

# Mise en place de la traçabilité des mesures de paramètres S sur guide d'ondes au LNE

Djamel Allal<sup>a</sup>, Alexis Litwin

Laboratoire National de Métrologie et d'Essais LNE, France

**Abstract.** This paper presents the work carried out at LNE in order to establish the traceability of waveguide S parameter measurements to the International System of Units. The traceability is established through the dimensional measurement of the waveguide flange interfaces and the corresponding uncertainty component is evaluated against the standardized nominal values by using electromagnetic simulation and sensitivity analysis to dimension variations.

## 1 Introduction

Dans le domaine métrologique radiofréquence et micro-ondes, les paramètres S qui sont mesurés avec un analyseur de réseau vectoriel (VNA) représentent l'une des principales grandeurs et leur traçabilité doit être établie tant pour la ligne coaxiale que pour le guide d'ondes en tant que supports de propagation des ondes électromagnétiques.

Parce que leur définition nécessite qu'ils soient normalisés par rapport à une impédance (généralement 50  $\Omega$  pour la ligne coaxiale), les paramètres S ne sont pas une grandeur absolue et leur traçabilité est établie grâce à la connaissance de l'impédance de référence définie pour l'ensemble des étalons utilisés pour l'étalonnage du VNA, comme par exemple l'impédance caractéristique d'une ligne de transmission coaxiale.

Par conséquent, au LNE, des travaux ont été menés au cours de la dernière décennie pour établir la traçabilité des paramètres S sur ligne coaxiale en reliant l'impédance caractéristique de lignes coaxiales à air étalons au Système international d'unités (SI) par la mesure dimensionnelle du diamètre intérieur de leur conducteur externe et le diamètre extérieur de leur conducteur interne. En effet, l'impédance caractéristique d'une ligne coaxiale est définie comme une fonction du rapport de ces deux derniers diamètres.

Pour les guides d'ondes, l'impédance de référence peut être liée à l'impédance d'onde en espace libre, mais il faut alors prendre en compte le mode de propagation, qui est généralement le mode transverse électrique (TE) pour l'utilisation classique des guides d'ondes rectangulaires. Étant donné que le mode de propagation est directement lié à la forme transversale de la section du guide d'ondes, des mesures dimensionnelles doivent également être effectuées afin d'établir la traçabilité au SI des paramètres S mesurés.

Les capacités actuelles de mesure des paramètres S au LNE vont de 8 GHz à 170 GHz, en utilisant des guides d'ondes de différentes dimensions transversales pour permettre de couvrir plusieurs bandes de fréquences (plus la bande de fréquence est élevée, plus les dimensions transversales correspondantes du guide d'ondes sont petites). Pour chaque bande de fréquence, un guide d'ondes qui sera dit de référence est caractérisé en termes de ses dimensions et de sa forme transversales (contrôle de la forme rectangulaire). Ces mesures dimensionnelles, ainsi que des simulations électromagnétiques, sont prises comme données d'entrée d'une analyse de sensibilité afin d'évaluer l'incertitude due à un écart par rapport aux dimensions et à la forme nominales et à tout désalignement des sections de guide d'ondes induites. En effet, un tel désalignement entraînera un décalage entre deux sections de guide d'ondes, et le facteur de réflexion correspondant peut être évalué par simulation électromagnétique en utilisant comme données d'entrée les dimensions mesurées.

En établissant la traçabilité des paramètres S sur guide d'ondes, le LNE étend ses capacités d'étalonnage dans ce domaine et améliore ses capacités pour les mesures de puissance et notamment pour les gammes d'ondes millimétriques, au-delà de 50 GHz, pour lesquelles les étalons de puissance ne sont disponibles qu'en guide d'ondes.

## 2 Chemin de traçabilité

La traçabilité des mesures de paramètres S peut être établie soit de manière directe via les étalons utilisés pour l'étalonnage, soit de manière indirecte via d'autres étalons qui sont mesurés après l'étalonnage.

Le deuxième mode opératoire a été historiquement le premier à être mis en place en raison de la complexité de ce type de mesure (équations multiples, grandeurs

<sup>a</sup> Djamel Allal : djamel.allal@lne.fr

complexes). En effet, la propagation des incertitudes depuis les étalons était inenvisageable dans les années qui ont suivi le développement et la mise sur le marché des premières générations de VNA compte tenu des moyens de calcul disponible alors. Durant des décennies la méthode indirecte a donc été le seul moyen de tenir compte de l'incertitude due aux étalons dans le bilan d'incertitudes total et conséquemment d'établir la traçabilité au SI.

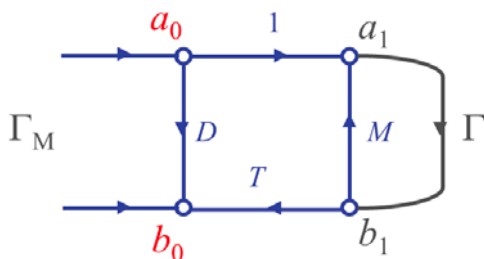
Depuis quelques années des outils informatiques logiciels ont été développés, permettant de bénéficier de la puissance de calcul disponible et de propager les incertitudes directement depuis les étalons utilisés pour l'étalonnage, soit en utilisant l'approche classique du GUM [1] par le calcul des dérivées partielles, soit utilisant la méthode de Monte Carlo telle que décrite dans le supplément xx du GUM [2].

Compte tenu de la méthode indirecte déjà mise en place au laboratoire pour les mesures sur ligne coaxiale, le choix s'est porté naturellement sur une adaptation de cette même méthode pour les mesures sur guide d'ondes. Pour chaque bande de fréquence d'intérêt un guide d'ondes est caractérisé dimensionnellement afin d'être utilisé guide d'ondes de référence pour évaluer la composante d'incertitude due aux étalons.

### 3 Evaluation des composantes d'incertitude

La méthode employée est celle décrite initialement dans le guide EURAMET cg-12 dans sa première version [3] pour les mesures sur ligne coaxiale. Cette méthode a été réévaluée et améliorée dans la cadre de la dernière révision de ce guide [4] et s'applique également aux mesures sur guide d'ondes. Cette méthode dite du « ripple » en anglais utilise comme son nom l'indique les ondulations générées par les réflexions et leur analyse en fonction du composant mesuré.

La méthode du ripple s'appuie sur le modèle de mesure de la Figure 1 ci-dessous.



**Figure 1.** Modèle de mesure dans le cas de la mesure d'une charge

Dans ce cas, seul un port du VNA est utilisé pour la mesure du facteur de réflexion  $\Gamma$  d'une charge (paramètre  $S_{11}$  ou  $S_{22}$ , selon le port utilisé). Ce modèle peut être représenté par l'équation

$$\Gamma_M = D + \frac{T\Gamma}{1-M\Gamma} \quad (1)$$

où  $\Gamma_M$  représente le résultat de mesure du facteur de réflexion et  $D$ ,  $T$  et  $M$ , désignent respectivement la directivité, l'équilibre en réflexion (reflection tracking en anglais, c'est-à-dire l'équilibre entre les voies mesurant les signaux incident et réfléchi) et l'adaptation de source du port de mesure du VNA.

Le modèle de l'équation (1) est linéarisé par rapport aux différentes contributions aux incertitudes en posant que  $D$  et  $M$  sont nuls et que  $T$  est égal à 1.

$$u(\Gamma)^2 = [u(D) + |\Gamma|u(T) + |\Gamma|^2u(M) + |\Gamma|u(L)]^2 + u(R)^2 \quad (2)$$

avec  $u(D)$ ,  $u(T)$  et  $u(M)$ , les termes propres au modèle de mesure, définis ci-dessus,  $u(L)$  la linéarité du système de mesure et  $u(R)$  représentant l'ensemble des contributions aléatoires comme la répétabilité des connecteurs, le bruit de mesure et l'effet de température. Notons ici, que dans le cas de la mesure d'une charge il n'est pas nécessaire d'inclure une incertitude due aux mouvements du câble du VNA, si celui-ci n'est bien entendu pas déplacé entre les étapes d'étalonnage et de mesure.

Les méthodes permettant d'évaluer les différentes contributions sont bien établies et décrites dans [3, 4] et seules celles qui sont dues aux étalons sont développées ici sauf pour le terme d'équilibre en réflexion. En effet, dans [4] il est préconisé d'utiliser un court-circuit étalonné or ceci nécessiterait une étape supplémentaire dans la chaîne de traçabilité sauf si on applique une méthode d'étalonnage de type TRL [5] ou équivalente, où le court-circuit peut être déterminé lors de l'algorithme d'étalonnage. Dans notre cas, ne disposant pas de kit d'étalonnage TRL pour la plupart des bandes de fréquences concernées, nous attribuons une valeur typique telle que spécifiée par le fabricant d'ARV, sachant qu'il s'agit par construction, d'une contribution mineure et négligeable.

Concernant les termes de directivité et d'adaptation, l'évaluation se fait en utilisant un guide d'ondes de référence de longueur suffisante pour permettre de mettre en évidence les ondulations dues à la réflexion générée par une charge qui sera connectée au bout du guide d'ondes de référence.

En s'appuyant sur la relation (2), on peut voir qu'il s'agira de connecter au bout du guide d'ondes de référence une charge adaptée pour mettre en évidence le terme de directivité et un court-circuit, pour mettre évidence le terme d'adaptation, qui restera cependant corrélé avec les termes de directivité et d'équilibre en réflexion.

En effet, quand une charge adaptée (de faible réflexion) est connectée au bout du guide d'ondes de référence, si on trace la réponse en amplitude en fonction de la fréquence on observe une ondulation qui se superpose à la réponse du facteur de réflexion de la charge elle-même. Cette ondulation est liée à la directivité résiduelle et cette dernière peut être déterminée comme étant égale à la demi-amplitude pic à pic de l'ondulation.

De la même manière, quand un court-circuit est connecté au bout du guide d'ondes de référence, l'ondulation obtenue qui est dans ce cas principalement liée à l'adaptation de source, est déterminée comme étant égale à la demi-amplitude pic à pic de l'ondulation, cette fois-ci générée par le court-circuit. Cependant, comme cela peut être déduit de la relation (2), ce terme inclut également l'effet de l'adaptation de source et de l'équilibre en réflexion ce qui majore la composante d'incertitude due à l'adaptation de source.

Finalement, à la composante d'incertitude due à la directivité résiduelle, s'ajoute la contribution de traçabilité obtenue par caractérisation dimensionnelle des interfaces (brides) du guide d'ondes de référence.

#### 4 Caractérisation dimensionnelle

Deux aspects sont à prendre en compte dans la caractérisation dimensionnelle du guide d'ondes de référence. Le premier concerne les dimensions de la section de guide d'ondes, c'est-à-dire l'écart qui existe entre les valeurs mesurées et les valeurs normalisées pour les deux dimensions de la section rectangulaire. Le second concerne la forme de cette section rectangulaire, à savoir s'il existe un défaut d'orthogonalité entre les différents côtés de la section rectangulaire (rectangularité) et si celle-ci est bien positionnée par rapport à l'axe central de propagation de l'onde électromagnétique.

Tous les paramètres évoqués ci-dessus permettent de mettre en évidence un quelconque défaut d'alignement des parois internes du conduit de propagation à l'interface entre deux guides d'ondes. Tout défaut d'alignement va générer des réflexions dont le niveau traduit l'écart par rapport à un guide d'onde de référence idéal.

Sur ligne coaxiale, cela revient par analogie à évaluer l'écart qui existe entre l'impédance caractéristique de la ligne coaxiale de référence et une ligne idéale dont l'impédance caractéristique est égale à  $50 \Omega$  exactement.

Cette caractérisation dimensionnelle est réalisée à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Les différentes coordonnées qui sont relevées sont indiquées sur la Figure 2 ci-dessous. Il s'agit des quatre coins  $a, b, c$  et  $d$  de la section rectangulaire ainsi que les centres  $e, f, g$  et  $h$  des quatre trous d'alignement.

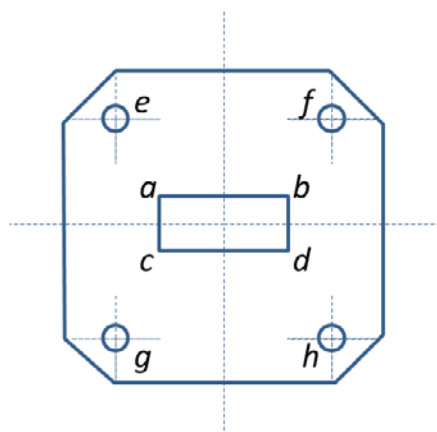


Figure 2. Interface (bride) du guide d'ondes de référence

#### 5 Etude de sensibilité par simulation

Le logiciel de simulation électromagnétique 3D Microwave Studio de CST est utilisé pour évaluer la sensibilité du paramètre  $S_{11}$  (ou  $S_{22}$ ) d'un guide d'ondes symétrique, aux variations des coordonnées  $a, b, c, d, e, f, g$  et  $h$ . Des scénarios de variation de ces coordonnées sont établis, où par exemple le grand côté de la section rectangulaire est varié dans une gamme de valeurs en rapport avec les écarts relevés lors de la caractérisation réalisées sur la MMT, en prenant en compte l'incertitude de mesure de cette dernière. Ces simulations sont effectuées pour toutes les bandes de fréquences d'intérêt.

Un pire cas est évalué à partir de tous les scénarios englobant les dimensions de la section rectangulaire, sa rectangularité et sa position par rapport à l'axe de propagation de l'onde électromagnétique. Une incertitude est alors attribuée pour chaque bande de fréquence en prenant une loi de distribution uniforme.

#### 6 Conclusion

Nous avons présenté une méthode permettant au LNE d'établir la traçabilité des mesures de paramètres S sur guide d'ondes en s'appuyant sur l'expérience acquise dans le domaine des mesures de paramètres S sur ligne coaxiale. La méthode repose sur l'utilisation d'un guide d'ondes de référence caractérisé dimensionnellement afin d'évaluer la composante d'incertitude liée aux écarts par rapport aux valeurs normalisées.

La méthode utilisée est inspirée de la méthode dite du ripple déjà mise en place pour les mesures sur ligne coaxiale et permet d'intégrer dans le bilan d'incertitude une composante dite de traçabilité qui tient compte du raccordement d'un guide d'ondes de référence au SI via des mesures dimensionnelles.

#### Références

1. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, GUM, (2008)
2. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, GUM Supplement 1, (2008)
3. EURAMET/cg-12/v.01 (2010)
4. EURAMET/cg-12/v.03 (à paraître)
5. G.F. Engen, C.A. Hoer, IEEE MTT, **27**(12) (1979)