer les paramètres S de la ligne non idéale (avec pertes), nous devons calculer les éléments suivants et leurs incertitudes associées. [3]

Résistance linéique : $R = 2\omega L_0 d_0 \left(1 - \frac{k^2 a^2 F_0}{2}\right)$

Inductance linéique : $L = L_0 \left[1 + 2d_0 \left(1 - \frac{k^2 a^2 F_0}{2}\right)\right]$

Conductance linéique : $G = \omega C_0 d_0 k^2 a^2 F_0$

Capacité linéique : $C = C_0 (1 + d_0 k^2 a^2 F_0)$

avec :

le nombre angulaire k (rad.m⁻¹) : $k^2 = (\omega \sqrt{L_0 C_0})^2$

le coefficient F₀ :

$$F_0 = \frac{\left(\frac{b^2}{a^2}\right) - 1}{2 \ln\left(\frac{b}{a}\right)} - \frac{\left(\frac{b}{a}\right) \ln\left(\frac{b}{a}\right)}{\frac{b}{a} + 1} - \frac{1}{2} \left[\frac{b}{a} + 1\right]$$

le coefficient d₀ = $\frac{\delta_s \left(1 + \left(\frac{b}{a}\right)\right)}{4b \ln\left(\frac{b}{a}\right)}$

où $\delta_s = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$ est l'épaisseur de peau.

La résistivité moyenne de la ligne ρ et la constante d'atténuation de la ligne α sont données par les équations suivantes [2] :

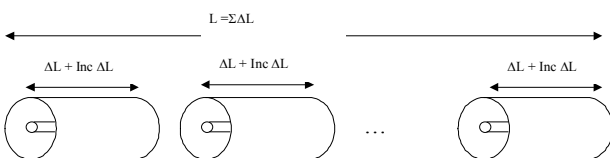
la résistivité moyenne de la ligne : $\rho \approx \left[\frac{200\alpha b}{1 + \left(\frac{b}{a}\right)}\right]^2 \frac{\pi}{\mu_0 f}$

la constante d'atténuation : $\alpha = \frac{-\ln|S_{21}|}{L}$ qui peut être

déterminée à partir d'une mesure d'affaiblissement par une méthode indépendante telle que la variation de puissance.

Afin de calculer les paramètres S de la ligne, nous utilisons la matrice ABCD pour un tronçon de ligne. La ligne coaxiale de longueur L, est divisée en n tronçons de longueur ΔL, ainsi $L = n \cdot \Delta L$ comme le montre la figure 5 ci-dessous :

Figure 5 : Découpage de la ligne coaxiale en n tronçons



De là, nous obtenons la matrice ABCD suivante :

$$ABCD_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_i \Delta L) & Z_c \cdot \sinh(\gamma_i \Delta L) \\ \frac{1}{Z_{c_i}} \sinh(\gamma_i \Delta L) & \cosh(\gamma_i \Delta L) \end{bmatrix}$$

L'impédance caractéristique de la ligne et la constante de propagation de la ligne sont données par les équations (2) et (3), et $\Delta L = (0,100 \pm 0,010)$ mm.

Nous obtenons pour l'ensemble de la ligne étalon :

$$ABCD_{Final} = \prod_{i=0}^{i=n} ABCD_i = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

et par conséquent, nous obtenons la matrice S_f de la ligne étalon d'impédance Z en fonction de la matrice ABCD finale:

$$S_f = \frac{1}{(B + C \cdot Z^2) + (A \cdot Z + D \cdot Z)} \cdot \begin{bmatrix} (B - C \cdot Z^2 + A \cdot Z - D \cdot Z) & 2Z(AD - BC) \\ 2Z & (B - C \cdot Z^2 - A \cdot Z + D \cdot Z) \end{bmatrix}$$

Nous voyons que la matrice S de la ligne ne dépend que de mesures dimensionnelles [6] (diamètre a, diamètre b, pas de mesure et incertitudes associées) ainsi que de la mesure de l'affaiblissement et son incertitude associée.

Les résultats ainsi obtenus nous permettent d'avoir les paramètres S au format complexe ainsi qu'une incertitude sur les parties réelle et imaginaire.

2.5. Comparaison des résultats obtenus par la méthode de calcul avec les mesures à l'ARV

Des mesures à l'analyseur de réseau vectoriel ont été réalisées pour cette même ligne coaxiale de type N. Afin de valider la qualité des résultats obtenus à partir des mesures dimensionnelles et du logiciel interne, nous allons comparer ces résultats aux valeurs présentes dans un certificat d'étalonnage (mesures dimensionnelles) délivré par le METAS et à ceux obtenus à l'ARV. Ces derniers tiennent compte de la connectique, qui est un paramètre inexistant dans la mesure dimensionnelle. Ces différents résultats sont présentés en figures 6 et 7 pour les paramètres de réflexion (S11) et en figures 8 à 10 pour les paramètres de transmission.

Figure 6 : Ecart sur la partie réelle du S11 entre les mesures à l'ARV et les mesures dimensionnelles

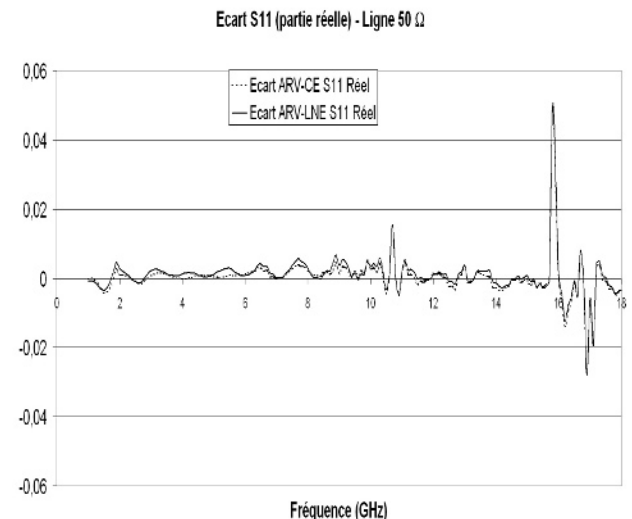
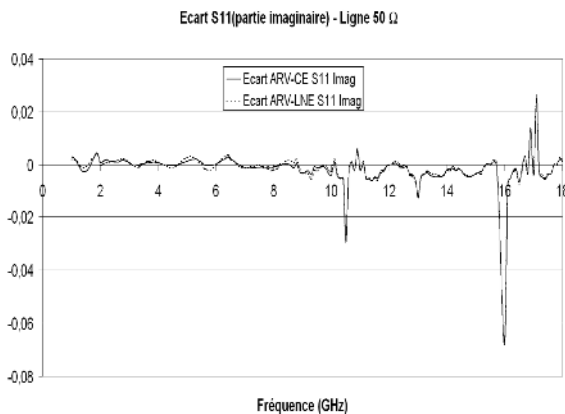


Figure 7 : Ecart sur la partie imaginaire du S11 entre les mesures à l'ARV et les mesures dimensionnelles



Les écarts (fig 6 et 7) entre modélisation et mesure visibles pour le terme S11 sur les graphes sont dus à une réflexion de la ligne coaxiale plus importante à la mesure que sur le modèle, avec des oscillations caractéristiques d'une désadaptation partielle. Ce phénomène est particulièrement marqué au-dessus de 10 GHz où la connectique N perd en fiabilité.

Figure 8 : Module du paramètre S12 de l'ARV et calculé par le LNE

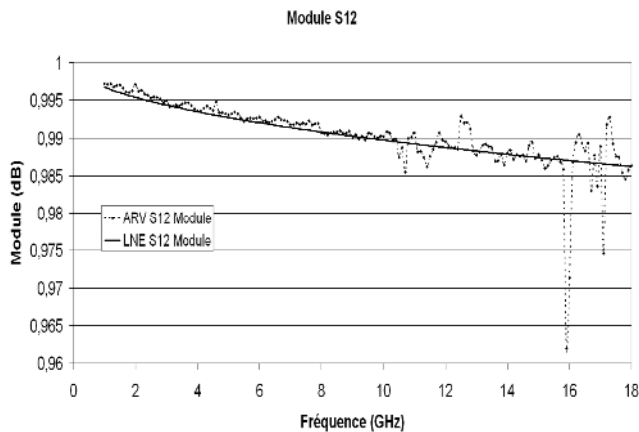


Figure 9 : Phase du paramètre S12 de l'ARV et calculé par le LNE

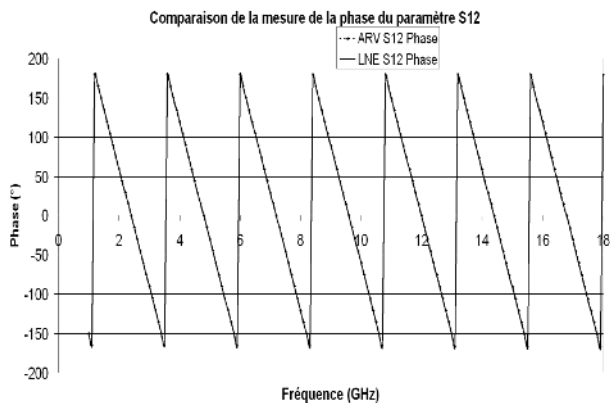
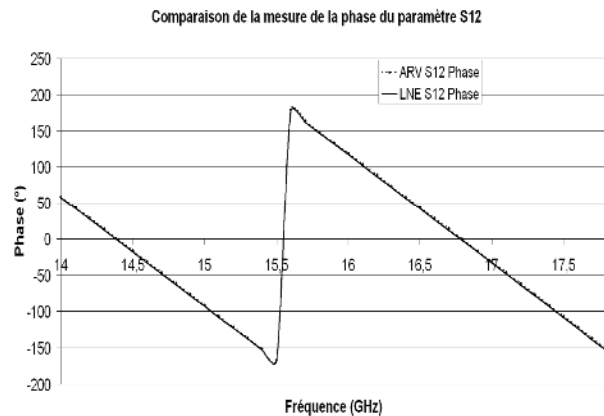


Figure 10 : Phase (zoom) du paramètre S12 de l'ARV et calculé par le LNE



Les comparaisons (fig 8 à 10) pour le terme S12 montrent des résultats similaires. Par contre nous notons qu'aux fréquences plus élevées (> 10 GHz), la dispersion des valeurs mesurées est plus importante et plusieurs pics traduisent l'instabilité de la valeur mesurée. Il faut noter que les constructeurs des connectiques N préconisent un emploi aux fréquences inférieures à 11 GHz.

Par la suite, nous envisageons de déterminer les paramètres S d'une ligne coaxiale de type PC7 à partir des mesures dimensionnelles afin d'évaluer l'effet connecteur et/ou longueur de ligne sur les paramètres S.

3. Conclusion

Le LNE dispose maintenant, comme d'autres LNM, d'un système de mesure dimensionnelle tout automatisé pour l'impédance caractéristique des lignes à air de type coaxiale, et peut par une méthode de calcul automatique donner les valeurs des paramètres S de ces lignes.

Ces lignes à air ainsi étalonnées deviennent des étalons primaires pour la vérification de l'étalonnage de l'ARV.

A la suite de ces travaux (automatisation du banc de mesures dimensionnelles et automatisation de la méthode de calcul), le LNE est capable de proposer de nouvelles incertitudes pour l'impédance caractéristique des lignes coaxiales de type 50 Ω et 25 Ω. Le LNE peut envisager d'atteindre pour une ligne de type 7mm et d'impédance 50 Ω, une incertitude de $3 \cdot 10^{-2} \Omega$ pour une ligne d'excellente qualité dimensionnelle. Le LNE participera à la comparaison internationale APMP.EM.RF-S5.CL. [7]

References

1. EURAMET, "Guidelines on the evaluation of vector Network Analysers (VNA) ", EURAMET/cg-12/v.2.0(mars 2011)
2. J. HOFFMANN, "Traceable S-parameter measurements in coaxial transmission lines up to 70 GHz", DISS. ETH No. 18593
3. C.P. Eiø, S.J. Protheroe, N.M. Ridler, "Characterising beadless air lines as reference artefacts for S-parameter measurements at RF and microwave frequencies", IEE Proc. -Sci Meas; Technol., Vol 153 N°6, pp 229-234, Nov. 2006

4. B.D. Hall, "Evaluating methods of calculating measurement uncertainty", Metrologia, 45, L5-L8, 2008
5. D.Allal, P. Vincent et A. Litwin, "Direct propagation of the uncertainties for vector network analysers", Congrès International de Métrologie, Paris, Juin 2009
6. D.R. Holt, "Scattering parameters representing imperfections in precision coaxial air lines", Journal of Research of NIST, vol 94, n°2, March-April 1989
7. http://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbresults/APM_P.EM.RF-S5.CL/APMP.EM.RF-S5.CL_Technical_Protocol.pdf