

Électricité - Magnétisme

Electricity - Magnetism

1. Introduction

Deux événements majeurs ont marqué les activités 2004 du laboratoire national de métrologie LNE, dans le domaine de l'électricité :

- L'intégration le 1^{er} janvier 2004 au sein du LNE du centre d'étalonnage du LCIE, laboratoire associé au BNM dans ce même domaine, qui alliée à la volonté de préserver pour la métrologie électrique la proximité des activités amont et des activités de transfert vers l'industrie, a conduit naturellement le 1^{er} juin 2004 à la création d'un centre de métrologie électrique, le CME. Ce centre est désormais en charge de l'ensemble de l'activité métrologique dans le domaine de l'électricité-magnétisme ;
- Le déménagement, au cours du mois de février, des activités de métrologie fondamentale quittant Fontenay-aux-Roses pour bénéficier des nouvelles installations basées sur le site de Trappes, installations de haute technicité et tournées vers l'avenir.

Avant de bénéficier des avantages d'une telle infrastructure, un temps important a été consacré à la réinstallation de tous les équipements, aux tests de vérification des étalons et aux étalonnages des bancs de mesure associés en tenant compte également des problèmes inhérents à l'exploitation débutante des systèmes de climatisation. Le développement de certaines études en a temporairement été affecté en 2004.

2. Bâtiment Maxwell

Après une construction qui aura duré quinze mois, le complexe de neuf laboratoires que constitue le bâtiment dénommé Maxwell associé au lot de trois autres laboratoires situés au sein d'un bâtiment existant ont été mis à disposition en février 2004. Ces nouvelles installations répondent à des exigences très sévères en termes de :

- Stabilité de température ($\pm 0,1^\circ\text{C}$ pour la plupart des salles d'expérimentation avec comme température de consigne 20°C ou 23°C selon l'activité) ;
- Protection contre les perturbations électromagnétiques (cage de Faraday avec une atténuation de 60 dB pour des fréquences comprises entre 1 MHz et 1 GHz) ;
- Protection contre les vibrations mécaniques propagées par le sol, en provenance de l'extérieur ou de l'intérieur du bâtiment ;

- Propreté de l'air pour les salles de la balance du watt et de l'étalon Thompson-Lampard (classe 1 000).

L'expérience de la balance du watt nécessite en outre une protection sévère contre les vibrations mécaniques. Elle est assurée par l'inertie de deux très importants massifs en béton de $(6 \times 6) \text{ m}^2$ chacun, d'épaisseur 2 m (150 T chacun) sur lesquels seront installés la balance du watt et le gravimètre absolue en cours de réalisation au LNE-SYRTE. Pour garantir la stabilité à long terme de l'horizontalité et de l'altitude des massifs, ces derniers sont supportés par des piliers en béton de 12 m de haut (80 cm de diamètre) ancrés dans les couches stables profondes du sous-sol. L'étalon de Thompson-Lampard est également protégé par l'inertie d'un massif individuel supplémentaire en béton, posé directement sur le sablon.

Par ailleurs les activités de métrologie hautes fréquences sont dotées d'un ensemble de trois laboratoires (pour les mesures de puissance en onde continue, de bruit radioélectrique et des paramètres *S*), présentant des caractéristiques techniques analogues (cages de Faraday sur une superficie de 60 m^2 chacune et climatisées à $23^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$) mais localisés dans un autre bâtiment.

Le bâtiment Maxwell a été inauguré le 4 novembre 2004 en présence du Ministre délégué à l'Industrie, M. Patrick Devedjian et de M. Marc Lipinski, Vice-Président du Conseil Régional d'Ile-de-France, M. Franck Borotra, ancien Ministre et Président du Conseil Général des Yvelines, et M. Jean Kovalevsky, Président du BNM.

3. Métrologie électrique quantique

Les études liées aux étalons quantiques ont été grandement affectées par le déménagement des dispositifs cryogéniques dans le bâtiment Maxwell. Cependant, le dernier trimestre a permis de valider cette réinstallation lors de la reprise progressive des étalonnages des étalons secondaires de tension et de résistance.

3.1. Étalons de tensions alternatives basés sur l'effet Josephson

Des réseaux à commande impulsionnelle développés par la PTB dans le cadre du projet européen JAWS ont été caractérisés. Pour cela, un nouveau montage expérimental permettant de générer des trains d'impulsions électriques de courte durée ($\sim 40 \text{ ps}$) avec un faible taux de répétition (de l'ordre du MHz) a été utilisé. En accord avec le modèle RCSJ (*Resistively and Capacitively Shunted Junction*), des marches de tension quantifiées en fonction

de l'amplitude des impulsions ont été observées. Cependant, quelques écarts par rapport à ce modèle ont été mis en évidence dans certains échantillons, laissant supposer la présence de réflexions multiples dans le système. Le cryostat à flux continu, de petite dimension et facilement transportable, spécialement conçu pour le synthétiseur JAWS a été mis en place en 2004 (fig. 1). Les comparaisons entre les caractéristiques $I-V$ obtenues avec ce nouveau cryostat mobile et avec un bain fixe ont donné des résultats comparables en terme de bruit et de forces électromotrices thermiques. Le projet JAWS a pris fin avant que les partenaires aient mis en œuvre les éléments constituant l'étalon de tension alternative.



Fig. 1. - Cryostat à circulation d'hélium.

3.2. Conservation de l'ohm par effet Hall quantique

Une diminution des incertitudes de mesure liée d'une part à l'amélioration de la stabilité en température et d'autre part à l'optimisation des blindages électromagnétiques a été constatée. Le dernier trimestre de l'année a vu la reprise de l'étude des QHARS. Deux QHARS1290 (valeur nominale $R_K/20$) ont été qualifiés. Le METAS a accepté de caractériser un de ces échantillons et vont être également caractérisés par d'autres instituts nationaux de métrologie. L'objectif restant d'effectuer une validation internationale. Un nouvel étalon de résistance nominale $R_K/2$ (plateau $i=2$) a également été étudié. Il est constitué de 2 couples de barres de Hall mises en série placées en parallèle par quadruple connexions. La résistance de Hall mesurée est égale à la valeur nominale attendue avec une incertitude relative de $2 \cdot 10^{-9}$ pour des courants de mesure de $40 \mu A$ et $80 \mu A$. Cette structure simple démontre que la technique des multiples connexions permet effectivement de préserver une exactitude excellente. Afin de réaliser d'autres échantillons, la collaboration avec le LPN-CNRS s'est poursuivie pour obtenir dans un premier temps des barres de Hall seules (dépôts de Si_3N_4 et de SiO_2).

3.3. Étalon quantique de courant

Les premiers transistors réalisés par le LPN-CNRS dans le cadre d'une action d'incitation ont été livrés et ont pu être caractérisés à basse température. Les résultats ont permis de valider le protocole de fabrication de transistors. Les propriétés de la couche d'oxyde d'aluminium qui

caractérisent les paramètres de la jonction tunnel sont compatibles avec les caractéristiques des dispositifs SET attendus pour l'élaboration d'un étalon de courant. Par ailleurs, un bruit blanc de $10 \text{ fA} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ a été obtenu lors de la caractérisation du comparateur cryogénique de courants continus (4C) à grand rapport d'enroulements (1/15 000), ce chiffre est à comparer avec le bruit obtenu dans les locaux précédents ($400 \text{ fA} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$). Ce niveau de bruit a été obtenu sans le blindage magnétique externe qui sera installé en 2005. Le niveau de bruit théorique pour un tel dispositif est de $0,1 \text{ fA} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

4. Métrologie électrique basses fréquences

Les travaux en métrologie basses fréquences ont donné lieu durant cet exercice à plusieurs résultats. Une nouvelle méthode d'étalonnage de multimètres en courant alternatif par rapport à des convertisseurs thermiques étalons a été mise en place. Un banc de puissance est en phase de finalisation, il permet d'ores et déjà de réaliser des mesures de puissance active en régime non déformé. Une collaboration a été lancée dans le cadre d'une action d'incitation avec le LERMPS pour caractériser des dépôts de bâtonnets résistifs et réaliser d'autres bâtonnets à couches minces afin de concevoir des résistances calculables en courant alternatif. Deux études ont débuté en 2004. L'une vise à développer un banc de mesure de déphasage et l'autre à mesurer des résistances de hautes valeurs et de très faibles courants.

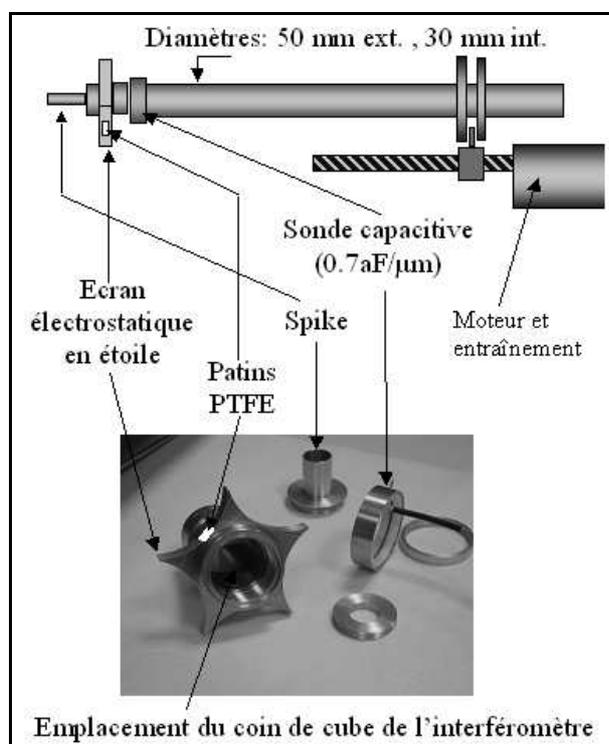


Fig. 2. - Vue d'ensemble de la nouvelle garde mobile.

4.1. Détermination et conservation du farad

Le déménagement a été mis à profit pour apporter des améliorations à l'étalon de Thompson-Lampard. En effet

le démontage, remontage et réglage (toujours en cours) de cet étalon primaire ont permis de changer la garde mobile par une garde allégée, amagnétique et pourvue d'un anneau capacitif (fig. 2). Ce système permet de mesurer les distances inter-électrodes sur toute la longueur du déplacement et devrait faciliter l'alignement final des électrodes. L'étalon primaire de capacité n'étant pas encore opérationnel, deux étalons de conservation ont permis d'assurer le raccordement de la Division Étalonnage Électrique (DEE) suite à leur retour du BIPM. En effet, avant le démontage de l'étalon primaire, ce dernier a été utilisé pour mesurer les capacités de conservation qui ont ensuite participé à une comparaison avec le BIPM. Cette démarche permettra de valider le remontage de l'étalon primaire par comparaison directe avec ces capacités. Les résultats du BIPM sont en bon accord avec les valeurs obtenues par extrapolation sur les courbes de variation.

4.2. Étalon calculable de résistance

Le laboratoire dispose désormais de résistances coaxiales à couches minces de valeurs nominales de 1 k Ω et 10 k Ω . Celles-ci sont régulées en température grâce à des enceintes réalisées au laboratoire avec des performances en stabilité remarquables (1 mK sur plus de 50 h). Des améliorations apportées au pont de mesure de résistance en courant alternatif et notamment celles liées à l'étalonnage des boîtiers d'injection par la détermination des corrections à appliquer sur les rapports de résistance, ont permis de montrer que dans le cas des résistances de 1 k Ω , la variation en fréquence entre 400 Hz et 1 600 Hz était de l'ordre de $1 \cdot 10^{-8}$ sinon inférieure. Ce résultat est en parfait accord avec les premières simulations réalisées parallèlement avec le logiciel Flux3D. Cette validation est encourageante en vue de réaliser d'autres étalons. Il a en effet été entrepris une collaboration avec le laboratoire LERMPS afin de contrôler les caractéristiques de nouvelles références ayant des valeurs nominales plus importantes.

4.3. Transposition alternatif – continu en tension

Dans le domaine des tensions bas niveau, des diviseurs résistifs de rapports 0,5 - 0,3 - 0,2 et 0,1 ont été réalisés. Ils sont actuellement utilisés à la réalisation de la procédure de *step-down* ayant pour objet le raccordement aux étalons primaires de transposition thermique en tension basses fréquences, de deux transferts FLUKE 792 pour des niveaux de tension compris entre 0,5 V et 5 mV à des fréquences allant de 10 Hz à 1 MHz. L'objectif fixé pour la fin de l'année 2005 est de disposer d'étalons parfaitement connus dans ce domaine afin de pouvoir, d'une part raccorder les références de la DEE et de contribuer aux mesures précises de tensions alternatives à partir des réseaux programmables de jonctions Josephson dans le cadre du projet Euromet n° 756 (extension du projet JAWS).

Dans le domaine des tensions « hautes fréquences » (0,5 MHz - 100 MHz), les corrections de l'ensemble des étalons couvrant le domaine allant de 0,5 V à 30 V ont été

déterminées. Ce domaine est maintenant en phase d'extension jusqu'à 100 V.

4.4. Puissance en courant monophasé

La nouvelle référence primaire pour la mesure des puissances électriques monophasées aux fréquences industrielles (de 50 Hz à 400 Hz) est fondée sur le développement d'un wattmètre numérique à échantillonnage (fig. 3). Le principe est le suivant : une source de puissance délivre des signaux sinusoïdaux $u(t)$ et $i(t)$ sur deux circuits différents (il s'agit donc de mesurer une puissance fictive). Ces signaux sont numérisés avec une même fréquence d'échantillonnage, à partir d'une impulsion de déclenchement appliqué simultanément à deux voltmètres numériques. Pour une plus grande exactitude des mesures, les voltmètres sont utilisés en mode échantillonnage par lecture de tensions continues. Un shunt, fabriqué à l'institut SP (Suède), a donc été inséré dans le circuit courant pour convertir le courant en tension $u_1(t)$. D'autre part, un diviseur inductif de tension, fabriqué à l'institut australien NMIA, a été introduit dans le circuit tension pour ramener la tension nominale à un niveau $u_2(t)$ mesurable sur le même calibre que le niveau $u_1(t)$ afin d'éviter des erreurs de phase trop importantes. Enfin, pour éviter les erreurs de troncature, une boucle de réaction à verrouillage de phase est utilisée pour échantillonner les signaux $u_1(t)$ et $u_2(t)$ sur un nombre entier de périodes. Les échantillons ainsi obtenus sont ensuite traités par transformée de Fourier discrète ce qui permet le calcul des amplitudes et des angles de phase de $u(t)$ et $i(t)$ et donc la détermination de la puissance active. Le dispositif expérimental est désormais complet et entièrement automatisé. L'année 2004 a également été consacrée à l'évaluation et/ou à la mesure des principales sources d'erreurs introduites par les multimètres et le système d'acquisition, celles introduites par le shunt et le diviseur inductif de tension étant parfaitement connues.

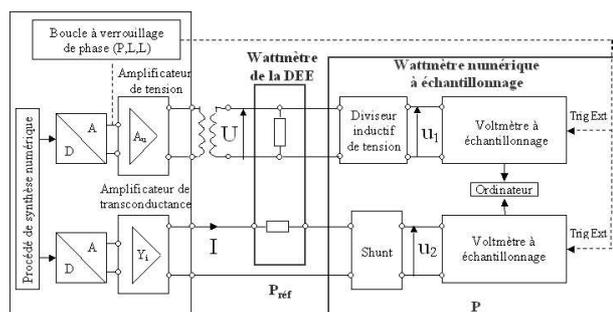


Fig. 3. - Puissance, dispositif expérimental.

4.5. Développement d'un banc de mesure de déphasage

Ce travail, initié en 2004, a pour objectif d'aboutir à la réalisation d'un étalon de déphasage capable de remplacer le banc actuel en fin de vie. L'étude bibliographique a permis de retenir une méthode reposant sur un échantillonnage et un traitement numérique des signaux au moyen d'une technique basée sur les moindres carrés. Les simulations permettant d'étudier l'effet des principales

sources d'erreur ont confirmé le choix des échantillonneurs. Une première version d'un programme d'acquisition et de traitement a été développée et les comparaisons avec le banc actuel sont encourageantes.

4.6. Mesures des très faibles courants et des résistances de hautes valeurs

Le renouvellement du banc d'étalonnage des résistances de hautes valeurs et des très faibles courants a également débuté en 2004. Le principe d'intégration d'un condensateur étalon placé en contre-réaction d'un amplificateur faible bruit a été retenu. L'architecture globale du banc a été validée et les travaux de réalisation de plusieurs parties du dispositif ont été lancés : condensateurs étalons de 0,1 pF et 1 pF, carte de sécurité, acquisition par échantillonnage à l'aide d'un multimètre HP3458A. Ce banc sera terminé et validé en 2005.

5. Métrologie électrique hautes fréquences

Le principal fait marquant est le démarrage d'une étude sur la faisabilité d'un étalon calculable de puissance HF. L'automatisation des radiomètres arrive à son terme, les quatre dispositifs couvrent les fréquences comprises entre 8,2 GHz et 40 GHz en guide d'onde.

5.1. Puissance HF

Les travaux d'études menés en 2004 ont porté principalement sur l'étude thermique approfondie des wattmètres HF et sur la faisabilité d'un étalon calculable de puissance HF (fig. 4). Les premiers résultats de l'étude ont permis de lancer la réalisation de premières maquettes. Des lignes micro-rubans terminées par des charges adaptées ont été testées. Cette expérimentation aboutira à l'implantation d'éléments sensibles à la puissance HF sur

la ligne et ainsi à l'établissement pour la première fois d'un étalon en technologie micro-ruban. Ce type de détecteur a été choisi pour sa structure simple et ses dimensions contrôlables aux moments de la réalisation.

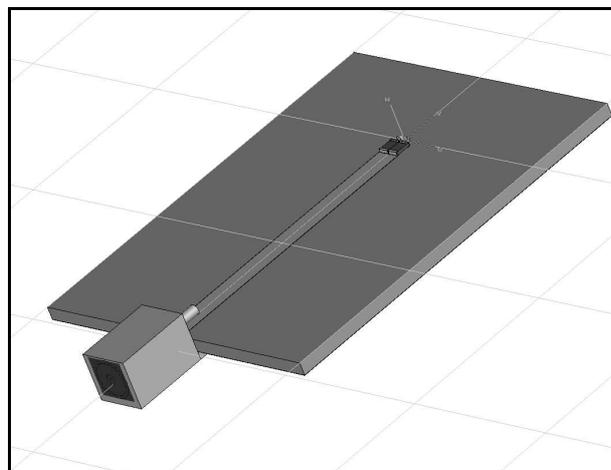


Fig. 4. - Représentation schématique d'un étalon calculable de puissance.

5.2. Bruit radioélectrique

Dans le cadre du déménagement, une nouvelle baie de régulation du four a été installée autorisant de nombreux points de sécurité et une plus grande souplesse pour le contrôle de la température. L'automatisation des radiomètres permet à présent de gagner un facteur 5 à 10 sur la durée d'étalonnage tout en améliorant la part d'incertitude sur la détermination des affaiblissements en positions source étalon et source inconnue. Par ailleurs, les nouvelles conditions de température ambiante permettent également d'améliorer les incertitudes. Globalement les incertitudes ont pu être réduites de 1 à 2 centièmes de dB pour 0,04 dB d'incertitude actuellement affiché.