

## PROJET PHARE

# MESURES ÉLECTRIQUES : LE NANOMONDE ACCÈDE À LA PRÉCISION MÉTROLOGIQUE

**Le LNE participe activement à la mise en place d'une infrastructure métrologique pour les mesures électriques à l'échelle du nanomètre. Coordinateur de deux projets finalisés en 2024, le laboratoire est désormais en mesure de proposer des prestations d'étalonnage à partir de son SMM et de son C-AFM.**

Les avancées dans les domaines de la microélectronique, de l'énergie ou encore des technologies quantiques impliquent des nouveaux matériaux dont il est impératif de maîtriser les propriétés, notamment électriques, à l'échelle du nanomètre. Si l'instrumentation de mesure à cette échelle existe dans l'industrie, l'infrastructure pour assurer la traçabilité des mesures reste encore largement à développer dans les laboratoires de métrologie. Le LNE y contribue depuis plusieurs années déjà. Et, l'année dernière, le projet MetroSMM de la métrologie française et le projet européen EMPIR/ELENA coordonné par le LNE sont parvenus à leur terme. Visant notamment à développer des étalons, à établir des protocoles de mesure, à évaluer les facteurs d'influence et les incertitudes de mesure, ils jettent les bases d'une métrologie adaptée aux mesures électriques réalisées aux plus petites échelles et confirment la place prépondérante du LNE dans ce domaine.

Les principaux instruments de caractérisation des propriétés électriques de matériaux à l'échelle nanométrique sont le microscope à sonde locale électrique micro-onde (SMM), pour accéder aux mesures de capacité, permittivité diélectrique, concentration de dopants, et le microscope à force atomique à pointe conductrice (C-AFM) pour les mesures locales en courant continu de la résistance et du courant.

Concernant les références de mesure de capacité, les métrologues du LNE ont en particulier travaillé à partir de kits d'étalonnage proposés par la société MC2-Technologies. Premier enjeu : les caractériser finement par des simulations, ainsi que l'environnement expérimental de mesure, afin de les utiliser pour étalonner leur SMM. Deuxièmement : fort de cet étalonnage, mettre au point les protocoles de mesure de capacité qui prennent en compte les capacités parasites inhérentes aux microstructures. Pour ce faire, les spécialistes ont développé une méthode de substitution. Comme l'explique François Piquemal, au LNE, « cette méthode permet de caractériser un échantillon inconnu en comparant les mesures aux mesures effectuées sur la structure de référence, dans le même environnement. ». En travaillant avec une première version du kit, les chercheurs ont montré qu'il était possible de mesurer une capacité avec une incertitude type de 3 % pour des valeurs comprises entre 0,3 fF et 10 fF. Par la suite, sur la base d'un cahier des charges établi par le LNE, le partenaire industriel a réalisé une nouvelle version de son kit. Résultat : une incertitude sous la barre des 2 % jusqu'à 40 fF quand la cible initiale fixée était de 10 % !

Dans un esprit similaire, au sein du projet ELENA, les chercheurs du LNE, en collaboration avec deux laboratoires du CNRS, le C2N et le GeePs, ont contribué au développement et à la caractérisation du



## Trois questions à...

### FRANÇOIS PIQUEMAL

#### Dans quel contexte sont nés les projets MetroSMM et ELENA ?

**F.P. :** Cela fait une vingtaine d'années qu'industriels et laboratoires académiques effectuent des mesures électriques à l'échelle nanométrique. Pour autant, celles-ci visaient essentiellement à qualifier les propriétés physiques, sans les quantifier, et les mesures n'étaient donc pas comparables entre elles, ni traçables au SI. Mais avec la multiplication des applications des nanomatériaux, le besoin a changé et la mise en place d'une métrologie adaptée à ces mesures est désormais indispensable.

#### Sur quoi s'appuie l'expertise du LNE pour les mesures électriques à l'échelle nanométrique ?

**F.P. :** Le LNE accompagne le développement des nanotechnologies depuis leur émergence. En témoigne la mise en place des plateformes CARMEN, MONA puis NAEL qui couvrent un large champ de propriétés des matériaux. Concernant les mesures électriques, nous avons acquis il y a une dizaine d'années un SMM dans un contexte d'expertise existante dans le domaine des mesures hyperfréquences et des champs proches, de plus en plus localisées. L'acquisition du C-AFM est le fruit de collaborations établies avec d'autres laboratoires, comme le GeePs.

#### Comment se situe le LNE pour les mesures électriques à l'échelle nanométrique, sur la scène mondiale ?

**B.F. :** Concernant les mesures de résistance et de courant réalisées avec un C-AFM, nous sommes à l'origine des premiers étalons et protocoles de référence. Et pour les mesures de capacité et de permittivité effectuées avec un SMM, c'est le LNE qui a établi le premier bilan d'incertitude complet. Ainsi, nous nous positionnons dans le peloton de tête des laboratoires nationaux de nanométrie électrique.

## PROJET PHARE

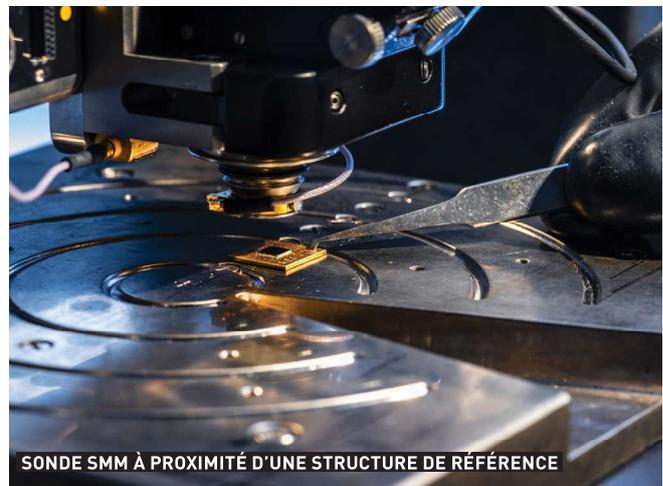


SMM POUR LA MESURE DES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DE NANOMATÉRIAUX

premier étalon pour les mesures électriques réalisées à l'échelle « nano » à l'aide d'un C-AFM.

La puce étalon comporte à la fois des références de résistance et de courant et permet des étalonnages avec une incertitude inférieure à 1 % pour les résistances de 1 k $\Omega$  à 1 T $\Omega$ , et de l'ordre de 1 % pour les courants compris entre 100 fA et 1  $\mu$ A.

À l'issue de ces deux projets, les métrologues du LNE ont déjà commencé à explorer des pistes d'amélioration dans le cadre du projet MetroSMM-2, piloté par José Moran, chef de ce nouveau projet. « L'objectif est d'une part de réduire encore les incertitudes de mesure de capacité, d'autre part de simplifier le processus de mesure », décrit François Piquemal. Pour ce faire, il s'agira de minimiser l'impact des capacités parasites en poursuivant le développement de pointes de mesure blindées, en collaboration avec l'université de Glasgow et l'université de Lille. À la clé : s'affranchir de la méthode de substitution pour la mesure absolue de capacité. Une autre méthode dite « courbe approche retrait » devrait par ailleurs permettre l'étalonnage pour les mesures de capacité inférieure à 400 aF.



SONDE SMM À PROXIMITÉ D'UNE STRUCTURE DE RÉFÉRENCE

En attendant, les développements réalisés donnent d'ores et déjà la possibilité au LNE d'étalonner des références pour les mesures de résistance et de courant par C-AFM et de capacité et de constante diélectrique par SMM. De plus, dans le cadre du projet ELENA, les scientifiques du LNE ont contribué à la rédaction de deux documents normatifs soumis au comité technique TC-113 de l'IEC. Associés à des guides de bonne pratique pour SMM et C-AFM, ces documents devraient être publiés à la fin de l'année et serviront de point d'appui pour le déploiement des nanotechnologies dans l'industrie.

### CHIFFRES CLÉS

À l'échelle du nanomètre, le LNE peut désormais mesurer une capacité électrique avec une incertitude inférieure à 2 % entre 0,3 fF et 40 fF. L'incertitude de mesure de résistance et de courant électriques est de l'ordre du pour cent respectivement entre 1 k $\Omega$  et 1 T $\Omega$  et entre 100 fA et 1  $\mu$ A.