



S. DJORDJEVIC

Conception et applications d'un étalon Josephson programmable de 1 V au LNE

Design and applications of a 1 V programmable Josephson voltage standard system at LNE

Sophie DJORDJEVIC, Olivier SÉRON, Olivier MONNOYE et François PIQUEMAL

Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 29 Avenue Hennequin, 78197 Trappes Cedex, France, sophie.djordjevic@lne.fr.

Résumé

Le LNE a développé récemment un système d'étalonnage de tension continue à partir d'un réseau de jonctions Josephson programmable de 1 V. Ce nouveau système, entièrement automatique, est spécifiquement dédié aux activités de transfert, *i.e.* l'étalonnage de références de tension continue (références à diodes Zener et piles Weston) et de voltmètres numériques de grande précision. Il permet d'ores et déjà d'offrir de nouvelles possibilités d'étalonnage avec de meilleures incertitudes, tout en bénéficiant de la simplicité de mise en œuvre des réseaux Josephson programmables. Ainsi la sortie 1,018 V des références de tension à diode Zener peut être étalonnée avec une incertitude relative typique de 80 nV ($k = 2$) dans le cadre de prestations courantes (soit une amélioration d'un facteur 7). Cet article décrit la conception de ce nouvel étalon et ses performances métrologiques.

MOTS CLÉS : ÉTALON DE TENSION CONTINUE, EFFET JOSEPHSON, RÉSEAU PROGRAMMABLE DE JONCTIONS JOSEPHSON, ÉTALONNAGE DE TENSION.

Abstract

The LNE has recently developed a 1 V programmable Josephson voltage standard specially dedicated to its transfer activities such as calibration of DC voltage references (Zener diode reference and Weston saturated standard cells) and digital voltmeters of high precision. This new programmable Josephson voltage standard allows the LNE to propose new calibration capabilities with reduced uncertainties while taking advantage of the simplicity to operate programmable Josephson array. The 1.018 V output voltage of the Zener diode reference can then be calibrated with a typical relative uncertainty of 80 nV ($k = 2$) in the framework of routine calibration services (an improvement by a factor 7). This paper describes the design of the new system and its metrological performances.

KEY WORDS: DC VOLTAGE STANDARD, JOSEPHSON EFFECT, PROGRAMMABLE JOSEPHSON JUNCTION ARRAY, VOLTAGE CALIBRATION.

1. Introduction

Depuis maintenant vingt ans, la représentation du volt est, et doit être, assurée par la mise en œuvre de l'effet Josephson (EJ) comme l'a expressément recommandée le Comité international des poids et mesures (CIPM) [1]. Cette recommandation, suivie par de nombreux laboratoires nationaux de métrologie (LNM) dont le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), s'appuyait à l'époque sur le développement de réseaux de jonctions Josephson hystérétiques pouvant délivrer 1 V et 10 V [2]. L'exploitation de ces réseaux permet aujourd'hui d'assurer une représentation unique du volt de par le monde avec un niveau de reproductibilité de l'ordre de 0,1 nV démontré par les résultats de nombreuses comparaisons internationales [3–6]. La figure 1 tirée de la référence [7] montre les résultats des comparaisons internationales menées par le BIPM depuis plus de dix ans. Le résultat obtenu en 2007 par le LNE [8] figure en très bonne position, avec un degré d'équivalence, $D_{\text{LNE}} = (U_{\text{LNE}} - U_{\text{BIPM}}) = -0,1$ nV et une incertitude type combinée de 0,1 nV ($k = 1$) inégalée.

Les réseaux de jonctions Josephson hystérétiques ou réseaux de jonctions Josephson conventionnels (RJJC) souffrent néanmoins de certains inconvénients (stabilité de la tension sensible aux perturbations électromagnétiques extérieures, sélection du point de fonctionnement laborieuse...) qui rendent leur emploi délicat, grand consommateur de temps et empêchent d'autres applications métrologiques. Ainsi, il est difficile d'assurer un étalonnage complètement automatique d'étalons tels que les piles Weston saturées (sans risque de débit de

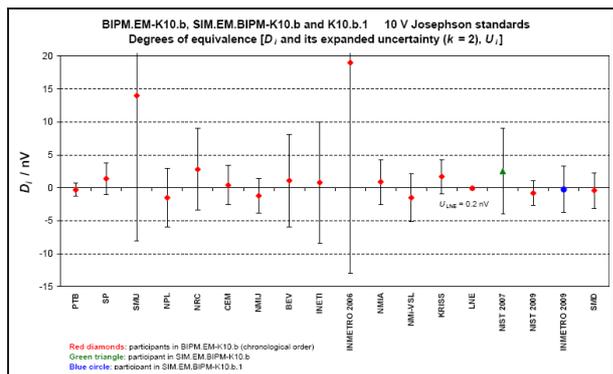


Fig. 1. – Ensemble des résultats des comparaisons BIPM.EM-K10b et SIM.EM.BIPM-K10b des étalons Josephson de 10 V exprimés en terme de degré d'équivalence du laboratoire i par rapport à la valeur de référence. Le degré d'équivalence est défini par deux termes : $D_i = (U_i - U_{BIPM})$ et l'incertitude élargie ($k = 2$) associée, $2u_i$ (correspondant à la barre d'erreur sur le graphe) exprimés en nanovolt.

courant) [9], ou celui d'un voltmètre numérique (gain, linéarité). Par conséquent, ces réseaux sont peu adaptés pour effectuer des prestations d'étalonnage courantes telles qu'elles existent dans les laboratoires de métrologie industriels. Il est en outre impossible d'envisager de nouvelles applications comme la génération de tensions alternatives, domaine en plein essor [10].

En 1995, une nouvelle classe de dispositifs, appelés réseaux de jonctions Josephson programmables (RJJP) a été proposée par Hamilton [11]. Ce sont des convertisseurs numérique/analogique (CAN) de précision fondamentale reposant sur des réseaux de jonctions Josephson amorties (ou non hystérétiques). Ces dispositifs délivrent des tensions dont la valeur peut être ajustée sans aucune ambiguïté et en un temps très court, (inférieur à la microseconde). La stabilité vis-à-vis du bruit électromagnétique est également très grande. Pour toutes ces raisons, les réseaux programmables remplaceront certainement dans l'avenir les réseaux conventionnels à base de jonctions hystérétiques. Des RJJP délivrant des tensions de l'ordre de 1 V devraient bientôt être disponibles dans le commerce [12]. Cependant, la limite de 10 V, fixée par les réseaux conventionnels, n'a été atteinte que très récemment par quelques laboratoires nationaux de métrologie qui s'efforcent de développer des RJJP, comme l'AIIST [13], la PTB [14] ou le NIST [15].

La reproductibilité de la tension Josephson obtenue à partir de RJJP a été vérifiée à plusieurs reprises à 1 V [16]. Et plus récemment, une comparaison directe entre le LNE et le Bureau international des poids et mesures (BIPM) a montré un très bon accord à 10 V [17], démontrant une différence relative $(U_{RJJP} - U_{RJJC})/U_{RJJC}$ de $-3,2 \times 10^{-11}$ associée à une incertitude type relative u_c/U_{LNE} de $6,1 \times 10^{-11}$.

Le développement de ces réseaux programmables est également motivé par de nombreuses autres applications. Le LNE exploite entre autres les performances de ces réseaux programmables en courant continu dans le cadre de

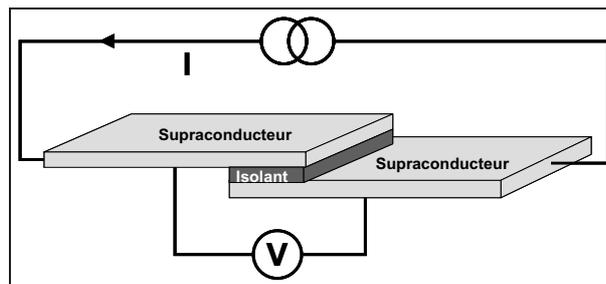


Fig. 2. – Schéma d'une jonction Josephson tunnel Supraconducteur-Isolant-Supraconducteur (SIS).

ses travaux sur le triangle métrologique quantique [18] et la balance du watt [19] et dans le domaine de la métrologie électrique en basse fréquence (inférieures à 1 MHz) pour la génération de tensions alternatives et l'étalonnage de convertisseurs thermiques [20].

Au vu de ces progrès et de la nécessité pour le LNE de renouveler ses moyens d'étalonnage de tensions continues dans le cadre de son activité de transfert vers l'industrie, il a été décidé début 2006 de développer un étalon de tension Josephson programmable 1 V dédié à l'étalonnage de références de tension continue, de voltmètres et de nanovoltmètres. Ce banc d'étalonnage est aujourd'hui opérationnel et il fait l'objet de cet article. Après un rappel du principe physique à l'origine des étalons Josephson, l'article décrit le nouveau système et ses différents éléments constitutifs. Le résultat d'une comparaison directe avec un RJJC, puis les étalonnages de piles Weston et de références à diode Zener sont présentés. Un bilan d'incertitudes typique est donné à titre d'exemple. Enfin, une dernière application concernant l'étalonnage de voltmètres et nanovoltmètres conclut cet article.

2. Principe des étalons de tension Josephson programmables

2.1. Effets Josephson et conservation du volt

2.1.1. Effets Josephson

Les effets Josephson (EJ) ont fait l'objet de nombreuses recherches depuis leur découverte en 1962 et les applications métrologiques de ce phénomène quantique sont étudiées depuis le début des années 70. L'objectif ici n'est donc pas de résumer ces 40 années de recherche, mais de donner une brève description du fonctionnement et des contraintes liées à un étalon Josephson (voir la revue d'articles parus [2] pour plus de détails).

Les effets prédits par Josephson [21] sont reliés à des propriétés remarquables de la supraconductivité, phénomène quantique macroscopique qui apparaît à très basse température dans certains matériaux. Ces effets Josephson ont lieu dans des structures où deux supraconducteurs sont faiblement couplés soit par l'intermédiaire d'une fine barrière isolante comme le montre la figure 2, soit au travers d'une fine couche métallique ou d'une petite constriction du supraconducteur.

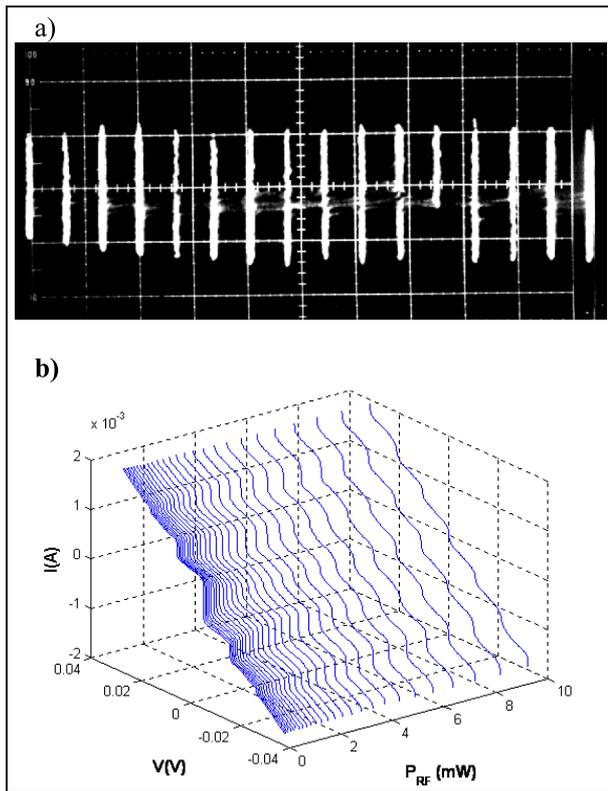


Fig. 3. – Caractéristiques courant-tension sous irradiation micro-onde a) d'un réseau de jonctions Josephson hystériques à 75 GHz et 5 mW (x : 200 $\mu\text{V}/\text{div}$ et y : 10 $\mu\text{A}/\text{div}$), b) pour un réseau de 512 jonctions Josephson amorties à 10 GHz et pour différentes puissances micro-onde. Ces deux figures font apparaître des plateaux de tension quantifiés (ou marches de Shapiro).

En l'absence de tension appliquée aux bornes d'une telle jonction, un courant continu, I_J , circule dans la jonction jusqu'à une valeur critique I_C , qui dépend de la géométrie, de la température et du champ magnétique. La résistance de la jonction Josephson est nulle tant que le courant qui la traverse est inférieur au courant critique I_C . Ce comportement est appelé effet Josephson continu.

Si une tension continue est appliquée aux bornes de la jonction, le courant de paires qui traverse cette dernière oscille à une fréquence $f = 2eU/h$, qui dépend uniquement de la tension appliquée U et de constantes fondamentales (e , la charge de l'électron et h , la constante de Planck). Cette émission de courant alternatif par la jonction est appelée effet Josephson alternatif.

Réciproquement, si un courant alternatif de fréquence f_a est appliqué au travers de la jonction par irradiation hyperfréquence, le courant de paires I_J a tendance à se synchroniser avec cette fréquence (et ses harmoniques) et il apparaît une tension continue aux bornes de la jonction. Cette synchronisation se révèle dans les caractéristiques courant-tension (I - V) par l'apparition de marches de tension à des multiples entiers de la valeur $U = h \cdot f_a / (2e)$, appelées marches de Shapiro (fig. 3a et 3b).

2.1.2. Conservation du volt et réseaux de jonctions Josephson

L'exactitude du rapport $U/f_a = h/(2e)$ et son indépendance vis-à-vis des conditions expérimentales (température, courant de polarisation, matériaux des jonctions) ont été testées à de nombreuses reprises jusqu'à des niveaux d'incertitude pouvant atteindre 10^{-16} [22]. Une jonction Josephson agit donc comme un convertisseur tension-fréquence de précision fondamentale, et c'est pourquoi aujourd'hui l'EJ alternatif est utilisé pour la conservation du volt. La constante de proportionnalité entre la fréquence et la tension est appelée constante Josephson. Elle est notée $K_J = 2e/h$.

La stabilité des références de tension reposant sur l'EJ dépend uniquement de la stabilité de la fréquence qui peut facilement atteindre 10^{-12} [23]. C'est ainsi que les LNM ont commencé à utiliser l'EJ comme représentation du volt et ont adopté par un accord international une valeur conventionnellement vraie pour la constante Josephson K_J , $K_{J-90} = 483\,597,9$ GHz/V avec comme date d'application le 1^{er} janvier 1990 [1]. Cette valeur provient d'une moyenne pondérée des valeurs de K_J obtenues par des réalisations du volt et par d'autres méthodes expérimentales (incluant les premières expériences de balance du watt) avant 1990. Exprimée en unités SI, cette valeur est entachée d'une incertitude relative de 4×10^{-7} . L'étalon de tension Josephson est donc un étalon intrinsèque qui donne une référence très stable de la tension qui peut être reproduite partout, quel que soit l'échantillon.

Toutefois, les contraintes techniques liées à l'apparition de l'EJ dans les jonctions (en particulier en terme de fréquence hyperfréquence et du nombre de marches de Shapiro accessibles) limitent la valeur maximale de la tension qui peut être générée par une seule jonction Josephson. En effet, les fréquences habituelles sont comprises entre 1 GHz et 80 GHz, et les marches de Shapiro accessibles ne dépassent généralement pas l'harmonique 2 de l'onde incidente. La tension maximale disponible aux bornes de cette jonction sera donc de l'ordre de 300 μV à 80 GHz. Ces tensions sont trop faibles pour étalonner les étalons de tension habituels tels que les piles Weston saturées (1,018 V) et les références à diode Zener (de sorties 1,018 V et 10 V). Les mises en œuvre de l'EJ dans des étalons de tension sont donc constituées de plusieurs jonctions mises en série que l'on appelle réseaux de jonctions Josephson.

2.2. Les réseaux de jonctions Josephson programmables (RJJP)

Autant la relation tension – fréquence est universelle sur une marche de Shapiro, autant la forme particulière de la caractéristique I - V sous irradiation hyperfréquence est dépendante du matériau, de la géométrie, de la puissance micro-onde, de la température, etc. Les réseaux conventionnels reposent sur des jonctions Josephson SIS (Supraconducteur-Isolant-Supraconducteur) présentées à la figure 2, dont les caractéristiques I - V sont intrinsèquement multivaluées, c'est-à-dire qu'à un courant de

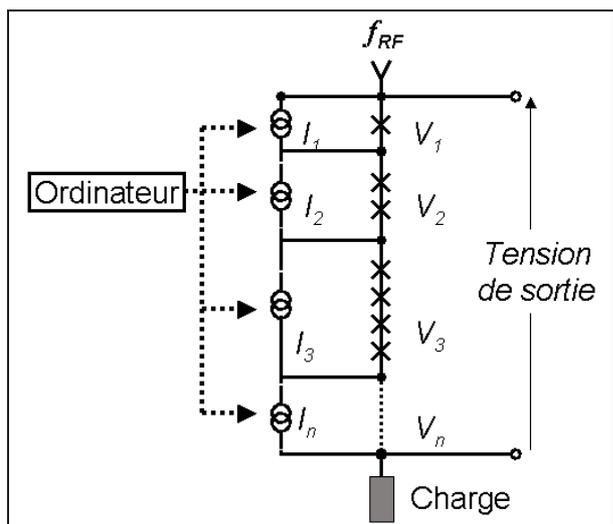


Fig. 4. – Architecture des réseaux Josephson programmables binaires.

polarisation correspond plusieurs marches de Shapiro (fig. 3a). Ceci explique en partie pourquoi ils sont sensibles aux bruits extérieurs mais également pourquoi il est difficile de sélectionner sans ambiguïté une marche de tension particulière avec ces derniers.

Les réseaux programmables quant à eux sont fabriqués à partir de jonctions Josephson dont les caractéristiques I - V sous irradiation hyperfréquence sont non hystériques (fig. 3b). A une valeur de courant de polarisation correspond une valeur de tension unique. Ce type de caractéristiques est obtenu en remplaçant l'isolant soit par une fine couche de métal normal, formant des jonctions SNS (supraconducteur-métal normal-supraconducteur) [11], soit par une alternance de couches d'isolant et de métal normal, formant des jonctions SINIS (supraconducteur-isolant-métal normal-isolant-supraconducteur) [24]).

L'architecture des réseaux programmables repose sur une répartition des jonctions en séquences binaires appelées segments (fig. 4). Chacun des segments irradiés à la fréquence f peut être polarisé individuellement sur les marches $n = 0, \pm 1$, en appliquant un courant de polarisation $I = 0, \pm I_p$. La tension de sortie du réseau représente la somme des tensions développées par chaque segment. Elle peut prendre toutes les valeurs entre $+N \cdot f/K_{J-90}$ et $-N \cdot f/K_{J-90}$ (où N est le nombre total de jonctions dans le réseau) avec une résolution de f/K_{J-90} .

Les étalons de tension Josephson programmables se présentent sous la forme de circuits intégrés supraconducteurs contenant des milliers de jonctions Josephson connectées en série et intégrées dans une ligne de transmission hyperfréquence. La figure 5 présente un réseau de jonctions Josephson programmable SINIS fabriqué par le PTB. Ces derniers permettent de travailler à plus haute fréquence (autour de 70 GHz) par rapport aux réseaux de jonctions SNS (environ 16 GHz), et par conséquent un moins grand nombre de jonctions est nécessaire pour atteindre la même tension. Les deux difficultés



Fig. 5. – Réseau de jonctions Josephson programmable SINIS fabriqué par le PTB; le circuit hyperfréquence est formé de 64 branches contenant 128 jonctions Josephson; à droite, l'antenne hyperfréquence permettant de coupler le réseau au guide d'onde est visible.

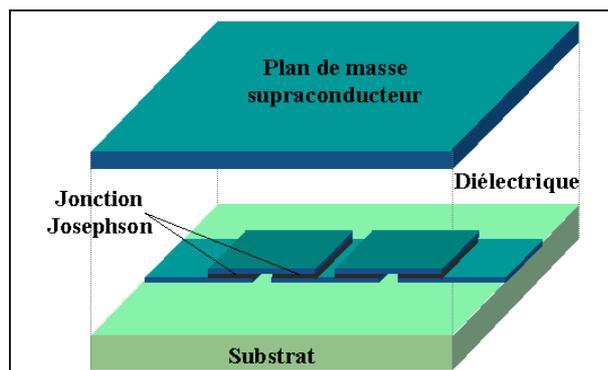


Fig. 6. – Schéma d'une ligne microruban intégrant plusieurs jonctions Josephson.

majeures pour la fabrication des réseaux résident dans la nécessité d'obtenir sur l'ensemble du réseau de jonctions, d'une part, une très grande homogénéité des paramètres des jonctions (comme le courant critique), et d'autre part, une distribution uniforme de la puissance micro-onde dans le circuit hyperfréquence. Ce dernier point a été résolu par le PTB en utilisant des lignes de transmission microruban pour les réseaux SINIS (fig. 6).

3. L'étalon de tension Josephson programmable du LNE et les bancs d'étalonnage associés

La figure 7 montre l'étalon de tension Josephson programmable 1 V et le banc d'étalonnage de références de tension continue réalisés pour le laboratoire d'étalonnage électrique du LNE.

3.1. Étalon de tension Josephson programmable de 1 V

3.1.1. Réseau de jonctions Josephson programmable de 1 V (SINIS)

Le « cœur » du dispositif est un réseau de jonctions Josephson programmables SINIS, alternance de couches Nb-Al/Al₂O₃/Al/Al₂O₃/Al-Nb [24], fabriqué par la PTB (fig. 5) [25]. Le courant critique est de 1,6 mA. Le réseau est optimisé pour une fréquence d'irradiation de 70 GHz. A cette fréquence, les marches $n = \pm 1$ sont centrées autour de 3,2 mA et elles ont une amplitude de l'ordre de 1 mA pour une puissance micro-onde de 25 mW (fig. 8).



Fig. 7. – Banc d'étalonnage Josephson programmable ; à gauche, le synthétiseur HF, la canne cryogénique et le bidon d'hélium dans lequel est plongé le réseau de jonctions Josephson programmable ; à droite, le nanovoltmètre, la référence à diode Zener en étalonnage, la source de polarisation programmable, le commutateur programmable et l'ordinateur.

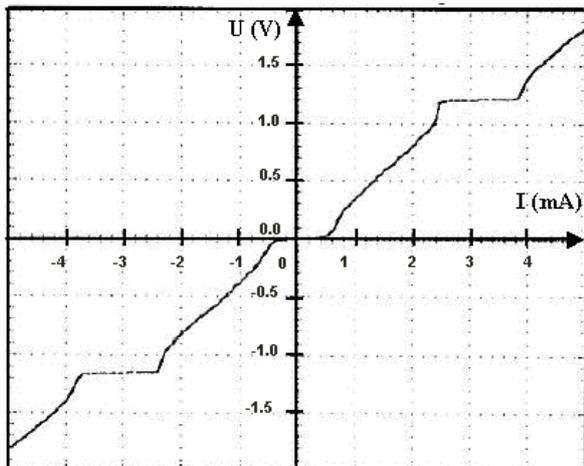


Fig. 8. – Caractéristique $V-I$ du réseau de jonctions Josephson programmable 1 V (SINIS). Les marches de Shapiro $n = 0, \pm 1$ correspondent aux plateaux de tension : $0, \pm 1,185\,633\,767\,2$ V à 70 GHz.

Le réseau possède 8 191 jonctions (au lieu des 8 192 prévues dans la conception originale), réparties en treize segments suivant une progression binaire (1, 2, 4, 8, 16, ..., 4 096). Un quatorzième segment comporte la jonction manquante (*i.e.* une jonction présentant un court-circuit parfait). Habituellement, cette jonction supplémentaire est prévue pour permettre des mesures de zéro (par opposition de tension de segments équivalents) à l'intérieur du réseau et permet ainsi de tester la rectitude des marches

de Shapiro avec une meilleure précision. Malgré ce défaut, le réseau remplit parfaitement son rôle de convertisseur analogique/numérique binaire sans erreur de linéarité et avec une résolution optimale. A 70 GHz, n'importe quelle tension jusqu'à $\pm 1,185\,633\,767\,2$ V peut être générée avec une résolution de $144,748\,3\,\mu\text{V}$.

De façon à s'assurer du bon fonctionnement du réseau, les caractéristiques $I-V$ sont étudiées avant chaque série d'étalonnages. Une fonctionnalité du logiciel de pilotage de l'étalon Josephson programmable est prévue à cet effet.

3.1.2. Canne d'instrumentation cryogénique

La canne cryogénique permet de descendre le réseau dans l'hélium liquide à 4,2 K. Elle est équipée d'un guide d'onde hyperfréquence surdimensionné en inox plaqué argent (permettant de limiter les pertes de puissance micro-onde et les pertes thermiques). Les extrémités de ce dernier sont munies de transitions vers des guides d'onde WR-12. Une modification d'une des brides WR12 et l'introduction d'une feuille de Mylar isole galvaniquement le circuit de mesure du guide d'onde. Un ensemble de dix-huit fils a été adapté sur cette canne : quinze fils sont utilisés pour la polarisation et sont associés à des filtres LC (fréquence de coupure d'environ 1 MHz), et une paire de fils de cuivre associée à des filtres LC à trois étages (fréquence de coupure ~ 10 kHz) sert pour la mesure précise de la tension. Le réseau est protégé par un blindage magnétique en « Cryoperm » (alliage à base de nickel et de fer présentant un écrantage du champ magnétique particulièrement efficace aux très basses températures).

3.1.3. Source hyperfréquence

La source micro-onde MMWS (*Miniature Millimeter Wave Synthesizer*) qui a été choisie est particulièrement compacte. Elle a été développée spécialement pour les étalons de tension Josephson pour le domaine de fréquences 72 GHz–76 GHz (résolution de 4 kHz), à partir d'un synthétiseur de fréquence travaillant autour de 9 GHz et de deux multiplicateurs de fréquence [26]. Un amplificateur externe a été rajouté sur le modèle que nous utilisons pour optimiser la puissance dans le domaine 69 GHz–73 GHz, avec un maximum de 90 mW à 70 GHz comme le montre la figure 9. Compte tenu de la faible atténuation du guide d'onde, cette puissance est amplement suffisante pour générer les marches de Shapiro. La fréquence et la puissance de travail sont programmables sur une mémoire réinscriptible de type EEPROM.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la fréquence doit être connue avec une extrême précision, c'est pourquoi le synthétiseur est asservi sur une référence de fréquence rubidium (10 MHz), elle-même, contrôlée par GPS, et connue avec une précision de l'ordre de 10^{-12} . Le bruit de phase du synthétiseur est de -45 dBc (décibels sous la porteuse) à 2 kHz.

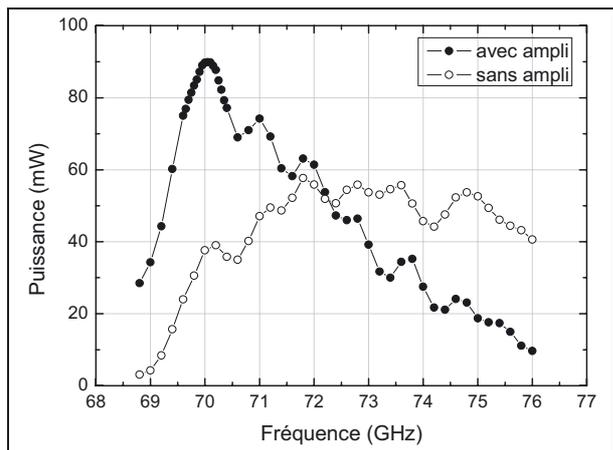


Fig. 9. – Puissance du synthétiseur en fonction de la fréquence avec et sans amplificateur en sortie.

Ce synthétiseur remplace avantageusement le montage habituel constitué d'une diode Gunn et d'une boucle à verrouillage de phase associée à un compteur de fréquence. Les performances des deux systèmes sont complètement comparables [26] pour un moindre coût et une mise en œuvre plus facile.

3.1.4. Source de polarisation programmable

La source de polarisation a été fabriquée au LNE et s'inspire d'une conception du PTB. Elle est composée de quatorze sources de polarisation individuelles permettant d'imposer les tensions des différents segments du réseau. Chaque module est constitué d'un convertisseur numérique/analogique (16 bits) en série avec une résistance de 1 k Ω . Les CAN utilisés peuvent délivrer ± 10 V avec des courants de ± 5 mA, suffisants pour générer les marches de Shapiro. Un logiciel a été développé permettant de calculer et d'imposer les tensions adéquates à la sortie des différents modules en fonction de la tension Josephson souhaitée.

Une attention particulière a été portée pour réduire les sources de bruit qui sont à l'origine d'un arrondissement et d'une réduction de l'amplitude des marches de tension. En particulier, les CAN ont été choisis pour leur bruit de tension relativement faible (120 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$). La source de polarisation a été découplée optiquement de l'ordinateur qui la pilote au moyen d'une interface développée au laboratoire. De plus, l'alimentation a fait l'objet du plus grand soin et elle peut même être fournie par des batteries pour un isolement total du secteur.

3.2. Banc d'étalonnage de référence de tension et de voltmètres

3.2.1. Description du circuit de mesure

La mesure de la tension des références de tension à étalonner s'effectue par opposition à la tension du réseau de jonctions Josephson. La méthode consiste à déterminer l'écart entre la tension inconnue et celle délivrée par

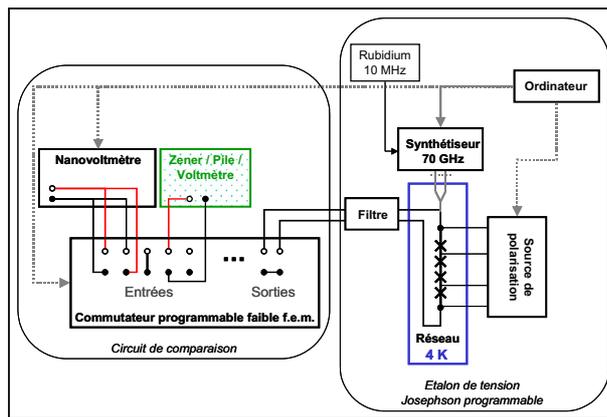


Fig. 10. – Schéma du dispositif d'étalonnage des références de tension continue mettant en œuvre l'étalon Josephson programmable.

le réseau à l'aide d'un nanovoltmètre numérique utilisé comme détecteur de zéro (DZ). Outre l'étalon Josephson programmable décrit au paragraphe 3.1 et le nanovoltmètre, un commutateur programmable multivoie (scanner) présentant de faibles forces électromotrices (f.é.m.) thermiques fait partie du circuit de mesure. Ce dernier permet entre autres de renverser la polarité de la référence de tension et il permet d'étalonner jusqu'à treize références de tension ou voltmètres. L'ensemble des connexions du circuit de comparaison se fait au travers du scanner. Le schéma du dispositif de mesure est représenté schématiquement à la figure 10. Le nanovoltmètre est connecté suivant deux polarités de manière à pouvoir inverser les bornes du DZ si besoin. Une troisième entrée est mise en court-circuit dans un boîtier externe. Les autres entrées sont disponibles pour connecter les éléments en étalonnage. Enfin, les sorties du scanner sont connectées au réseau Josephson.

Un programme complet a été développé pour gérer les tests du réseau Josephson puis les différentes étapes reliées aux procédures d'étalonnage des références de tension et des multimètres numériques décrites au paragraphes 4.2, 4.3 et 4.5.

3.2.2. Procédure d'étalonnage des références de tension

La première étape de l'étalonnage consiste à ajuster la tension Josephson au plus près de la tension de la référence à étalonner en choisissant le numéro de la marche. L'étalonnage s'effectue ensuite en dix séries de mesures automatiques de la tension du détecteur de zéro. Chaque série étant le résultat des mesures pour les deux polarités du réseau et de la référence de tension. La polarité du réseau est inversée grâce à la source de polarisation et celle de la référence grâce au scanner. L'inversion de polarité permet d'éliminer les tensions parasites, principalement la tension d'offset du nanovoltmètre et les f.é.m. thermiques des fils de tension reliant le scanner au réseau Josephson. Cependant les f.é.m. thermiques des fils reliant l'élément à étalonner au scanner ne sont pas éliminées par cette procédure. Elles sont déterminées

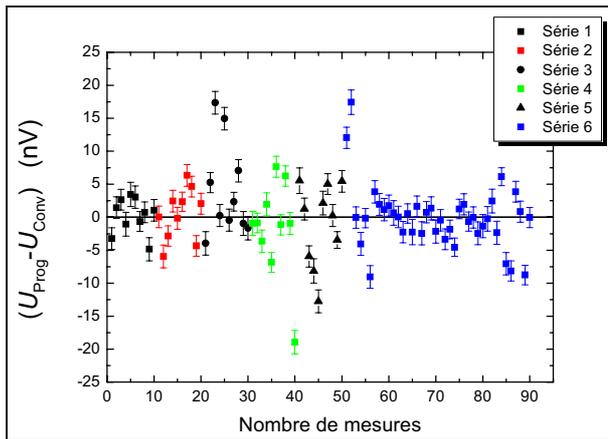


Fig. 11. – Différence entre les tensions générées par l'étalon Josephson programmable, U_{Prog} , et l'étalon Josephson conventionnel, U_{Conv} . Les barres d'erreur correspondent à l'écart type expérimental de la moyenne.

séparément en remplaçant la référence de tension par un court-circuit et elles sont comptabilisées dans le bilan d'incertitude.

3.2.3. Procédure d'étalonnage de voltmètres et nanovoltmètres

Pour l'étalonnage de voltmètres, l'entrée du scanner sur laquelle le court-circuit a été placé est sélectionnée à la place du détecteur de zéro, ce qui permet de connecter directement l'entrée du voltmètre à la sortie de l'étalon Josephson sans changer de montage. La procédure consiste à balayer la tension Josephson jusqu'à la tension correspondant au maximum du calibre avec la résolution d'une jonction (environ $140 \mu\text{V}$). Pour chaque tension Josephson, la tension lue sur le voltmètre est enregistrée puis une mesure à zéro est réalisée juste après. Cette mesure de zéro compense les offsets du voltmètre et les f.é.m. des fils de mesures. Ces mesures permettent de déduire deux paramètres importants pour le voltmètre : le gain et la linéarité [27].

4. Résultats

4.1. Comparaison directe à l'étalon Josephson conventionnel

Une comparaison directe de l'étalon Josephson programmable avec l'étalon Josephson conventionnel a été réalisée en 2011 (fig. 11). La configuration de la chaîne de mesure est quasiment similaire à la configuration utilisée lors de la comparaison BIPM-EM.K10b [8]. Les deux dispositifs Josephson étaient connectés en série-opposition. La différence de tension était mesurée par un nanovoltmètre numérique servant de détecteur de zéro (DZ). L'entrée du DZ était connectée à un commutateur présentant de faibles f.é.m., muni d'une position de court-circuit utilisée lors des inversions de polarité. Le châssis du DZ ainsi que l'ensemble des blindages métalliques étaient connectés à la terre en un seul point. Les mesures

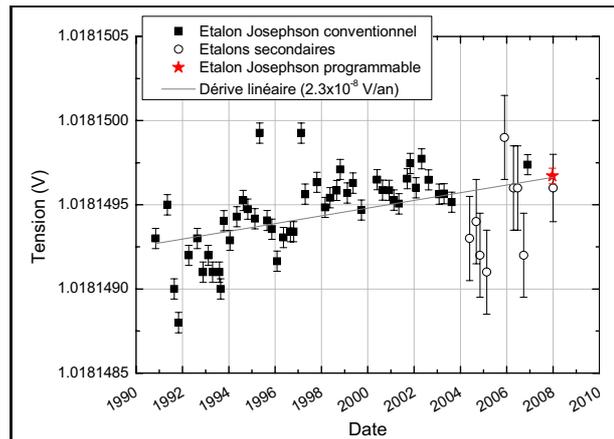


Fig. 12. – Suivi de la dérive de la tension de la pile Weston (n° 1); Les symboles carré, cercle et étoile représentent les résultats des étalonnages réalisés respectivement avec l'étalon Josephson conventionnel, les références à diode Zener et l'étalon Josephson programmable; les barres d'erreur correspondent aux incertitudes élargies ($k = 2$).

ont été réalisées en flottant. L'ordinateur était isolé optiquement de la chaîne de mesure. La figure 11 présente les résultats de cette comparaison.

Effectuée sur six séries de mesures (90 mesures), la comparaison conduit à un écart moyen entre les tensions générées par les deux réseaux égal à :

$$(V_{\text{Prog}} - V_{\text{Conv}}) = (0,2 \pm 2,0) \text{ nV},$$

où l'incertitude associée correspond à l'incertitude élargie ($k = 2$). L'incertitude combinée tient compte des composantes d'incertitude associées à la fréquence micro-onde, au détecteur de zéro et aux résistances de fuites [8, 17]. Ces résultats démontrent que le nouveau système peut être utilisé comme référence primaire de tension continue par le laboratoire d'étalonnage électrique.

4.2. Étalonnage de piles étalon Weston

Le laboratoire d'étalonnage électrique du LNE possède une enceinte de dix piles Weston saturées [9] qui servait jusqu'à présent de référence primaire. En 2008, un étalonnage avec le banc Josephson programmable a été réalisé. L'enceinte de piles a fait l'objet d'un suivi régulier de la dérive de la tension depuis plus de dix ans. Ce suivi était réalisé par comparaison à l'étalon Josephson conventionnel. En 2004, suite au déménagement du laboratoire et jusqu'en 2008, les piles n'ont pu être raccordées directement par rapport à l'étalon Josephson. Pendant ce temps, une procédure d'étalonnage par comparaison avec des références de tension à diode Zener, elles-mêmes raccordées à Josephson, a été mise en place avec une incertitude dégradée.

La figure 12 montre le suivi de la tension d'une des dix piles de l'enceinte. Seul le dernier point correspond à l'étalonnage de la pile par le banc Josephson programmable. L'incertitude combinée associée à ce point s'élève

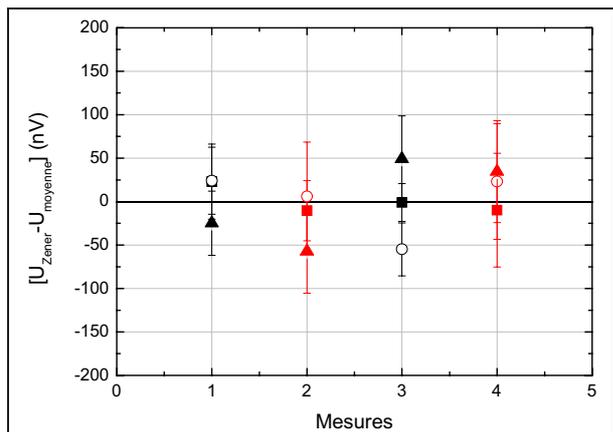


Fig. 13. – Comparaison des résultats d'étalonnages avec le banc Josephson programmable (symboles rouges) et le banc Josephson conventionnel (symboles noirs) pour trois différentes références à diode Zener du laboratoire d'étalonnage électrique ; les barres d'erreur ont un facteur d'élargissement $k = 2$ et elles sont inférieures à 8×10^{-8} en valeur relative.

à 46 nV ($k = 2$) et elle est essentiellement due au bruit associé à la pile. Ce bruit relativement faible par rapport au bruit des références à diode Zener (§ 4.3) était une des raisons pour lesquelles les piles, malgré leur ancienneté, étaient encore utilisées jusqu'à présent. Le banc Josephson programmable permet d'envisager leur remplacement à moyen terme.

La dérive de tension de la pile est de l'ordre de 20 nV par an. Le résultat de l'étalonnage réalisé avec le banc Josephson programmable est en très bon accord avec la valeur estimée à partir de la dérive annuelle enregistrée jusque là. L'écart de la valeur attendue à la valeur mesurée est inférieur à 10 nV. Les résultats illustrés en figure 11 confirment non seulement que l'étalon Josephson programmable permet d'étalonner les piles Weston avec une incertitude de l'ordre de quelques 10^{-8} dépendant du bruit de la pile et ils démontrent également que l'ensemble des résultats issus des différentes méthodes d'étalonnage est cohérent.

4.3. Étalonnage de références à diode Zener

L'étalon de transfert du laboratoire de métrologie électrique du LNE pour les différences de potentiel en courant continu consiste en un groupe de cinq références à diode Zener dont les sorties 10 V et 1,018 V sont étalonnées régulièrement par rapport à l'étalon Josephson conventionnel au moyen du banc d'étalonnage qui lui est associé dans le cadre de la conservation du volt. Plusieurs étalonnages à l'aide de l'étalon Josephson programmable et de l'étalon Josephson conventionnel ont été réalisés successivement à quelques jours d'intervalles de manière à s'assurer de la cohérence des résultats des deux méthodes. La figure 13 montre les résultats de ces étalonnages pour trois références à diode Zener. Les résultats des deux bancs d'étalonnage donnent des valeurs en très bon accord en considérant les incertitudes élargies ($k = 2$) des deux dispositifs.

Tableau 1

Bilan d'incertitude d'un étalonnage d'une référence à diode Zener typique à 1,018 V.

Composante	Type	Incertaince (nV)
Dispersion des résultats	A	35
F.é.m. thermiques	A	20
Gain du nanovoltmètre	B	0,2
Fréquence	B	<0,03
Courant de fuite	B	<0,3
Incertaince combinée ($k = 1$)		40

4.4. Bilan d'incertitude

Le tableau 1 dresse un bilan d'incertitude typique établi pour l'étalonnage d'une référence à diode Zener 1,018 V à partir du banc Josephson programmable. Le bilan est largement dominé par les deux composantes d'incertitude estimées par des méthodes de type A.

La dispersion des résultats se traduit par une valeur typique de l'écart type expérimental sur une série de 10 mesures de 35 nV. Cet écart type dépend fortement de la référence à diode Zener à étalonner. Ici, l'incertitude n'est pas calculée à partir de l'écart type expérimental sur la moyenne car les mesures sont corrélées dans le temps, ce qui se traduit par un bruit en $1/f$ apparaissant pour des temps de mesures relativement courts, de l'ordre de la dizaine de secondes [28]. A titre de comparaison, l'écart type expérimental pour les piles Weston est de l'ordre de 10 nV. La deuxième composante est due aux erreurs liées aux f.é.m. thermiques résiduelles non compensées lors des inversions de polarité et conduit à une incertitude de 20 nV indépendante de la valeur nominale de la tension à mesurer.

Les trois composantes d'incertitude de type B indiquées dans le tableau 1 sont négligeables. L'erreur de gain du nanovoltmètre entraîne une incertitude relative de 2×10^{-10} . Cette incertitude, comme celle associée aux f.é.m. thermiques résiduelles, est estimée avant chaque étalonnage. L'incertitude liée à la fréquence provient de l'incertitude sur la fréquence du rubidium (10 MHz), $\Delta f/f < 10^{-12}$ ($k = 1$) et à l'incertitude due au synthétiseur. Cette dernière a été estimée à l'aide d'une méthode hétérodyne permettant de ramener la fréquence émise par le synthétiseur hyperfréquence dans une bande de fréquences beaucoup plus faible. Enfin, la mesure des diverses résistances de fuite du circuit de mesure (résistances d'isolement du scanner et des câbles de mesure) associée à la mesure des résistances des câbles connectés à la référence à étalonner et la résistance de sortie de la référence à diode Zener sur la sortie 1,018 V (au maximum de 1 k Ω d'après le constructeur) conduit à une incertitude inférieure à 3×10^{-10} en valeur relative.

4.5. Étalonnage de nanovoltmètres

Deux grandeurs importantes permettent de caractériser les voltmètres et les nanovoltmètres. La première est le gain G , et la deuxième est la linéarité. Alors que

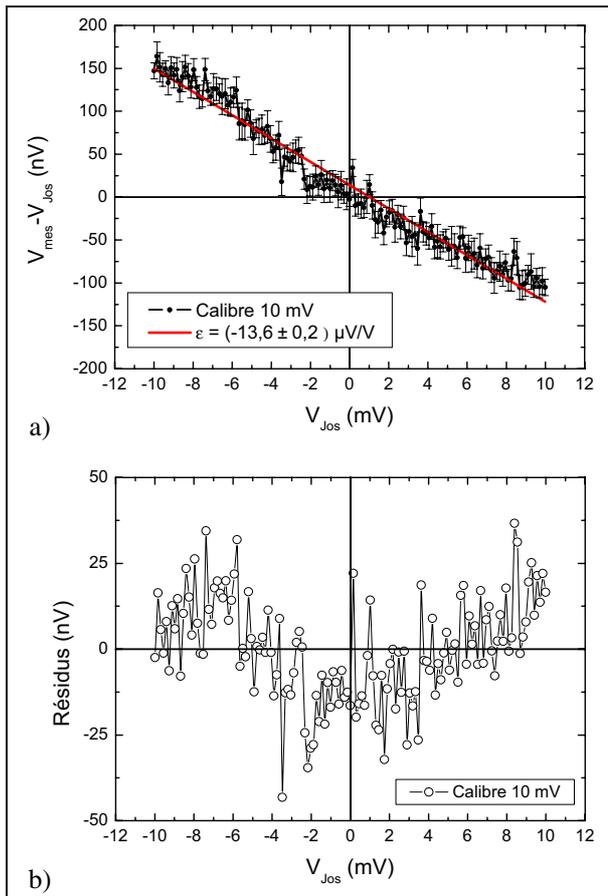


Fig. 14. – Mesure du gain et de la linéarité d’un nanovoltmètre Agilent-34420 sur le calibre 10 mV à l’aide du banc Josephson programmable ; a) Écart entre la tension lue sur le voltmètre et la tension Josephson en fonction de la tension Josephson, les barres d’erreur représentent deux fois l’incertitude type ; b) Résidus de la régression linéaire.

le gain dérive dans le temps, la linéarité reste relativement stable [27].

Les résultats des mesures de gain et de linéarité sur le calibre 10 mV d’un nanovoltmètre Agilent-34420 sont présentés sur la figure 14. La figure 14a représente l’écart entre la tension lue sur le voltmètre et la tension Josephson en fonction de la tension Josephson balayée sur tout le calibre avec la résolution maximale (soit 139 points d’étalonnage). L’écart type expérimental pour chaque mesure est de l’ordre de 7 nV. La pente de la droite d’ajustement des données expérimentales, obtenue par régression linéaire, donne l’écart au gain unité, $\epsilon = G - 1$. Dans cet exemple, cet écart est de $(-13,6 \pm 0,2) \mu\text{V/V}$.

La linéarité de l’instrument est mise en évidence sur la figure 14b. Cette dernière représente les résidus de la régression linéaire pour le calibre 10 mV. L’écart quadratique moyen par rapport à la meilleure droite permet de quantifier la linéarité qui est ici de 15 nV, soit $1,5 \mu\text{V/V}$ en valeur relative par rapport à la pleine échelle. Les mêmes mesures sur le calibre 1 mV ont montré que le

nanovoltmètre est linéaire à 8 nV, correspondant au bruit de l’instrument.

5. Conclusion et perspectives

Un étalon Josephson programmable 1 V a été développé au LNE dans le cadre de ses activités de transfert pour l’industrie. Il met en œuvre un réseau de jonctions Josephson programmable 1 V et permet d’étalonner des références de tension de type piles Weston ou diode Zener mais aussi des voltmètres et nanovoltmètres. Les incertitudes d’étalonnage accessibles sont fortement dépendantes de la qualité des références à étalonner et de l’environnement électromagnétique du laboratoire. Elles sont néanmoins le plus souvent de l’ordre de 80 nV ($k = 2$), soit une amélioration de près d’un ordre de grandeur par rapport aux incertitudes associées aux prestations d’étalonnage que le LNE pouvait proposer jusqu’à maintenant. Ce banc, entièrement automatique, permet également d’offrir de nouvelles possibilités d’étalonnage de voltmètres et de nanovoltmètres numériques (sur des calibres allant jusqu’à 1 V) avec de très bonnes incertitudes.

Ainsi l’étalon Josephson programmable, par sa facilité de mise en œuvre et ses incertitudes extrêmement faibles, est un nouvel atout pour le laboratoire de métrologie électrique du LNE. D’autres applications récentes de cet étalon quantique dans le domaine des tensions alternatives permettent d’espérer que, dans l’avenir, de nouvelles prestations d’étalonnage pourront être proposées par le LNE.

Références

- [1] CIPM, « Représentation du volt au moyen de l’effet Josephson », Recommandation 1 du CIPM (CI-1988), 77^e session du CIPM, 1990.
- [2] JEANNERET B. et BENZ S., “Application of the Josephson effect in electrical metrology”, *Eur. Phys. J. Special Topics*, **172**, 2009, 181-206 ; KOHLMANN J. *et al.*, *Meas. Sci. Technol.*, **14**, 2003, 1216 ; HAMILTON C., *Rev. Sci. Instrum.*, **71**, 2000, 3611.
- [3] REYMANN D. et WITT T.J., “International comparison of Josephson array voltage standards”, *IEEE T.I.M.*, **42**, 2, 1993, 596-599.
- [4] LO-HIVE J.-P. et GENEVES G., « Comparaisons d’étalons de tension à effet Josephson », *Bulletin du BNM*, **111**, 1998, 3-12.
- [5] REYMANN D. *et al.*, *IEEE T.I.M.*, **48**, 2, 1999, 257-261.
- [6] Reports of the BIPM.EM-K10.a & .b comparison : “On-going direct 10 V Josephson on-site comparisons” disponible sur le site du BIPM : <http://kcdb.bipm.org>.
- [7] The BIPM key comparison database, March 2010, BIPM.EM-K10.b http://kcdb.bipm.org/appendixB/appresults/bipm-em-k10.b/em-k10%20b_30mar10.pdf.

- [8] SOLVE S. *et al.*, *Metrologia, Tech. Suppl.*, **46**, 2009, 01002.
- [9] PIQUEMAL F., « Étalons électriques fondamentaux actifs », *Revue des Techniques de l'Ingénieur*, R908 et Doc R908, 6, 2004.
- [10] BEHR R. *et al.*, *IEEE T.I.M.*, **54**, 2, 2005, 612-615 ; PALAFOX L. *et al.*, *IEEE T.I.M.*, **56**, 2, 2007, 534-537 ; RUFENACHT A. *et al.*, *IEEE T.I.M.*, **60**, 7, 2011, 2372-2377 ; SÉRON O. *et al.*, à paraître dans *IEEE T.I.M.*
- [11] HAMILTON C.A. *et al.*, "Josephson D/A converter with fundamental accuracy", *IEEE T.I.M.*, **44**, 2, 1995, 223-225.
- [12] <http://www.ipht-jena.de>
- [13] YAMAMORI H. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 4, 2006, 042503, 1-3.
- [14] MÜLLER F. *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **17**, 2007, 649.
- [15] BURROUGHS J.C. *et al.*, *NCSLI Measure*, **4**, 3, 2009, 70.
- [16] BEHR R. *et al.*, "Analysis of different measurement setups for a programmable Josephson voltage standard", *IEEE T.I.M.*, **52**, 2003, 524-527.
- [17] DJORDJEVIC S., SÉRON O., SOLVE S. et CHAYRAMY R., *Metrologia*, **45**, 2008, 1-7.
- [18] FELTIN N. *et al.*, « TRIMET : fermeture du triangle métrologique quantique à un niveau d'incertitude relative de 10^{-6} », *Rev. Franç. Métr.*, **25**, 2011, 3-15.
- [19] EICHENBERGER A., GENEVÈS G. et GOURNAY P., "Determination of the Planck constant by means of the watt balance", *Eur. Phys. J. Special Topics*, 2009, 363-384.
- [20] SÉRON O., BUDOVSKY I., DJORDJEVIC S., HAGEN T., BEHR R. et PALAFOX L., *CPEM Conf. Digest.*, 2010, 30-31 ; SÉRON O., BUDOVSKY I., DJORDJEVIC S., HAGEN T., BEHR R. et PALAFOX L., à paraître dans *IEEE T.I.M.*
- [21] JOSEPHSON B.D., *Phys. Lett.*, **1**, 1962, 251-253.
- [22] TSAI J.S., JAIN A.K. et LUKENS J.E., *Phys. Rev. Lett.*, **51**, 4, 1983, 316-319.
- [23] REYMAN D. *et al.*, *Metrologia*, **31**, 1994, 35-37.
- [24] KIELER O. *et al.*, *Physica C*, **372**, 2002, 309.
- [25] Tant que l'IPHT (Jena) ne peut fabriquer des RJJP de qualité suffisante, la PTB est autorisée à les vendre.
- [26] KLUSHIN A.M. *et al.*, *CPEM Conf. Digest.*, 2006, 368-369.
- [27] VAN DER BROM H.E., HOUTZAGER E., RIETVELD G., VAN BEMMELEN R. et CHEVTCHENKO O., *Meas. Sci. Technol.*, **18**, 2007, 3316.
- [28] WITT T.J., *IEEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, **149**, 6, 2002, 309.

Article reçu le 24 septembre 2010, version révisée reçue le 19 octobre 2011.