

# Électricité – Magnétisme

## *Electricity – Magnetism*

### 1. Introduction

Jusqu'à mi-2007, les activités du domaine Électricité-Magnétisme étaient partagées entre la division métrologie fondamentale DMF et la division métrologie électrique appliquée DMEA du LNE-CMSI. La première avait pour rôle la mise en œuvre des unités électriques du SI et différentes grandeurs dans différentes gammes de fréquences couvrant aussi bien les basses que les hautes fréquences. La seconde avait pour vocation l'étude et le développement des moyens de transfert et d'étalonnage pour le raccordement des laboratoires et des industriels.

Aujourd'hui, les activités non liées à la définition du SI ont été transférées à la DMEA pour former la division métrologie électrique DME. Celles couvrant la définition du SI ont été regroupées dans un pôle de recherche amont à côté de la balance du watt et de la nanométrie.

### 2. Pôle de recherche

#### 2.1. Conservation de l'ohm par effet Hall quantique et pont de comparaison de résistances

Les travaux sur les tests d'universalité de l'effet Hall quantique, s'appuyant sur la comparaison de quatre résistances de Hall connectées en pont de Wheatstone, et visant à montrer le caractère universel de cet effet, se sont poursuivis. Ainsi, quatre résistances de Hall élaborées dans un gaz électronique à deux dimensions réalisé dans une hétérostructure en GaAs/AlGaAs ont été comparées sur le plateau de quantification  $i = 2$  et ont montré un écart relatif de la valeur de la résistance de Hall de  $1,40 \cdot 10^{-11}$  avec une incertitude relative de  $3,21 \cdot 10^{-11}$ . Suite à cet excellent résultat, la prochaine étape est de comparer des résistances réalisées dans des structures de nature différente.

Parallèlement, la réalisation du pont de comparaison de résistances permettant d'étalonner les résistances étalons dédiées au raccordement des résistances clients a continué avec l'ajustage et l'étalonnage du diviseur de courant étalon mais aussi avec un travail préparatoire à la réalisation de la double source de courant du pont.

#### 2.2. Étalon quantique de courant et expérience du triangle métrologique

Les résultats obtenus précédemment sur l'étude des caractéristiques des pompes à électrons de type R et sur la

stabilité du courant qu'elles génèrent l'ont été en mode de fonctionnement en contre réaction interne. Dans le cadre de l'expérience du triangle métrologique, le passage dans le mode de contre réaction externe, indispensable à l'analyse de la quantification du courant électrique produit, a été initié. La mise en place de l'expérience du triangle métrologique mettant en jeu l'effet Hall quantique, l'effet Josephson et l'effet tunnel mono-électronique a permis de réaliser les premières mesures. Elles consistent à déterminer la différence entre la tension générée par le réseau de jonctions Josephson et celle liée au courant amplifié issu de la pompe à électrons de type R traversant une résistance de  $10 \text{ k}\Omega$  étalonnée. Les résultats montrent des niveaux d'incertitude compris entre  $4 \cdot 10^{-6}$  et  $7 \cdot 10^{-6}$ .

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

La synthèse de tensions alternatives (de quelques hertz à quelques kilohertz) au moyen de jonctions Josephson consiste à réaliser la sommation de la tension délivrée par chaque segment (où les jonctions Josephson sont réparties en séquençage binaire), constituant le réseau de jonctions Josephson programmables (RJJP). Ceci est obtenu en soumettant chaque segment à un rayonnement hyperfréquence et en les polarisant individuellement sur une marche de tension donnée en appliquant un courant fourni par des sources rapides pilotées par ordinateur.

En 2007, une nouvelle interface de commande de la source de polarisation et d'acquisition de la caractéristique courant-tension des différents segments a été réalisée sous LabVIEW. Ensuite, l'erreur sur la valeur efficace calculée (obtenue à partir du nombre d'échantillons, de la durée d'un échantillon, de la tension sur chaque pallier) introduite par le temps de commutation de la source de polarisation a été modélisée. Pour un temps de montée linéaire, les résultats semblent suggérer que cette erreur est proportionnelle à ce temps de montée.

De plus, en raison de la comparaison entre la référence de tension Josephson  $10 \text{ V}$  du LNE et celle du BIPM, le système de mesure (le banc d'étalonnage des références secondaires dans lequel elles sont remplacées par la référence Josephson du BIPM) a été optimisé. Cette comparaison a conduit à une différence relative de tension de  $7,2 \cdot 10^{-12}$  avec une incertitude relative de  $8,3 \cdot 10^{-12}$ .

Le banc d'étalonnage Josephson programmable 1 V, a été monté et automatisé (canne cryogénique, synthétiseur hyperfréquence, réseau Josephson de type SINIS, programme de pilotage de la source de polarisation). Ce banc, destinée à la DME, vise à transférer la technologie des étalonnages de tensions continues à partir de réseaux de jonctions Josephson pour étalonner de manière automatique et avec de meilleures incertitudes les références secondaires de tension continue et les voltmètres numériques.

#### 2.4. Étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard et ponts associés

La détermination directe de la constante de von Klitzing,  $R_K$ , passe par la mise en œuvre de l'étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard et de toute une chaîne de mesure. Devant l'impossibilité d'assurer la détermination de  $R_K$  avec une incertitude relative cible de l'ordre de  $1 \cdot 10^{-8}$  au moyen d'un étalon de capacité en position horizontale, la conception de ce dernier en position verticale a été lancée. Alors que cette conception est en cours, un nouveau jeu de huit électrodes à été usiné puis rectifié pour atteindre à ce stade un défaut de cylindricité de l'ordre de  $\pm 1 \mu\text{m}$ . En outre, la machine permettant de mesurer ces défauts a été optimisée afin de garantir d'une part que le plateau métrologique ne se déforme pas au cours de son déplacement indispensable à la mesure, et d'autre part que la position des capteurs capacitifs face au cylindre mesuré soit correcte. Aujourd'hui, cette machine peut mesurer les défauts géométriques des électrodes avec une incertitude de 25 nm.

Préalablement à la validation de la chaîne de mesure indispensable à la détermination de  $R_K$ , les deux ponts de comparaisons à deux et quatre paires de bornes sont devenus opérationnels. Le premier permet de comparer la variation de capacité de l'étalon de Thompson-Lampard à une capacité de 1 pF, 10 pF et 100 pF. Le second permet d'étalonner les capacités de 100 pF, 1 000 pF puis 10 000 pF.



Fig. 1. – Nouvelle résistance calculable de Haddad.

De plus, à la suite de l'observation de fortes variations en fréquence (de quelques  $10^{-7}$  à court terme) des résistances de transfert de 10 k $\Omega$ , 20 k $\Omega$  et 40 k $\Omega$

employées dans le pont de quadrature, des tests ont été réalisés pour en déterminer l'origine. Ils ont montré que ces variations augmentent avec la valeur des résistances et avec l'encapsulation. Ainsi, en partant dans ce constat de nouvelles résistances ont été produites. Elles sont constituées de plusieurs résistances de valeurs faibles placées en série et qui ne sont pas encapsulées. Enfin, afin de réduire l'incertitude sur la mesure de la variation en fréquence de ces résistances, une nouvelle résistance calculable de Haddad (fig.1) proche de sa valeur nominale ( $5 \cdot 10^{-5}$  contre  $2 \cdot 10^{-4}$  avec la précédente) a été produite en réalisant une soudure fine et précise par la technique de soudage par décharge de condensateur.

### 3. DME : métrologie électrique basses fréquences

#### 3.1. Étalon de puissance aux fréquences industrielles

En 2007, les possibilités de mesure de puissance active au moyen de l'étalon de puissance électrique en régime alternatif sinusoïdal à 50 Hz ou présentant, au plus, un taux de distorsion harmonique de 0,1 % ont été étendues pour pouvoir répondre aux besoins d'étalonnage. En effet, aujourd'hui cet étalon couvre des tensions jusqu'à 1 000 V et des courants jusqu'à 100 A respectivement au moyen d'un nouveau transformateur d'isolement et d'un nouveau *shunt* fabriqué et étalonné par l'institut SP (Suède).

Par ailleurs, le LNE a participé à la comparaison internationale EUROMET/CCEM-K5 dont l'objectif était de comparer les mesures de puissance active en régime alternatif sinusoïdal à 50 Hz pour une tension de 120 V, un courant de 5 A et différents facteurs de puissance. Dans ces conditions, l'incertitude sur cette mesure rapportée à la puissance apparente est inférieure à 13  $\mu\text{W}/\text{VA}$ .

Enfin, l'étude bibliographique des perturbations à l'origine de la déformation du régime sinusoïdal pouvant engendrer un arrêt de l'outil de production, a montré que les principales causes sont la présence d'harmoniques et les fluctuations rapides de tension (*flicker*). La caractérisation de ces perturbations est donc indispensable pour assurer la qualité de l'énergie électrique fournie aux industriels.

#### 3.2. Résistances calculables

Le développement de résistances calculables (résistances dont le comportement en fréquence est calculable avec un haut niveau de précision) coaxiales constituées de substrats cylindriques de céramique d'oxyde d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sur lesquels ont été déposés des films métalliques (Nichrome et Evanohm<sup>®</sup>) de quelques nanomètres d'épaisseur s'est poursuivi. Le LERMPS a développé un nouveau porte échantillon rotatif (fig. 2) permettant la fabrication simultanée, par pulvérisation cathodique magnétron, de six bâtonnets résistifs dont l'épaisseur du dépôt est contrôlée *in-situ* avec une balance à quartz.

Un contrôle supplémentaire de l'homogénéité morphologique et de l'épaisseur du dépôt a été réalisé au

moyen d'un AFM. De plus, l'homogénéité en composition chimique du dépôt et la présence d'impuretés ont été étudiés par spectrométrie des électrons Auger. Ces analyses ont montré la qualité des dépôts réalisés.

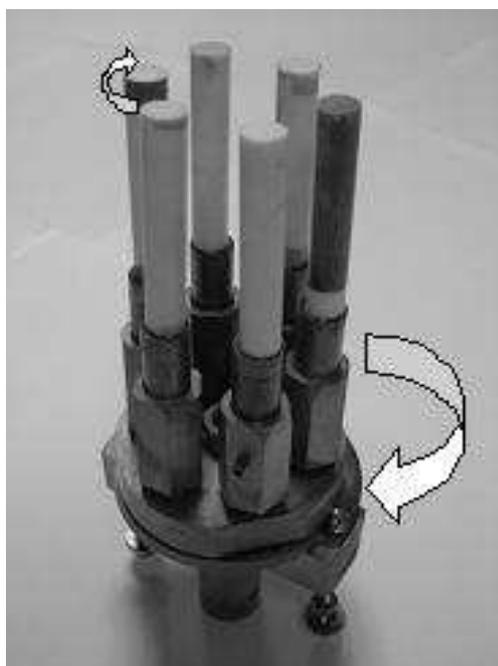


Fig. 2. – Porte-substrat rotatif pour la réalisation de bâtonnets.

Ainsi, des bâtonnets présentant des valeurs de résistances jusqu'à 100 k $\Omega$  pour le nichrome et jusqu'à 200 k $\Omega$  pour l'Evanohm<sup>®</sup> ont été produits. Toutefois, ces bâtonnets présentent une dérive très importante (de quelques 10<sup>-3</sup>/jour à quelques 10<sup>-4</sup>/jour) rédhibitoire pour l'application métrologique visée. Afin de réduire cette dérive à un niveau de stabilité acceptable (10<sup>-8</sup>/jour) et pour disposer de coefficients thermiques faibles assurant une bonne stabilité thermique (meilleure que 10<sup>-6</sup>/°C) autour de la température de fonctionnement, un recuit en atmosphère oxydante est employé. Aujourd'hui, la procédure de traitement employée permet d'obtenir une stabilité de 10<sup>-5</sup>/jour, ce qui au regard des attentes s'avère insatisfaisante. Afin d'y remédier la procédure doit être affinée.

Enfin, une comparaison du comportement en fréquence de différentes technologies de résistances calculables (bifilaires de 1 k $\Omega$  et 10 k $\Omega$  du MIKES, coaxiale filaire de Haddad de 1 k $\Omega$ , coaxiale à couche mince de 1 k $\Omega$ ) a été réalisée à 400 Hz et 1 600 Hz pour vérifier le calcul du comportement en fréquence. Elle montre un comportement en fréquence très similaire entre ces différentes technologies d'où un très bon recoupement entre calcul et mesure.

### 3.3. Référence de tension à partir de MEMS

Ce projet débuté en 2007 vise la mise au point de solutions de type structure micro-électromécanique en métrologie électrique. L'objectif premier est la réalisation

d'une référence de tension alternative, de quelques volts à 200 V pour des fréquences de 100 kHz à 100 MHz, au moyen d'un MEMS très stable (mieux que 1 ppm/an). Cette référence est définie par le phénomène de *pull-in* qui correspond à la position au-delà de laquelle l'électrode mobile, suspendue par un ressort, va inévitablement entrer en contact avec l'électrode fixe sous l'effet de la force électrostatique.

Tout d'abord, deux bancs de mesure de la caractéristique capacité-tension et de la tension de *pull-in* ont été montés et automatisés au moyen de LabVIEW, puis testés et validés en employant des accéléromètres et des micro-miroirs en technologie microsysteme.

Ensuite, en raison des instabilités de la tension de *pull-in* (d'origine mécanique et électrique) liées à la technologie de fabrication employée, deux filières technologiques (membranes silicium à partir du micro-usinage de surface d'un *wafer* SOI et membranes métalliques) ont été abordées. La première a conduit à concevoir et à réaliser trois structures distinctes de MEMS disposant d'une membrane circulaire suspendue par des ressorts dont les dimensions et le positionnement sont différents entre les trois conceptions comme le montre la figure 3. La seconde a conduit à mettre au point des MEMS à membranes métalliques sous formes de ponts suspendus et de poutres.



Fig. 3. – Conception des trois structures MEMS à base de membrane silicium à partir d'un *wafer* SOI.

### 3.4. Banc de mesure de déphasage

Le nouveau banc de mesure de déphasage en remplacement de l'ancien banc GSD est aujourd'hui opérationnel. Il permet de mesurer des déphasages entre tensions alternatives sinusoïdales de 10 mV à 1 000 V pour des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz. Le principe de ce banc est fondé sur l'échantillonnage des signaux (référence et déphasé) puis leur traitement numérique par approximation des moindres carrées. Les incertitudes de mesure vont du millidegré pour les fréquences les plus faibles à plusieurs dizaines de millidegrés au voisinage de 20 kHz.

### 3.5. Caractérisation et étalonnage de résistances en basse fréquence

Le banc de mesure de déphasage décrit ci-dessus permet également de comparer des résistances de quelques milli-ohms à quelques mégohms en régime alternatif sinusoïdal. Afin de répondre à certaines applications (étalonnage de résistances commerciales en courant alternatif, mesures traçables d'intensité en courant alternatif...), ces comparaisons nécessitent de disposer d'un jeu de résistances étalons dans la gamme de

fréquences 100 Hz – 20 kHz dont le comportement en fréquence est connu. Le raccordement de ces résistances étalons est réalisé au moyen d'un pont à quatre bornes pour les résistances dont la valeur nominale est inférieure à 500  $\Omega$  et d'un pont à trois bornes pour les valeurs de résistances supérieures.

En 2007, dès que le pont à trois bornes a été remonté, les résistances du jeu ont été étalonnées. Une très légère évolution des caractéristiques des résistances en régime alternatif sinusoïdal a été observée entre les mesures réalisées aujourd'hui et celles datant de 1983. Si cette observation est réitérée lors de l'étalonnage des autres résistances du jeu, la durée entre deux étalonnages sera augmentée.

#### 4. DME : métrologie électrique hautes fréquences

##### 4.1. Étalon de puissance haute fréquence à efficacité calculable

Ce projet terminé en 2007 avait pour objectif de réaliser un étalon de puissance HF dont l'efficacité est calculable. Pour cela, l'emploi d'une thermistance au travers de la méthode bolométrique a été privilégié au détriment d'autres technologies comme celle de la sonde à thermocouple.

Deux types de wattmètres ont été réalisés en technologie planaire. Le premier couvre les fréquences du continu à 10 GHz et le second couvre les fréquences jusqu'à 18 GHz. La modélisation du premier type de wattmètre a été affinée en tenant compte de différentes sources de perte de puissance en transmission et en réflexion. La confrontation du calcul de l'efficacité et le résultat de la mesure de cette dernière au moyen du microcalorimètre montre un bon accord comme le montre la figure 4.

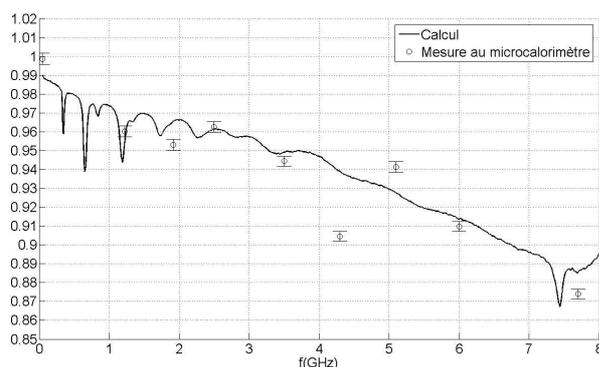


Fig. 4. – Comparaison entre le calcul et la mesure de l'efficacité du wattmètre (DC à 10 GHz).

Par ailleurs, un nouveau programme de pilotage des bancs d'étalonnage a été mis au point pour permettre aujourd'hui de réduire de 30 % en moyenne la durée d'un étalonnage sur un domaine fréquentiel très large.

##### 4.2. Raccordement des wattmètres sur ligne coaxiale 2,4 mm

Aujourd'hui, outre le développement présenté ci-dessus, le LNE couvre le raccordement de wattmètres à l'aide de bancs de transferts associés aux moyens suivants :

- microcalorimètre et monture bolométrique à chauffage direct en connecteur coaxial 7 mm pour 100 kHz – 18 GHz ;
- microcalorimètre et monture bolométrique à chauffage direct en guide d'onde pour 8 GHz – 110 GHz ;
- microcalorimètre et sonde à thermocouple à chauffage indirect en connecteur coaxial 3,5 mm jusqu'à 26,5 GHz.

Ce projet, qui a débuté en 2007, vise à étendre les moyens de raccordement en puissance sur ligne coaxiale 2,4 mm jusqu'à 50 GHz en dotant le LNE d'un microcalorimètre, d'une monture étalon et du banc de transfert permettant de raccorder les wattmètres clients.

Ainsi, deux types de technologies (bolométrique et thermoélectrique) ont été envisagés pour la conception de la monture étalon. Toutefois, en raison de l'arrêt progressif des montures bolométriques et de l'absence, pour les connecteurs 2,4 mm, de ce type de monture, la voie thermoélectrique a été choisie. A l'heure actuelle, pour ces connecteurs, les seules sondes à thermocouple disponibles sont à chauffage direct ce qui nécessite une instrumentation bien plus complexe.

Enfin, le cahier des charges pour la réalisation des lignes d'isolation thermique à parois minces très robustes du microcalorimètre a été établi et la méthode pour étalonner les wattmètres clients a été définie.

##### 4.3. Paramètres de dispersion S

Le calibrage des analyseurs de réseaux vectoriels, au moyen d'un kit de calibrage, permet, lors de mesures d'un circuit ou de composants, de corriger les imperfections intrinsèques à ces appareils.

L'expansion de structures de propagation planaires jusqu'à 110 GHz, nécessite la mise au point d'un ensemble d'étalons d'impédance pour constituer le kit de calibrage de référence nationale, mais aussi d'une méthode de calibrage appropriée offrant de faibles incertitudes.

Dans un premier temps des simulations de paramètres S sur différentes structures planaires ont été réalisées à l'aide du logiciel Momentum utilisant la méthode des moments. Dès lors, différentes structures ont été définies puis elles ont été réalisées par l'IEMN de Lille pour constituer deux kits de calibrage. L'un sera le kit de calibrage primaire du LNE et l'autre sera son kit de calibrage de transfert raccordé au premier kit. Une méthode de correction a été développée. Elle permet, à partir de la mesure d'un kit de calibrage quelconque, de corriger les paramètres S mesurés par rapport au calibrage primaire.