

## Projet de recherche

### « Conception et développement d'étalons de paramètres S pour la caractérisation de nano-dispositifs haute fréquence »

#### Contexte

Les travaux menés au sein des laboratoires nationaux de métrologie (LNM) permettent de garantir la traçabilité des mesures des grandeurs physiques aux unités du Système international (SI) en démontrant l'équivalence internationale de leurs étalons de mesure dans le cadre de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du Comité international des poids et mesures (CIPM MRA) et ainsi l'équivalence des mesures réalisées par les industriels du monde entier pour la certification de leurs produits.

Parmi les grandeurs traitées depuis de nombreuses années, les paramètres de dispersion ( $S$  Scattering), grandeurs électriques d'intérêt dans le domaine des hyperfréquences, ont fait l'objet de nombreux travaux en métrologie qui permettent aujourd'hui de disposer, via l'analyseur de réseau vectoriel (VNA – Vector Network Analyzer), de mesures traçables pour un grand champ d'applications. En effet, les domaines couverts sont la ligne coaxiale, le guide d'ondes rectangulaire, la ligne coplanaire ; pour des fréquences allant selon le domaine, du Hz au THz.

Pour étendre ces capacités, le LNE a lancé une étude dans le cadre du programme de recherche du Réseau national de la métrologie française (RNMF) sur la métrologie des paramètres  $S$  pour les impédances de référence dite non traditionnelles, à savoir les impédances symétriques et les impédances extrêmes. La première étape de cette étude s'est intéressée avec le support d'une thèse CIFRE, à la traçabilité des mesures des paramètres  $S$  différentiels sur des circuits avec entrées/sorties symétriques et a permis de développer un ensemble d'étalons et méthodes associées pour l'étalonnage et la vérification des mesures de paramètres  $S$  en mode mixte sous pointes [1]. Le projet de thèse présenté ici entre dans le cadre de la seconde étape de cette étude, avec pour but de répondre à la question de la traçabilité des mesures de paramètres  $S$  à l'échelle nanométrique et la problématique qui en résulte, liée à la mesure d'impédances extrêmes, basses et hautes.

Pour mener à bien ce travail de recherche, la thèse s'appuiera sur les compétences du Département Métrologie électrique Haute fréquence du LNE, du Groupe Circuits, Systèmes et Applications des Microondes (CSAM) de l'IEMN et du futur doctorant.

Le LNE est le LNM français, en charge de coordonner la Métrologie française et de la représenter à l'étranger. Il a notamment la responsabilité de maintenir et développer les étalons nationaux en électricité et magnétisme. Le LNE est reconnu dans le domaine des mesures électriques en radiofréquence et micro-onde avec notamment la mise en place de la traçabilité aux unités du SI des mesures de paramètres  $S$  sur ligne coaxiale, sur guide d'ondes et sous pointes jusqu'à 170 GHz via des mesures dimensionnelles et électriques et des méthodes et moyens appropriés permettant le raccordement au SI des mesures réalisées par les industriels. Le LNE est parmi les LNM les plus avancés, notamment dans le domaine de la traçabilité des mesures de paramètres  $S$  sous pointes.

L'Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologies (IEMN), laboratoire d'accueil dans le cadre de la thèse de doctorat couvre un vaste domaine scientifique allant des nanosciences à l'instrumentation et centre ses activités sur les micros et nanotechnologies et leurs applications dans les domaines de l'information, la communication, les transports et la santé. Ses chercheurs ont à leur disposition des moyens expérimentaux exceptionnels, en particulier des centrales de technologie et de

caractérisation dont les possibilités et les performances se situent au meilleur niveau européen. L'IEMN fait partie du réseau des grandes centrales de technologie RENATECH.

## Objectif

Au LNE, des travaux ont été menés pour établir la traçabilité des mesures de paramètres  $S$  sous pointes en développant des étalons pour l'étalonnage du VNA et sa vérification ainsi que les méthodes associées, ces dernières dépendant de la nature même des étalons (composants à un accès ou à deux accès, composants résistifs, capacitifs ou inductifs, composants adaptés ou non adaptés...).

L'objectif de la thèse est d'aller au-delà des moyens et méthodes de traçabilité des mesures de paramètres  $S$  de circuits planaires déjà mis en place au LNE et dans les autres LNM [2-4], en mettant l'accent sur la réduction d'échelle et l'extension du domaine d'impédance, sur une large bande de fréquence, allant jusqu'à quelques centaines de GHz. En effet, cette réduction d'échelle entraîne typiquement des variabilités d'impédance dans des gammes éloignées de la valeur de  $50 \Omega$ , référence des mesures de paramètres  $S$  au VNA. Ces impédances sont dites extrêmes car les facteurs de réflexion correspondants sont proches de 1 en module, équivalents au circuit-ouvert ou au court-circuit et occupent le bord du cercle, lieu géométrique du facteur de réflexion. Par conséquent, le VNA devient insensible et imprécis aux variations d'impédance dans ce cas.

Etablir la traçabilité aux unités du SI nécessite d'abord la conception d'étalons traçables et le développement des méthodes associées qui permettent de transférer cette traçabilité aux dispositifs mesurés. Une caractéristique primordiale d'un composant étalon, intrinsèquement traçable, est qu'il soit facilement modélisable et que cette modélisation soit la plus exacte possible. Un composant étalon est ainsi généralement un composant passif simple tel qu'une ligne de transmission, un court-circuit, un circuit ouvert ou une charge adaptée, voire un composant discret tel qu'une inductance, une capacité ou une résistance, facile à caractériser par la détermination de ses paramètres dimensionnels et électriques et des propriétés mécaniques et électromagnétiques des matériaux le constituant [5-7].

En fonction de la nature des étalons, les méthodes associées, notamment pour l'étalonnage du VNA, permettent de transférer la traçabilité au dispositif mesuré. Cela nécessite de modéliser à la fois le système de mesure et le processus de mesure [8-9]. Dans le cas des mesures sous pointes, le système inclut le VNA et le système de positionnement des pointes. Par ailleurs, la possibilité d'ajouter un système interférométrique permettant de déplacer le repère d'impédance de  $50 \Omega$  vers quelques dizaines de  $k\Omega$ , ou encore quelques  $\Omega$ , respectivement pour les gammes d'impédances extrêmes, hautes ou basses, a son intérêt car cela modifie l'impédance de référence du VNA et le rend sensible dans ces gammes d'impédances [10-12]. Afin d'assurer la traçabilité des mesures, un travail d'analyse du système de mesure ainsi constitué doit être effectué en terme de modèle de mesure et d'évaluation et de correction des erreurs de mesure [13]-[14]. Si un système interférométrique est ajouté au VNA, l'ensemble VNA et interféromètre doit être pris en compte dans le modèle de mesure, et la méthode d'étalonnage ainsi développée peut être réalisée suivant deux ou trois étapes en tenant compte des étages incluant le VNA lui-même, l'interféromètre et les positionneurs.

Pour la définition et la conception des étalons, deux approches peuvent être considérées. En effet, les composants qui sont mesurés à ces échelles présentent des impédances très éloignées de la valeur  $50 \Omega$  nominale du VNA. Si on considère des lignes de transmission étalons (composants à deux accès) avec des dimensions transversales nanométriques, il est possible de maintenir une impédance caractéristique de l'ordre de grandeur de  $50 \Omega$ , avec des technologies telles que la ligne de transmission coplanaire ou la ligne micro-ruban à couche mince. Par contre, une fois étalonné, le VNA s'il doit être utilisé sans interféromètre sera insensible à des variations d'impédance dans des gammes de l'ordre de quelques dizaines de  $k\Omega$  par exemple. Une autre solution est de développer des charges étalons (composants à un accès) dont les valeurs sont différenciées dans les gammes d'impédance d'intérêt, c'est-à-dire autour de valeurs extrêmes, hautes ou basses. Mais dans ce cas, les sondes à pointes étant adaptées à la chaîne de mesure et donc à  $50 \Omega$ , il y aura une désadaptation importante au niveau du plan de mesure [15-16].

Il faut noter également que suivant l'espacement des pointes de mesure (probe pitch) utilisées, les étalons pourront être déportés du plan de mesure via des tronçons de réduction d'échelle (taper) et les méthodes d'étalonnage devront inclure le changement de plan de référence pour une mesure des nanodispositifs dans leurs plans d'accès (de-embedding), quelle que soit l'approche, à savoir pour des étalons à deux ou un accès. Mais dans tous les cas, la taille même des dispositifs à mesurer au final, fera de cette opération un des éléments clés de l'étalonnage car sensible au positionnement des sondes de mesure et au couplage induit par ces dernières avec le substrat. Il est donc primordial de maîtriser ces effets et de travailler à les réduire car le de-embedding sera d'autant plus performant que les paramètres à corriger seront réduits. Le développement à l'échelle nanométrique de composants traçables permettant d'étalonner le VNA dans les plans d'accès des nano-dispositifs sous test et pour le domaine d'impédances considérées (impédances extrêmes basses et hautes) doit s'appuyer sur des nano-positionneurs contrôlés avec une précision suffisante, à savoir des précisions nanométriques en translation sur X, Y et Z et une précision au microdegré sur la rotation [17]-[21].

Un point important de l'étude d'un point de vue métrologique reste l'établissement d'un bilan complet d'incertitudes et la vérification du système de mesure. Le bilan d'incertitude complet doit être établi pour garantir la chaîne ininterrompue de traçabilité aux unités du SI et la propagation de ces incertitudes depuis les étalons jusqu'aux nano-dispositifs sous test. L'opération de vérification quant à elle s'appuie sur des étalons de vérification, indépendants des étalons dédiés à l'étalonnage et de nature différente. Ces étalons de vérification sont traçables, en principe de manière indépendante par rapport aux étalons dédiés à l'étalonnage. L'objet de la vérification est alors de valider l'étalonnage du système de mesure tant du point de vue des valeurs attribuées aux coefficients d'étalonnage (termes d'erreur) que des mesures des nano-dispositifs sous test, et ceci au regard des incertitudes respectivement associées.

Pour résumer, la conception de deux jeux (ou kits) d'étalons, l'un pour l'étalonnage, l'autre pour la vérification et le développement des méthodes associées intégrant le modèle de mesure et un bilan d'incertitude complet constituera un cadre métrologique unique pour répondre à cette problématique de mesure traçable de paramètres  $S$  à l'échelle nanométrique pour les gammes d'impédance et de fréquence considérées.

Finalement, il restera à définir une méthode permettant de transférer la traçabilité aux systèmes de mesure utilisés dans l'industrie, une solution étant à trouver entre différentes approches, à savoir l'étalonnage des systèmes de mesure en utilisant les kits développés dans le cadre de la thèse, la fourniture de kits d'étalonnage et de vérification étalonnés, ou le transfert approprié de la méthodologie. Ce travail nous permettra ainsi d'aboutir à terme, à un résultat pleinement exploitable en termes de moyens d'étalonnage et de transfert aux industriels et aux laboratoires publics dans le domaine des technologies de l'information et de la communication.

## **Organisation des travaux de recherche**

Le travail de thèse débutera par une étude bibliographique approfondie des techniques permettant de réaliser au VNA des mesures à l'échelle nanométrique et pour le domaine d'impédances considérées ainsi que des contraintes liées à la montée en fréquence et aux sources d'erreur supplémentaires qui en résultent. L'étude bibliographique s'intéressera bien entendu à l'état de l'art sur le développement d'étalons à l'échelle nanométrique et les méthodes d'étalonnage associées.

Comme à l'échelle usuelle des circuits intégrés microélectroniques micro-ondes, les différentes approches pour l'étalonnage du VNA seront étudiées pour déterminer la nature des étalons et les méthodes associées les plus appropriées pour permettre l'étalonnage (correction des erreurs) du VNA de manière traçable, c'est-à-dire permettant de raccorder la mesure finale d'un nano-dispositif sous test

aux unités du SI et en y associant un bilan complet des incertitudes de mesure. Ces méthodes devront tenir compte de l'architecture même du système de mesure, qui pourra inclure un système interférométrique.

La nature des étalons dépendra des contraintes technologiques ainsi que du système de mesure, notamment les nano-positionneurs associés, et entraînera plusieurs itérations de conception, modélisation, micro-fabrication et caractérisation afin d'aboutir à une solution optimale en termes de performance de l'étalonnage (précision, fiabilité, traçabilité).

Enfin, des étalons de vérification, seront également conçus et développés avec pour but de valider l'étalonnage du VNA et des mesures des nano-dispositifs sous test compte tenu des incertitudes associées.

L'étape finale, sera le développement d'une méthode transfert aux systèmes de mesure industriels, leur permettant de réaliser des mesures comparables, traçables aux unités du SI.

Ainsi, le travail proposé dans cette thèse pourra se décliner en huit étapes :

1. Etude bibliographique sur les systèmes de mesure de paramètres S incluant les étalons et les méthodes associées, à l'échelle nanométrique, aux impédances extrêmes et aux fréquences millimétriques,
2. Définition et caractérisation du système de mesure sur la base de l'étude bibliographique et des équipements disponibles auprès des deux laboratoires partenaires,
3. Développement du kit d'étalonnage et de la méthode d'étalonnage associée avec modélisation traçable des étalons,
4. Développement du kit de vérification et de la méthode de vérification permettant de contrôler la fiabilité des mesures réalisées au regard des incertitudes établies,
5. Réalisation des mesures, étalonnage et vérification
6. Etablissement du bilan d'incertitudes
7. Développement d'une méthode de transfert aux systèmes de mesures industriels.
8. Rédaction de la thèse

Ces étapes pourront initialement être organisées selon l'échéancier ci-dessous et réadaptées suivant les résultats obtenus au cours de la thèse :

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M27	M28	M29	M30	M31	M32	M33	M34	M35	M36				
E1	Etude bibliographique																																							
E2				Système de mesure																																				
E3				Kit d'étalonnage et méthodes																																				
E4											Kit de vérification et méthodes																													
E5													Mesures, étalonnage, vérification																											
E6																		Bilan d'incertitudes																						
E7																											Transfert aux industriels													
E8																													Rédaction de la thèse											

## Bibliographie

- [1] T. D. Pham, D. Allal, F. Ziadé and E. Bergeault, "On-Wafer Coplanar Waveguide Standards for SParameter Measurements of Balanced Circuits Up to 40 GHz," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 6, pp. 2160-2167, June 2019.
- [2] U. Arz et al., "Traceable Coplanar Waveguide Calibrations on Fused Silica Substrates up to 110 GHz," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 6, pp. 2423-2432, June 2019.
- [3] F. Mubarak, V. Mascolo, G. Rietveld, M. Spirito, K. Daffe and K. Haddadi, "Parameterization Models for Traceable Characterization of Planar CPW SOL Calibration Standards," *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 2018, pp. 1-2.
- [4] Arz, U., et al. "Best practice guide for planar S-parameter measurements using vector network analysers." (2019).
- [5] J.A. Morán-Meza, A. Delvallée, D. Allal and F. Piquemal, "A substitution method for nanoscale capacitance calibration using scanning microwave microscopy", *2020 Meas. Sci. Technol.* 31 074009.
- [6] T. Le Quang, A. C. Gungor, D. Vasyukov, J. Hoffmann, J. Smajic, and M. Zeier, "Advanced calibration kit for scanning microwave microscope: Design, fabrication, and measurement", *Review of Scientific Instruments* 92, 023705 (2021).
- [7] J. Hoffmann, M. Wollensack, M. Zeier, J. Niegemann, H. Huber, and F. Kienberger, "A calibration algorithm for nearfield scanning microwave microscopes," in *2012 12th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE/NANO) (IEEE, 2012)*, pp. 1–4.
- [8] H. Votsi et al., "Development of a reference wafer for on-wafer testing of extreme impedance devices," *2016 88th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, 2016, pp. 1-4.
- [9] K. Daffé, G. Dambrine, C. Durand, C. Gaquière and K. Haddadi, "On-Wafer Series-Through Broadband Measurement of Sub-fF55-nm MOS RF Voltage-Tunable Capacitors," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 9, pp. 831-833, Sept. 2018.
- [10] H. Happy, K. Haddadi, D. Théron, T. Lasri, and G. Dambrine, "Measurement Techniques for RF Nanoelectronic Devices", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 1, pp. 30-39, Jan./Feb. 2014.
- [11] Haddadi, K., Okada, E., Daffé, K., Mubarak, F., Theron, D., & Dambrine, G. (2019, June). Multiport vector network analyzer configured in RF interferometric mode for reference impedance renormalization. In *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)* (pp. 1276-1278). IEEE.
- [12] Romano, R., Mubarak, F., Spirito, M., & Galatro, L. (2019, June). The HF-VNA, an interferometric approach for the accurate measurement of extreme impedances. In *2019 93rd ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG)* (pp. 1-6). IEEE.
- [13] Mubarak, F. A., Romano, R., Galatro, L., Mascolo, V., Rietveld, G., & Spirito, M. (2018). Noise behavior and implementation of interferometer-based broadband VNA. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 67(1), 249-260.
- [14] Horibe, M., & Hirano, I. (2017, November). Demonstrations of RF impedance matching techniques for near-field scanning microwave microscopy based on atomic force microscopy. In *2017 90th ARFTG Microwave Measurement Symposium (ARFTG)* (pp. 1-4). IEEE.
- [15] K. Daffé, G. Dambrine, F. von Kleist-Retzow and K. Haddadi, "RF wafer probing with improved contact repeatability using nanometer positioning," *2016 87th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, 2016, pp. 1-4.
- [16] K. Daffe et al., "Nano-probing station incorporating MEMS probes for 1D device RF on-wafer characterization," *2017 47th European Microwave Conference (EuMC)*, 2017, pp. 831-834.

- [17] Mokhtari, C., Sebbache, M., Avramovic, V., Boyaval, C., Dambrine, G., & Haddadi, K. (2021, August). Impact of GSG Probe to Pads Contact Repeatability for On-Wafer RF Measurements. In *2021 IEEE 7th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)* (pp. 241-246). IEEE.
- [18] Taleb, A., Pomorski, D., Boyaval, C., Arscott, S., Dambrine, G., & Haddadi, K. (2020). Control and Automation for Miniaturized Microwave GSG Nanoprobing. In *Machine Vision and Navigation* (pp. 751768). Springer, Cham.
- [19] von Kleist-Retzow, F. T. (2016). Automated calibration of RF on-wafer probing and evaluation of probe misalignment effects using a desktop micro-factory. *Journal of Computer and Communications*, 4(03), 61.
- [20] Sakamaki, R., & Horibe, M. (2020). Precision adjustment of probe-tilt angle with RF signal detection technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(10), 8500-8505.
- [21] Mubarak, F., Martino, C. D., Toskovic, R., Rietveld, G., & Spirito, M. (2020, August). Automated Contacting of On-Wafer Devices for RF Testing. In *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)* (pp. 1-2). IEEE.