

Électricité – Magnétisme

Électricité – Magnétisme

1. Introduction

Le LNE-CMSI est le laboratoire national de métrologie désigné dans le cadre de la métrologie française pour réaliser les activités Électricité – Magnétisme. Début 2006 les activités de la Division Métrologie Électrique Appliquée ont été transférées de Fontenay-aux-Roses dans les locaux du bâtiment Maxwell à Trappes.

2. Métrologie électrique quantique

2.1. Étalons de tensions continue et alternative à partir de l'effet Josephson

Des modifications diverses (circuit de mesure...) ont été entreprises sur le banc de raccordement des références de tension à diode Zener 1,018 V et 10 V à l'étalon primaire (réseau de jonctions Josephson). Cela a conduit à mettre en place une nouvelle procédure semi-automatique, dans laquelle les inversions de tension des diodes Zener et du réseau de jonctions Josephson se font manuellement. Ainsi cette procédure permet maintenant de sélectionner rapidement et systématiquement les marches de Shapiro les plus proches de la tension à étalonner, ce qui réduit les incertitudes dues au gain du détecteur.

Au vu des résultats obtenus dans la génération de tension alternative au moyen de réseaux de jonctions Josephson programmables, le LNE s'est engagé dans le projet Euromet n° 848 « *Binary Josephson Array Power Standard* » dont les objectifs sont de développer d'une part un étalon quantique de tension alternative, et d'autre part un étalon quantique de puissance. En remplaçant les sources de courant de la source de polarisation du NPL par des modules plus performants (en résolution et en temps de montée), les écarts relatifs AC/DC obtenus à partir d'une sinusoïde d'amplitude, générée sur 12 bits, pour 32 échantillons par périodes et pour les fréquences 62,5 Hz, 200 Hz et 625 Hz sont respectivement $0,8 \cdot 10^{-6}$, $7 \cdot 10^{-6}$ et $18 \cdot 10^{-6}$.

Le développement du banc d'étalonnage Josephson programmable pour la DMEA s'est poursuivi. A terme il permettra l'étalonnage entièrement automatique des références de tension secondaires et des voltmètres numériques avec une meilleure incertitude. Ainsi, une source de polarisation programmable pilotée par ordinateur sous LabVIEW a été réalisée (fig. 1). Elle

permettra de polariser individuellement chacun des segments du réseau de jonctions Josephson programmables. Chacune des quatorze sources de courant la constituant peut délivrer un courant de ± 10 mA avec une résolution de 150 nA et un bruit inférieur à 15 nA.

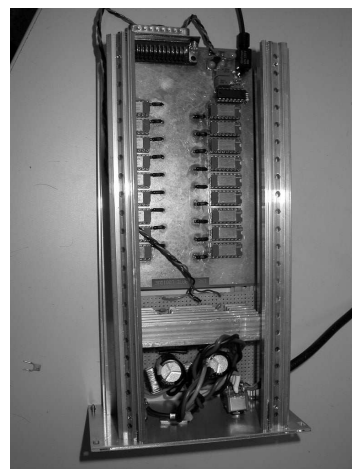


Fig. 1. – Source de polarisation programmable.

2.2. Conservation de l'ohm par effet Hall quantique

Le projet Euromet n° 856 piloté par le LNE et auquel participe plusieurs LNM s'est poursuivi. Son objectif est de valider les QHARS par échange de ces derniers entre les différents organismes participants qui en évaluent notamment leur exactitude. Les résultats obtenus montrent une exactitude relative à $3 \cdot 10^{-9}$ près et leur grand intérêt métrologique notamment pour tester les ponts de comparaison de résistance.

2.3. Étalon quantique de courant

Dans un premier temps, la caractérisation des pompes à électrons de type R fournies par la PTB s'est poursuivie. Des marches de courant ont été obtenues pour une gamme de fréquences de pompage comprise entre 10 MHz et 100 MHz comme le montre la figure 2. Ainsi le courant varie, dans cette gamme de fréquence, entre 1,6 pA et 16 pA.

En outre, ces mesures de courant quantifié sur des temps longs montrent que dans la gamme de fréquences 10 MHz - 100 MHz, la vitesse de pompage ne génère pas de bruit supplémentaire de la part de la pompe. Cela

signifie qu'il n'y a pas de modification du niveau de bruit blanc qui est d'environ $15 \text{ fA/Hz}^{1/2}$. Ainsi, aujourd'hui un courant de 16 pA stable sur 7 heures est obtenu à une fréquence de 100 MHz et permet d'atteindre une incertitude relative de type A de $3,9 \cdot 10^{-6}$.

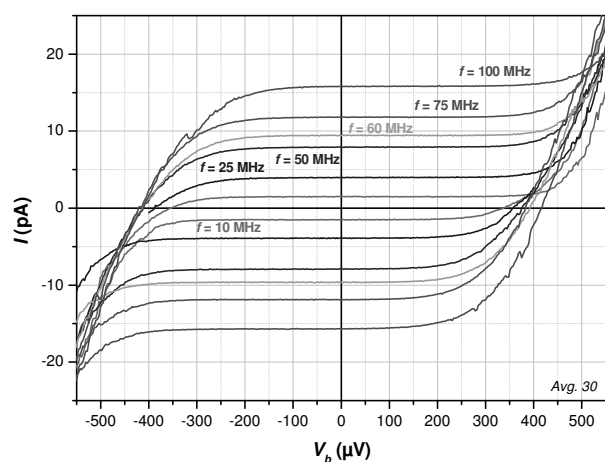


Fig. 2. – Marches de courant pour des fréquences de 10 MHz à 100 MHz obtenues sur une pompe à électrons de type R fournie par la PTB.

Les tests réalisés sur les pompes à électrons développées au travers de la collaboration avec le LPN (fig. 3) ont montré que bien qu'il reste encore à optimiser leurs performances pour atteindre puis surpasser les dispositifs de la PTB, elles sont dès à présent opérationnelles.

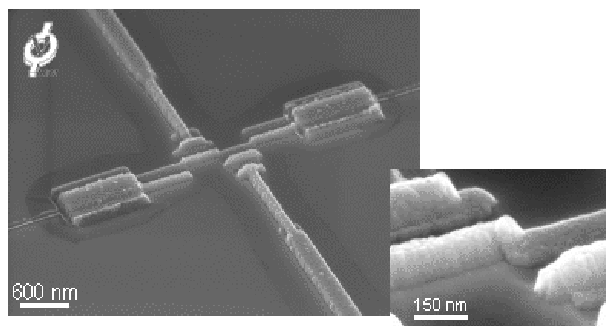


Fig. 3. – image MEB d'une pompe LNE-LPN avec résistances en chrome.

Enfin, deux comparateurs cryogéniques de courants continus (4C) de rapport 20 000 ont été réalisés. L'un est destiné à équiper le réfrigérateur à dilution Cryoconcept® de l'expérience du triangle métrologique, et l'autre servira de 4C de secours pour le réfrigérateur à dilution Oxford®.

3. Métrologie électrique basses fréquences

3.1. Étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard et ponts associés

L'étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard permet au moyen de toute une chaîne de mesure de déterminer directement la constante de von Klitzing R_K .

Afin de pouvoir la déterminer avec une incertitude relative cible de l'ordre de $1 \cdot 10^{-8}$, le projet d'amélioration de cet étalon a débuté en 2006. Ainsi, une machine permettant de mesurer les défauts de cylindricité des électrodes avec une incertitude de 30 nm (1σ) a été réceptionnée au LNE (fig. 4).

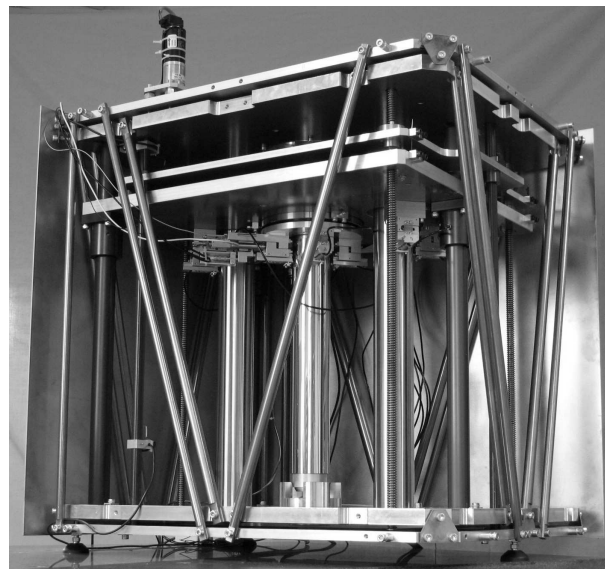


Fig. 4. – Machine à mesurer les électrodes.

Par ailleurs, le choix du matériau pour la réalisation des nouvelles électrodes s'est porté sur un acier inoxydable laminé à chaud écrouité hypereffort nuancé 1,4539 qui présente les qualités de dureté, de stabilité dimensionnelle et d'amagnétisme nécessaires. Une fois ces électrodes usinées, elles subiront différents protocoles de traitement pour parvenir à un défaut de cylindricité de l'ordre de $\pm 1 \mu\text{m}$. En outre, il a été montré qu'une autre des principales limitations à l'obtention de l'incertitude voulue sur R_K est le déplacement de l'extrémité d'écran (*spike*) dans l'espace inter-électrode. Compte tenu des limitations de l'architecture horizontale, employée jusqu'à aujourd'hui, qui pénalisent le bilan d'incertitude, la réalisation d'un nouvel étalon de Thompson-Lampard en position verticale a été lancée.

Enfin, les différents ponts de comparaison (ponts à deux et quatre paires de bornes et pont fréquentimétrique à quatre paires de bornes) servant dans la chaîne de mesure de R_K ont été remis en service. Différents transformateurs ont été étalonnés.

3.2. Étalon calculable de résistance

Les résistances calculables sont un maillon de la chaîne de mesure dédiée à la détermination de R_K . La réalisation d'étalons de résistances à couches minces s'est poursuivie dans le cadre de la collaboration avec le LERMPS. Les couches de NiCr déposées par pulvérisation cathodique magnétron sur des substrats cylindriques de céramique ont été caractérisées par MEB et analysées par EDS. Cela a montré que ces couches résistives se déposent de façon relativement homogène,

que la répartition du NiCr est uniforme et qu'elles ne présentent pas d'éléments étrangers. La figure 5 montre les images obtenues par MEB sur les dépôts réalisés d'une part par la société Geka et d'autre part par le LERMPS.

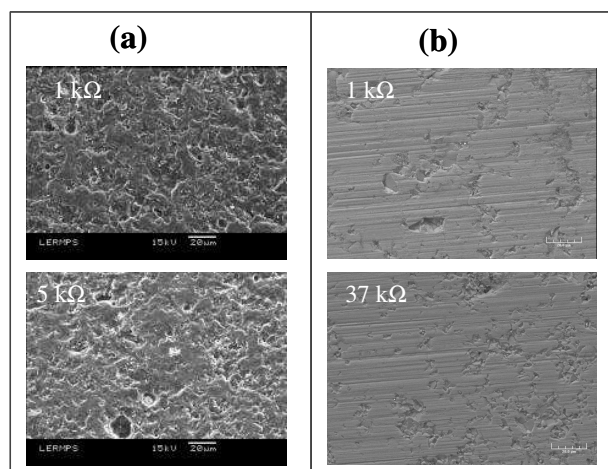


Fig. 5. – Images MEB des surfaces des couches résistives : (a) films Geka ; (b) films LERMPS.

Néanmoins, pour diminuer la vitesse du dépôt qui empêche d'ajuster finement la valeur des bâtonnets résistants obtenus, un nouveau générateur a été installé dans le bâti de pulvérisation.

Les bâtonnets résistants obtenus présentent une dérive très importante ($5 \cdot 10^{-4} / j$ pour une résistance de 1 kΩ) rédhibitoire pour l'application métrologique visée. Pour palier à ce problème, une procédure de traitement thermique des bâtonnets a été mise au point. En dépit du fait que le four ne pouvait atteindre la température du protocole, les premiers résultats ont tout de même montré une diminution de la dérive d'un facteur 50 qui toutefois s'avère insuffisante. Enfin, une thèse de doctorat CIFRE en collaboration avec le LERMPS a débuté. Elle a pour objectif la mise au point de ces couches pour la réalisation des résistances calculables.

Les systèmes d'injection des ponts d'impédance, utilisés pour la comparaison des résistances en courant alternatif, ont été étalonnés. Par ailleurs, la caractérisation des résistances de 10 kΩ, 20 kΩ et 40 kΩ a montré de fortes variations en fréquences incompatibles avec les incertitudes cibles pour la détermination de R_K . Des travaux vont être entrepris pendant l'exercice 2007 pour remédier à ces variations.

3.3. Transposition alternatif-continu

Les étalons de transposition alternatif-continu dans le domaine des tensions bas niveau ont été caractérisés. Ainsi leurs corrections ont été déterminées au moyen d'une procédure de *step-down* en partant du convertisseur multijonction en couches minces de tension nominale 1 V étalonné directement par rapport à une référence primaire. Cette procédure a couvert le domaine de tension de 0,5 V à 10 mV pour des fréquences de 10 Hz à 100 kHz. Des mesures de recouplement ont été réalisées et ont montré la

bonne cohérence des résultats obtenus. Les possibilités d'étalonnage du LNE dans le domaine de la transposition AC/DC sont aujourd'hui équivalentes à celles des autres LNM.

3.4. Étalon de puissance aux fréquences industrielles

En 2006, un nouveau transformateur d'isolement (fig. 6) a été réalisé en remplacement de l'ancien qui au-delà de 240 V introduisait un taux de distorsion harmonique supérieure à 0,1 % et ne garantissait donc plus l'expression de la puissance active en régime sinusoïdal.

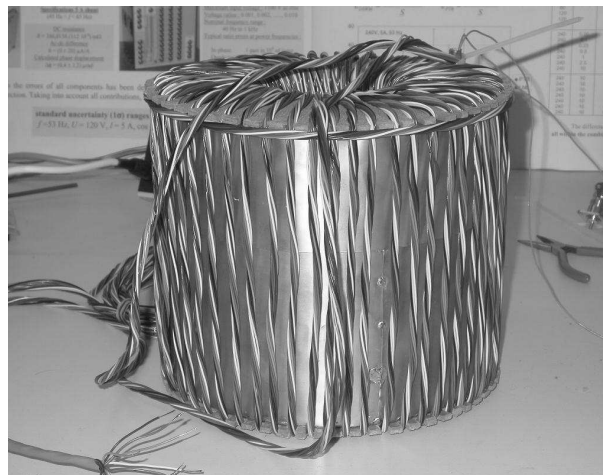


Fig. 6. – Enroulement secondaire du nouveau transformateur d'isolement.

Dès lors, le nouvel étalon de puissance est rentré cette année dans sa phase opérationnelle. Il permet de mesurer les puissances actives à 53 Hz, pour des signaux sinusoïdaux ou présentant un faible taux de distorsion harmonique ($< 0,1 \%$), avec une incertitude-type relative (par rapport à la puissance apparente) inférieure à $13 \mu\text{W}/\text{VA}$, pour des tensions et des courants compris respectivement entre 60 V et 480 V et 0,1 A et 10 A et quel que soit le facteur de puissance.

3.5. Banc de mesure de déphasage

Le nouveau banc de mesure de déphasage en courant alternatif sinusoïdal (20 Hz à 20 kHz) fondé sur des techniques d'échantillonnage et de traitement numérique des signaux a été finalisé. Il permet de raccorder des résistances (du milli-ohm à quelques méga-ohms) en courant alternatif, mais aussi des capacités (du millifarad à quelques farads), des inductances...

3.6. Banc de mesure des très faibles courants et des résistances de hautes valeurs en courant continu

Le banc d'intégration de courant permettant l'étalonnage des très faibles courants (de 1 fA à 100 pA) et des résistances de hautes valeurs (supérieures à 10 GΩ) a été finalisé en 2006. Il repose sur un montage à amplificateur opérationnel qui permet de mesurer la variation linéaire de la tension aux bornes d'une capacité à

air lorsque celle-ci est chargée par un courant continu. Des incertitudes relatives comprises entre $1,7 \cdot 10^{-5}$ et $2,0 \cdot 10^{-5}$ ont été obtenues pour des mesures de courant entre 100 pA et 1 fA. Les résultats de la participation à la comparaison internationale Euromet.EM-S24 viendront valider ces résultats.

4. Métrologie électrique haute fréquence

4.1. Mesure de puissance HF

En 2006, le wattmètre développé en technologie micro-ruban a été étalonné au moyen du microcalorimètre. L'efficacité du wattmètre, qui exprime sa capacité à dissiper la puissance HF dans son élément sensible, a pu être alors comparée aux résultats de simulations. Cette comparaison a montré un bon accord avec un écart maximum de 10 % jusqu'à 2 GHz. Cet écart peut être attribué d'une part à la différence de connecteurs employés sur le wattmètre et sur le microcalorimètre, et d'autre part, à la nouvelle forme de masse thermique de ce wattmètre. Par ailleurs, pour permettre d'étendre la gamme de fréquence, limitée en technologie micro-ruban, les premières maquettes de wattmètres en technologie coplanaire ont été réalisées comme le montre la figure 7.

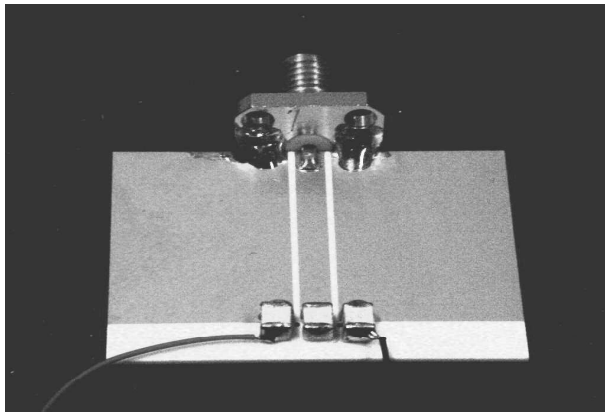


Fig. 7. – Wattmètre en technologie coplanaire.

Elles permettent de couvrir les fréquences jusqu'à 10 GHz avec un facteur de réflexion inférieur à -12 dB comme le montre la figure 8.

En outre, les dimensions ont été choisies pour assurer une impédance d'entrée de 50Ω sur une large gamme de fréquences et les différents éléments constituant ce wattmètre ont été mesurés et modélisés par les kits de calibrage spécialement réalisés en technologie coplanaire.

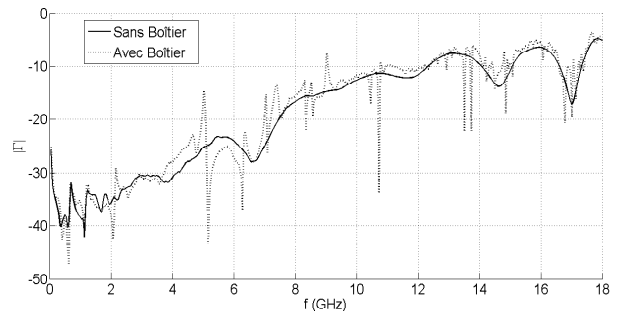


Fig. 8. – Facteur de réflexion du wattmètre coplanaire.

4.2. Paramètres de dispersion S

Une thèse a débuté début 2006 en collaboration avec l'ENST dans le cadre d'un contrat CIFRE. Elle a pour thème la définition et la réalisation d'étalons d'impédance pour la mesure sous pointes de paramètres de dispersion S. Ainsi, les premiers travaux essentiellement bibliographiques ont porté sur l'évaluation des différentes méthodes de calibrage pour assurer la traçabilité des mesures de paramètres S sous pointes sur les structures de propagation coplanaire. La méthode choisie pour réaliser ces mesures repose sur un affaiblisseur résistif adapté couplée à une méthode TRL. De plus, un algorithme a été développé pour permettre la mise en œuvre d'un calibrage TRL ou TRA à partir des composants coaxiaux. Enfin, l'emploi du logiciel Microwave studio® permettant de simuler efficacement les paramètres S d'une structure va permettre de concevoir différentes structures de calibrage.