

Équivalence de deux analyseurs de réseaux vectoriels pour la traçabilité des paramètres S

Equivalence of two vector network analysers for the traceability of S parameters

Djamel ALLAL et Alexis LITWIN

Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 29 Avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes, France, djamel.allal@lne.fr.

Résumé

Les paramètres S sont mesurés à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel. Dans les différents laboratoires nationaux de métrologie, les analyseurs commerciaux basés sur une architecture à quatre coupleurs se sont progressivement imposés au détriment des analyseurs six-port, comme instrument de référence pour ce domaine. Cet article présente les résultats d'une comparaison entre les deux types d'analyseurs dans le but de montrer leur équivalence et de justifier l'utilisation d'un analyseur commercial en amont de la chaîne de traçabilité.

MOTS CLÉS: ANALYSEURS DE RÉSEAUX VECTORIELS, PARAMÈTRES S , COMPARAISON, DEGRÉ D'ÉQUIVALENCE.

Abstract

S parameters are measured using a vector network analyser. In the various National Metrology Institutes, commercial analysers based on a four-coupler architecture have been gradually imposed as reference instruments for this field, to the detriment of six-port analysers. This article presents the results of a comparison between the two types of analysers with the aim of showing their equivalence and of justifying the use of a commercial analyser at the top of traceability chain.

KEY WORDS: VECTOR NETWORK ANALYSERS, S PARAMETERS, COMPARISON, DEGREE OF EQUIVALENCE.

1. Introduction

Depuis quelques années, les comparaisons internationales dans le domaine des paramètres S sont organisées. La première en date est la comparaison CCEM.RF-K5.a.CL qui a concerné la mesure de dispositifs équipés de connecteurs 7 mm de type PC7 et

qui a eu lieu entre 1991 et 1997 [1]. Lors de cette comparaison, deux laboratoires (NIST et LCIE) avaient utilisé un analyseur de réseaux six-port, contrairement aux autres participants qui avaient utilisé un analyseur de réseaux classique commercial. Les résultats de cette comparaison montrent des écarts notamment entre laboratoires utilisant des systèmes de mesure différents, allant jusqu'à 0,03 sur le module. Deux comparaisons ont suivi, Euromet.EM.RF-S16, de 2000 à 2003 avec des dispositifs équipés de connecteurs 2,4 mm [2], où les écarts reportés sur les parties réelle et imaginaire sont nettement plus faibles et atteignent rarement 0,01, puis 7 mm type N, CCEM.RF-K5.b.CL, de 2003 à 2006 avec une généralisation de l'utilisation des analyseurs de réseaux commerciaux.

L'intérêt de la première comparaison citée était de mettre en jeu deux systèmes de mesure de conception fondamentalement différente. Cependant, la différence dans les méthodes de calibrage et étalons associés employés par les participants ne permettait pas une comparaison équitable des deux types de systèmes en question. En effet, la mesure dans le domaine des paramètres S , passe par deux phases distinctes, le calibrage et la mesure proprement dite. Le calibrage consiste à mesurer une série de composants (*kit*) dits étalons de calibrage. L'utilisation par chaque participant d'un kit de calibrage propre constitue alors un facteur de différenciation supplémentaire avec les autres systèmes de mesure. Ce qui est alors comparé, c'est le système de mesure associé à un kit de calibrage et une méthode de calibrage. Dans la comparaison qui fait l'objet de cet

article, nous nous sommes attachés à comparer deux systèmes qui ne diffèrent que par la voie empruntée pour raccorder des mesures données aux étalons d'un même kit de calibrage et en utilisant la même méthode de calibrage. Cette comparaison est effectuée dans la bande de fréquences comprises entre 1 GHz et 18 GHz à l'aide du kit de calibrage de modèle Agilent 85050C et la méthode de calibrage TRL (*Thru, Reflect, Line*). Notons qu'une comparaison à l'échelle nationale impliquant un analyseur six-port avait également été organisée [3,4] dans le but d'estimer l'exactitude des analyseurs de réseaux des utilisateurs comparativement aux moyens du LCIE, laboratoire de référence à l'époque, pour ce domaine. Lors de cette comparaison, les écarts observés entre les mesures sur analyseur six-port et les mesures sur analyseur commercial ou sur réflectomètre compensé restaient inférieurs à 0,02 pour le module.

2. Description de la comparaison

Il s'agit d'une comparaison entre deux analyseurs de réseaux vectoriels de conception différente. Après un calibrage similaire, les deux systèmes mesurent une série de composants (étalons de comparaison) dont la caractéristique principale peut être soit le facteur de réflexion (impédance) soit l'affaiblissement.

2.1. Analyseurs de réseaux vectoriels

L'analyseur de réseaux peut s'appuyer sur l'une des deux technologies suivantes :

- La séparation de signaux qui repose sur la définition même des paramètres S . Elle permet d'extraire les valeurs de ces derniers par séparation des signaux incidents, réfléchis et transmis tout simplement, à l'aide de coupleurs ou de ponts directifs. Un signal incident est injecté dans l'un des ports (accès à deux bornes) du dispositif sous test et la réponse à tous les ports, après hétérodynage est mesurée et comparée au signal incident. Pratiquement, tous les analyseurs de réseaux disponibles dans le commerce s'appuient sur ce principe ;
- L'analyse interférométrique, qui repose sur l'établissement de plusieurs combinaisons linéaires des signaux incidents et réfléchis/transmis et dont on mesure l'amplitude. Un nombre suffisant de combinaisons permet d'obtenir à la fois le module et la phase des paramètres S du dispositif sous test. Par exemple, un double six-port est un système permettant la mesure des paramètres S de quadripôles et nécessite à chaque port du quadripôle trois combinaisons de signaux plus une combinaison proportionnelle au signal incident.

Dans la communauté métrologique internationale, l'analyseur de réseaux commercial, dans le cas des configurations dites à quatre coupleurs, s'est imposé comme instrument de référence pour le raccordement des mesures de paramètres S , grâce notamment à l'excellence des niveaux de répétabilité atteints, en partie en raison de

la qualité de conception et de réalisation tant au niveau du composant que du système, mais également en raison des améliorations apportées par le calibrage rigoureux (méthodologie et qualité des étalons). Seul un nombre restreint de laboratoires nationaux de métrologie, dont le LNE (anciennement le LCIE) a développé et maintient des analyseurs de réseaux double six-port de technologies différentes en guise de moyen de raccordement alternatif et original. Cet instrument peut atteindre les mêmes performances que les analyseurs de réseaux commerciaux.

Les deux analyseurs qui sont comparés sont l'analyseur de réseaux double six-port du LNE fonctionnant dans la bande 1 GHz – 18 GHz et un analyseur de réseaux commercial à quatre coupleurs (modèle Agilent 8510C) fonctionnant dans la bande 45 MHz – 50 GHz.

2.2. Étalons de comparaison

Les étalons utilisés pour la comparaison sont ceux constituant le kit de vérification Agilent 85051B pour connecteur PC-7. Il s'agit des quatre composants suivants :

- Ligne à air d'impédance caractéristique 50Ω et de longueur 100 mm ;
- Ligne à air d'impédance caractéristique 25Ω et de longueur 100 mm ;
- Affaiblisseur adapté de valeur 20 dB ;
- Affaiblisseur adapté de valeur 50 dB.

Les deux lignes à air et les deux affaiblisseurs permettent respectivement d'évaluer les performances du système dans des conditions différentes d'adaptation et d'affaiblissement.

2.3. Etalons de calibrage

Le calibrage d'un analyseur de réseaux, revient à mesurer un certain nombre de composants étalons permettant à partir de la connaissance partielle ou complète de leurs matrices S , de résoudre un système d'équations où les inconnues sont les imperfections inhérentes au système. Ces imperfections ou erreurs, une fois déterminées, sont prises en compte dans les corrections apportées aux mesures dites brutes et permettent de déduire la valeur exacte des paramètres S mesurés.

Dans cette comparaison, la méthode de calibrage utilisée est la même pour les deux analyseurs de réseaux. Il s'agit de la méthode TRL développée initialement pour le calibrage des analyseurs six-port [5] et transposée aux analyseurs classiques à quatre coupleurs [6]. Notons ici que bien que les procédures soient différentes entre les deux systèmes (nombre plus important de mesures pour la détermination des constantes propres des six-port [5] et mesures annexes pour la correction des termes d'erreur dus à l'imperfection du commutateur dans le cas de l'analyseur classique [6]), la correction des paramètres S mesurés reste la même, car ramenée aux seuls étalons du kit de calibrage TRL, représentés par les trois quadripôles suivants :

- *Thru*, qui est en fait le quadripôle virtuel représenté par la connexion directe des deux ports de l'analyseur. Sa matrice S est connue ($S_{11} = S_{22} = 0$ et $S_{12} = S_{21} = 1$) si les deux ports de l'analyseur présentent une impédance identique ;
- *Reflect*, qui est en fait un quadripôle virtuel constitué de deux charges inconnues mais identiques, de préférence désadaptées et mesurées chacune sur un des deux ports ;
- *Line*, qui est une ligne de transmission adaptée. Sa matrice S est partiellement connue ($S_{11} = S_{22} = 0$) et son facteur de transmission approximativement connu est déterminé lors du calibrage. Cette ligne est l'étalon d'impédance par rapport à laquelle les paramètres S calculés sont donnés.

La méthode TRL, d'un point de vue de la traçabilité, est sans nul doute celle qui garantit la plus grande exactitude, si certaines conditions sont respectées. Il faut comme mentionné plus haut, que les deux charges utilisées pour la mesure du *Reflect* soient identiques et que la ligne (*Line*), symétrique, possède une longueur permettant de la différencier de la connexion directe (*Thru*), l'idéal étant une longueur représentant un déphasage de 90° (généralement, on accepte des valeurs comprises entre 20° et 160°). De plus, il est primordial que les conditions de propagation à l'interface de la connexion directe soient identiques à celles réalisées dans la ligne, d'où la nécessité de disposer au niveau des deux ports de l'analyseur, de connecteurs de qualité de réalisation équivalente à celle de la ligne étalon.

3. Incertitudes de mesure

La différence dans le principe même des deux systèmes en comparaison entraîne deux approches quelque peu différentes du calcul des incertitudes de mesure.

Rappelons qu'un guide d'évaluation des incertitudes de mesure quand elles sont réalisées à l'aide d'un analyseur de réseaux a été produit par l'EA (*European cooperation for Accreditation*) [7]. Il s'agit d'un document basé sur le travail du groupe d'experts EA « *HF Electrical Quantities* », en collaboration avec Euromet et le club Anamet. Ce document développe les méthodes permettant d'évaluer les principales sources d'incertitudes que sont la directivité effective, les adaptations effectives de source et de charge, les défauts de déséquilibre des voies ou *tracking* (dus aux différences entre les voies empruntées par les signaux réfléchis et transmis et le signal incident), de linéarité et d'isolation, les propriétés de répétabilité des commutateurs du système et des connecteurs, la flexion des câbles et les conditions ambiantes. Cette évaluation est basée sur la philosophie suivante. En mesurant des étalons dont la traçabilité au SI est établie, on peut *a posteriori* mettre en évidence les imperfections résiduelles, subsistant après calibrage. C'est cette méthodologie qui est appliquée aux mesures effectuées à l'aide de l'analyseur de réseaux commercial.

Par contre, dans le cas de l'analyseurs de réseaux six-ports, la méthode d'évaluation qui est appliquée [8] repose sur la propagation, à partir de la mesure des rapports de puissance, des erreurs aléatoires commises lors de l'évaluation des constantes propres des deux six-ports (phase de calibrage) et lors de la détermination des paramètres S du composant mesuré (phase de mesure). Une estimation des erreurs systématiques dues principalement aux étalons de calibrage et aux connecteurs des deux six-ports doit également être effectuée. En effet, même si les erreurs dues aux directivités imparfaites et aux désadaptations sont prises en compte de manière intrinsèque, il subsiste néanmoins des erreurs résiduelles sur les résultats de mesure.

Au final, les incertitudes données pour chacun des deux systèmes sont du même ordre de grandeur. Elles dépendront nécessairement du calibrage et de la fréquence mais également de la valeur du paramètre S_{ij} mesuré et de la nature du connecteur. Par exemple, dans le cas de la mesure du facteur de réflexion Γ d'une charge, l'incertitude en module, tenant compte des erreurs résiduelles après calibrage peut s'écrire de la façon suivante :

$$U = D + T\Gamma + M\Gamma^2 + R \quad (1)$$

où D représente la directivité effective,

T est l'effet conjoint de *tracking* et de non-linéarité,

M représente l'adaptation effective,

R représente les contributions aléatoires.

Dans le cas d'un calibrage TRL, les incertitudes les plus faibles peuvent être obtenues, compte tenu de la nature de l'étalon unique, la ligne, dont l'impédance peut être déterminée avec la plus grande exactitude (traçabilité aux mesures dimensionnelles). À côté de valeurs typiques de directivité et d'adaptation effective de l'ordre de 0,001 en module pour des mesures avec des connecteurs PC7, la contribution due à la répétabilité du connecteur de qualité métrologique, peut devenir prépondérante quand elle peut varier de quelques 10^{-4} à quelques 10^{-3} en fonction de la rigueur observée dans les conditions d'entretien et d'utilisation.

Compte tenu de ces différents aspects, des valeurs maximales d'incertitudes sur la bande de fréquence considérée ont été évaluées pour chacun des étalons de comparaison mesurés. Bien que les incertitudes soient nettement plus faibles en transmission qu'en réflexion, une incertitude élargie de 0,01, correspondant à la limite observable dans le cas de la mesure du facteur de réflexion conviendra parfaitement dans le cadre de cette comparaison. Le but étant de situer deux bancs de mesure, l'un par rapport à l'autre de manière globale – c'est-à-dire sur la bande de fréquence d'utilisation et la gamme de valeurs mesurées. Cette valeur est donc appliquée indifféremment pour les paramètres de réflexion et de transmission. Elle tient compte d'un facteur d'élargissement $k = 2,5$ normalement appliqué dans le cas de grandeurs bidimensionnelles pour un intervalle de confiance de 95 %.

4. Résultats de comparaison

4.1. Mesures

Pour garder une forme d'homogénéité entre les paramètres de réflexion (S_{11} et S_{22}) et de transmission (S_{21} et S_{12}), toutes les données sont présentées en partie réelle et partie imaginaire. Par ailleurs, et compte tenu de la symétrie nominale des étalons de comparaison et de leur utilisation pour l'évaluation des performances du système soit en réflexion soit en transmission, seul le paramètre S_{11} est présenté pour les deux lignes à air (fig. 1 et 2), et dans le cas des deux affaiblisseurs, c'est le paramètre S_{21} qui est présenté (fig. 3 et 4).

Compte tenu des différentes dynamiques et échelles utilisées, on note un très bon accord relatif, sur la bande de fréquence de manière globale entre les deux systèmes pour la ligne 25 Ω et les deux affaiblisseurs. Seule la mesure de la ligne 50 Ω montre des écarts relatifs importants, notamment à 1 GHz et 2 GHz.

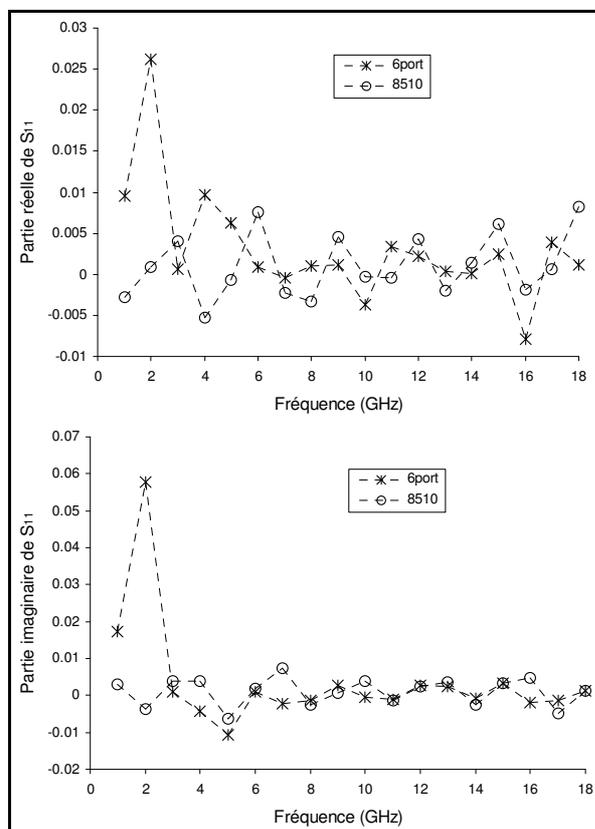


Fig. 1. – Ligne à air 50 Ω ; Comparaison sur S_{11} .

4.2. Degré d'équivalence

Similairement au vocabulaire utilisé dans les comparaisons clés internationales, nous utiliserons le terme de degré d'équivalence pour désigner l'écart existant entre deux mesures réalisées pour un même paramètre. Généralement le degré d'équivalence bilatéral est déterminé en calculant tout simplement la différence entre les deux mesures :

$$d_{ab} = x_a - x_b \quad (2)$$

où x_a et x_b sont les deux résultats de mesure. Le terme d_{ab} représente la distance entre x_a et x_b . Pour comparer deux nombres complexes, qui d'un point de vue géométrique sont représentés par deux points dans le plan, on utilisera également la distance séparant ces deux points [9] :

$$d_{ab} = \|x_a - x_b\| \quad (3)$$

L'incertitude élargie sur le degré d'équivalence, compte tenu des incertitudes associées aux deux mesures sera de l'ordre de 0,011.

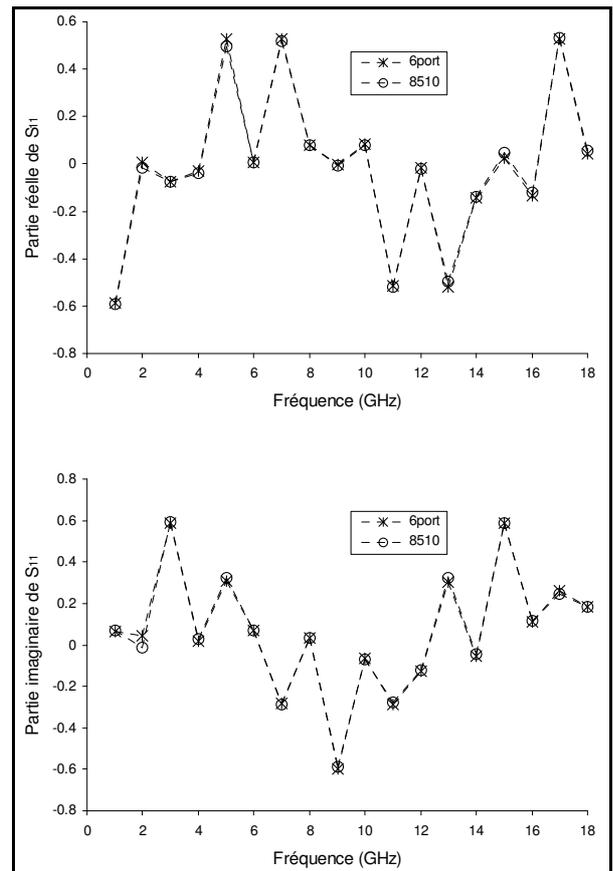


Fig. 2. – Ligne à air 25 Ω . Comparaison sur S_{11} .

4.3. Interprétation

Le tableau 1 permet de comparer globalement les deux systèmes. Les points suspects (sur fond gris) sont ceux pour lesquels le degré d'équivalence est supérieur à l'incertitude associée.

Concernant les mesures en transmission, on peut noter l'accord entre l'analyseur six-port et l'analyseur classique, en deçà même des conditions définies plus haut.

Pour les mesures en réflexion, des écarts apparaissent, plus accentués dans le cas de la ligne à air 25 Ω . Cela peut s'expliquer par la différence entre les deux analyseurs au niveau du connecteur du port n° 1. En effet, le connecteur sur l'analyseur commercial est un modèle de haute

précision, réalisé sur des tolérances extrêmes similaires (même fabricant) à celle de la ligne à air du kit de calibrage, de longueur nominale 6,95 mm pour les fréquences comprises entre 3 GHz et 18 GHz. Par contre, le connecteur de l'analyseur six-ports est un connecteur standard qui ne permet pas d'offrir de telles performances.

Sur le port n° 2, les deux analyseurs utilisent le même connecteur sur un adaptateur spécial permettant la connexion de la ligne à air du kit de calibrage par vissage du conducteur central.

Notons par ailleurs, que le conducteur central de la ligne à air, de longueur nominale 50 mm utilisée pour les fréquences 1 GHz et 2 GHz ne se connecte pas par vissage et n'est pas compatible avec l'adaptateur spécial. Elle ne garantit donc pas un alignement parfait, ce qui explique que l'écart observé soit plus ou moins important pour ces deux fréquences.

Ces résultats sont typiques d'un calibrage réalisé avec des connecteurs non parfaits [10] et montrent l'importance de respecter l'homogénéité de propagation entre les conditions *Thru* et *Line* lors du calibrage TRL.

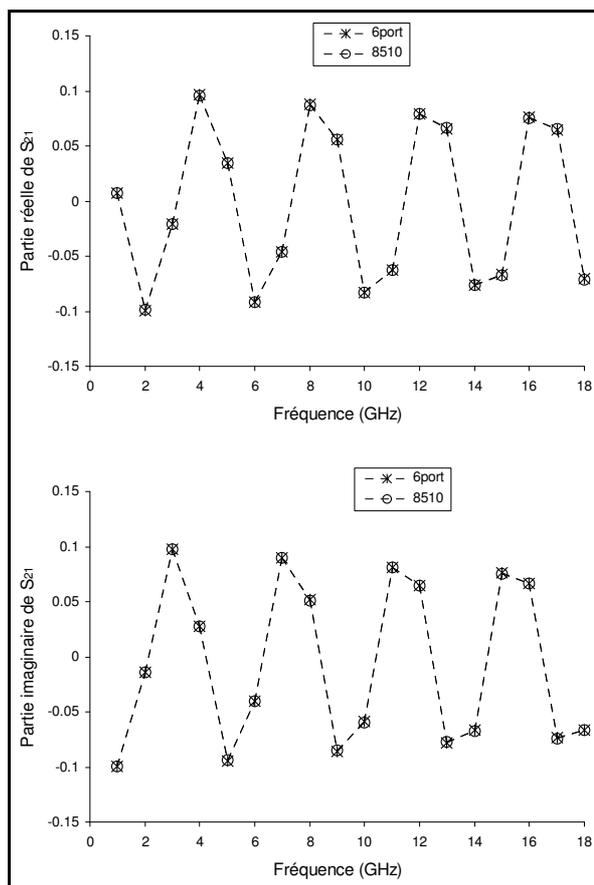


Fig. 3. – Affaiblisseur 20 dB ; Comparaison sur S_{21} .

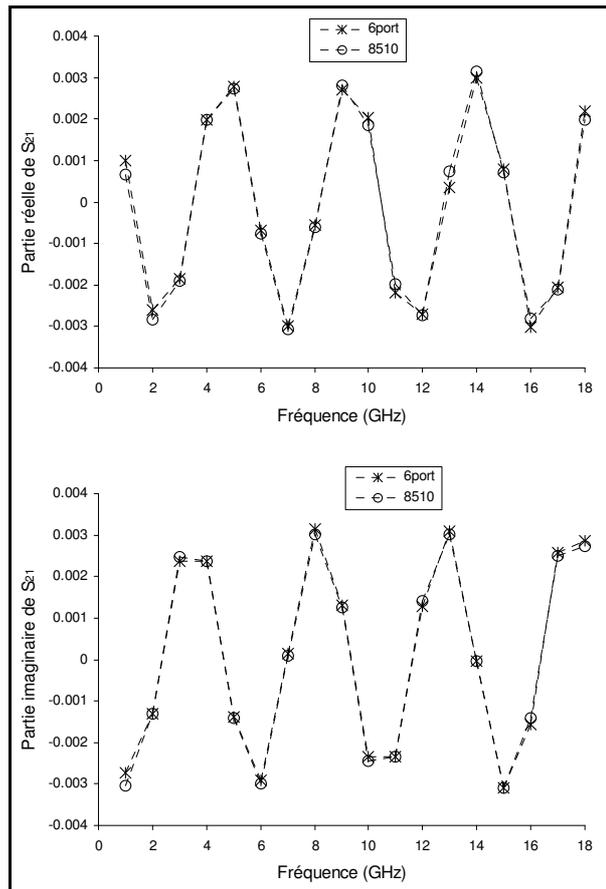


Fig. 4. – Affaiblisseur 50 dB ; Comparaison sur S_{21} .

Tableau 1
Degrés d'équivalence.

Fréquence	Ligne 50 Ω (S_{11})	Ligne 25 Ω (S_{11})	Affaibl. 20 dB (S_{21})	Affaibl. 50 dB (S_{21})
1	0,019	0,006	0,0004	0,0005
2	0,066	0,060	0,0002	0,0002
3	0,004	0,003	0,0001	0,0001
4	0,017	0,011	0,0004	0,0000
5	0,008	0,033	0,0013	0,0000
6	0,007	0,002	0,0001	0,0001
7	0,010	0,013	0,0003	0,0001
8	0,005	0,001	0,0006	0,0002
9	0,004	0,010	0,0007	0,0001
10	0,006	0,001	0,0003	0,0002
11	0,004	0,012	0,0004	0,0002
12	0,002	0,006	0,0007	0,0001
13	0,003	0,031	0,0008	0,0004
14	0,002	0,006	0,0005	0,0001
15	0,004	0,021	0,0008	0,0001
16	0,009	0,015	0,0010	0,0003
17	0,005	0,020	0,0014	0,0001
18	0,007	0,013	0,0005	0,0002

5. Conclusion

Une comparaison entre deux analyseurs de réseaux vectoriels a été menée. Ces deux analyseurs de réseaux sont de conception fondamentalement différente, l'un étant basé sur le principe de séparation des signaux et hétérodynage (analyseur commercial de type Agilent 8510C) et l'autre sur un principe interférométrique sans changement de fréquence (analyseur six-port du LNE). Un critère de comparaison a été établi afin de comparer les deux systèmes de manière globale, c'est-à-dire sur la bande de fréquence d'utilisation et sur la gamme de valeurs mesurées. Ce travail montre l'équivalence entre les deux types d'analyseurs de réseaux à condition de respecter rigoureusement les conditions imposées par la procédure de calibrage. Cela montre la pertinence d'un chemin de traçabilité des mesures de paramètres S via un analyseur de réseaux commercial [11], certainement plus avantageux pour des raisons de rapidité d'exécution et de commodité de mise en œuvre.

Références

- [1] IDE J.P., "International Comparison GT-RF/83-4: Measurement of Scattering Coefficients Over the Band 2 – 18 GHz (CCEM.RF-K5.a), Final Report", juillet 1999.
- [2] RÜFENACHT J. et al., "EUROMET.EM.RF-S16 Final Report, Comparison of scattering parameter measurements in the coaxial 2.4 mm line system", novembre 2004
- [3] ACHKAR J., BERGEAULT E., VALON M. et HUYART B., « Mesures comparatives entre différents analyseurs de réseaux vectoriels en France », *Bulletin du BNM*, **94**, 1993, 27-32.
- [4] ACHKAR J., GENEVES G. et VALON M., « Intercomparaison à l'usage des utilisateurs d'analyseurs de réseaux vectoriels », *Journée d'études du Club Analyse de réseaux*, Toulouse, octobre 1991.
- [5] ENGEN G. F. et HOER C. A., "Thru-reflect-line: an improved technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer", *IEEE Trans. MTT*, **27**, 1979, 983-987.
- [6] RYTTING D. "Network analyzer error models and calibration methods", *Hewlett-Packard RF & Microwave Symposium*, juin 1987.
- [7] European co-operation for Accreditation, EA Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA), *Publication EA-10/12*, mai 2000.
- [8] JUDISH R. M. et ENGEN G. F., "On-Line Accuracy Assessment for the Dual Six-Port ANA: Statistical Methods for Random Errors", *IEEE Trans. I&M*, **36**, 1987, 507-513.
- [9] ZEIER M., "On the Analysis of Multidimensional Quantities in Measurement Comparisons", *proc. CPEM*, Turin, juillet 2006, 458-459.
- [10] JURUSHEK J. R., HOER C. A. et KAISER R. F., "Calibrating Network Analyzers with Imperfect Test Ports", *IEEE Trans. MTT*, **38**, 1989, 898-901.
- [11] Rapport d'activité 2005 de la métrologie française, *Revue française de métrologie*, **7**, 2006, 16.