

# FABRICATION ET ETALONNAGE DE TRANSFORMATEURS ETALONS AU LNE

**O. Thévenot, G. Traçon, A. Bounouh**  
**Laboratoire National de Métrologie et d'Essais**  
**29, avenue Roger Hennequin 78197 Trappes Cedex**

## Résumé

La comparaison des grandeurs électriques exprimées en unités du système international et des mêmes grandeurs générées à partir de phénomènes quantiques est un moyen direct de détermination des constantes physiques. Les travaux menés au LNE sur la détermination du quantum de résistance  $R_K$  s'inscrivent dans cette démarche. Dans cette expérience, différents ponts de comparaison d'impédances sont utilisés dont l'élément central est un autotransformateur double étages. Deux transformateurs ont été fabriqués et un pont de mesure a été réalisé pour leur étalonnage.

## Abstract

The comparison of electric quantities expressed in the international system of units and the same quantities generated from quantum phenomena is a direct mean to determine physics constants. The determination of the quantized resistance  $R_K$  at the LNE comes within this framework. In this experiment various impedance bridges whose the main element is a two-stage auto-transformer are used. Two inductive dividers have been built and a measurement bridge has been realised for their calibration.

## Introduction

Les unités de tension et de résistance, le volt et l'ohm, sont conservées dans les laboratoires nationaux de métrologie à un très haut niveau d'incertitude, respectivement à partir de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique. Ces deux phénomènes sont directement liés à deux constantes fondamentales, le quantum de flux  $\Phi_0=2e/h$  et le quantum de résistance  $h/e^2$ , dépendant uniquement de la constante de Planck,  $h$ , et de la charge de l'électron,  $e$ . La comparaison des grandeurs électriques obtenues, d'une part, en unités du système international par le biais de déterminations directes et, d'autre part à partir de phénomènes quantiques, permet d'accéder directement à ces constantes fondamentales.

Cependant, bien que la reproductibilité des mesures mettant en jeu ces phénomènes soit

respectivement de quelques  $10^{-11}$  et  $10^{-10}$ , les estimateurs du quantum de flux  $K_J$  et du quantum de résistance  $R_K$ , exprimés dans le système international d'unités, sont entachés respectivement d'une incertitude de  $4.10^{-7}$  et  $1.10^{-7}$  en valeur relative. L'amélioration de la connaissance de ces constantes constitue un enjeu fondamental des travaux menés au LNE qui visent à déterminer la constante de von Klitzing  $R_K$  via l'étalon calculable de capacité Thompson-Lampard [1]. Cette détermination de  $R_K$  est par ailleurs la seule qui découle directement de la définition de l'unité de résistance dans le système international.

La détermination de  $R_K$  est le résultat d'une succession d'étapes de mesures. Une détermination directe du farad par rapport au mètre est d'abord réalisée au moyen du condensateur calculable. Cet étalon permet ensuite de raccorder, par remontées successives, des capacités de  $10^4$  pF servant à leur tour d'étalons de références à trois couples de résistances de 10, 20 et 40 k $\Omega$ . Ce raccordement des valeurs des résistances aux valeurs des capacités par l'intermédiaire de la seconde est effectué en utilisant un pont fréquentométrique, dit de quadrature, fonctionnant aux pulsations 2500, 5000 et 10000 rad/s. Les valeurs des résistances ainsi obtenues sont comparées en courant continu à la résistance de Hall quantifiée du plateau  $i=2$  d'un gaz d'électrons bidimensionnel de GaAs/AlGaAs. Une valeur de  $R_K$  en unités du système international est donnée par extrapolation à fréquence nulle des résultats obtenus. Les ponts de comparaison employés tout au long de cette chaîne de détermination ont pour éléments principaux des autotransformateurs à double étage.

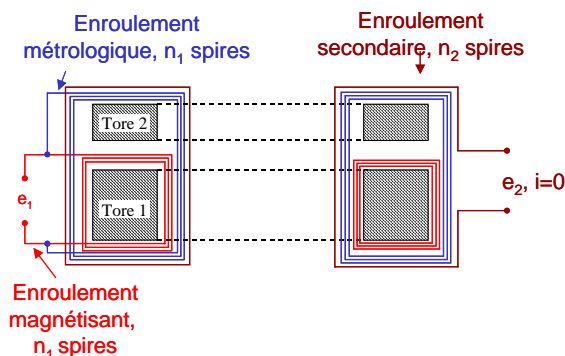
Un premier type de transformateur, constitué de onze sections identiques, est utilisé dans les ponts de capacités ou de résistances. Un second type constitué de deux sections identiques sert dans le pont de quadrature. La fabrication de ce dernier est plus aisée et son étalonnage n'est pas indispensable puisque l'erreur du rapport 1:1 qu'il fournit peut être corrigée pendant les mesures en retournant le transformateur. En revanche, la fabrication des autotransformateurs des ponts d'impédances est une opération qui demande beaucoup de soins et de précautions et leur étalonnage est crucial dans l'amélioration des incertitudes dans la détermination de  $R_K$ . Dans cette perspective, le laboratoire a lancé la fabrication de nouveaux autotransformateurs étalons constitués de

douze sections. Le but est de pouvoir appliquer des tensions de travail plus importantes, d'une part pour étudier l'effet de la tension appliquée sur les capacités de transferts, et d'autre part pour diminuer l'incertitude des mesures en augmentant le rapport signal sur bruit. Cet article fait une présentation de ces nouveaux appareils actuellement en cours de d'étalonnage au LNE [2].

## Fabrication de transformateurs étalons

Les transformateurs (ou autotransformateur) destinés à fournir des rapports de tensions étalons sont généralement des transformateurs double étage.

Ce type d'appareil comporte deux tores magnétiques : Un premier enroulement primaire, dit enroulement magnétisant, enveloppe le tore 1 seulement. Un deuxième enroulement primaire, dit enroulement métrologique, ainsi que l'enroulement secondaire sont bobinés autour de l'ensemble des deux tores magnétiques 1 et 2. Il n'est pas nécessaire que les deux tores aient les mêmes sections. Les enroulements magnétisant et métrologique ont le même nombre de spires et sont généralement alimentés par la même source. La figure 1 présente une vue en coupe de ce type d'appareil.



**Figure 1 :** vue en coupe d'un transformateur double étage

La présence du deuxième étage permet de diminuer la correction du rapport de transformation  $n_2/n_1$  d'un facteur  $10^3$  environ, ce qui permet d'obtenir des erreurs sur les rapports de l'ordre de quelques  $10^{-6}$  [3].

### Choix du noyau magnétique

Les matériaux employés pour réaliser les noyaux magnétiques des transformateurs étalons sont généralement des alliages de fer-nickel, connus sous l'appellation commerciale super-mumétal ou supermalloy. Pour limiter les fuites magnétiques, les noyaux utilisés sont de forme torique sans entrefer. Ils sont réalisés à partir d'une fine bande de matériau magnétique, enroulée en spirale et électriquement

isolées, ce qui permet de réduire l'influence des courants de Foucault tout en gardant un flux total important à travers la section du tore.

Le choix des matériaux et leurs dimensions sont imposés par les caractéristiques et les performances recherchées. Les transformateurs dont il est question ici, devront fonctionner pour des tensions allant jusqu'à 200 V pour des fréquences comprises entre 400 et 1600 Hz. Ces différents paramètres sont reliés aux caractéristiques magnétiques du noyau, dans le cas d'un tore, par la relation suivante :

$$U = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot B_{\max} \cdot f \cdot N^2 \cdot \sigma \cdot h \cdot r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (1)$$

où  $U$  est la tension de travail (V),  $B_{\max}$ , l'induction magnétique maximale du matériau (T),  $f$ , la fréquence (Hz),  $N$ , le nombre de tours de l'enroulement,  $\sigma$ , le facteur de remplissage du tore,  $r_1$ ,  $r_2$  et  $h$ , les rayons intérieur et extérieur et la hauteur du tore (m).

Le matériau retenu pour la réalisation des noyaux magnétique est le Supermalloy avec une épaisseur de bande de 0.05 mm ( $\sigma \approx 0.85$ ), ses principales caractéristiques sont :  $B_{\max} = 0.7$  T, une perméabilité relative maximale  $\mu_{\max} = 180000$  et une perméabilité initiale  $\mu_{\text{init}} = 100000$ . Les diamètres intérieur, extérieur et hauteur sont respectivement de 96.8 mm, 157.2 mm et 56.5 mm pour le tore magnétisant et 109.5 mm, 157.2 mm et 43.6 mm pour le tore métrologique.

### Les enroulements

Un enroulement doit être bobiné uniformément sur toute la surface du tore magnétique, ainsi ses deux extrémités sont adjacentes. Un enroulement bobiné "naturellement" sur un tore forme l'équivalent d'une boucle dans le plan de ce dernier. Pour éviter que le tore génère ou soit sensible à un champ magnétique extérieur, les techniques de bobinages visent à réduire la surface de cette boucle. La solution la plus efficace consiste à réaliser les bobinages selon la méthode "Ayrton-Perry".

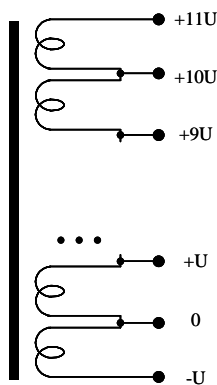


**Figure 2:** vue de l'enroulement métrologique bobiné selon la méthode "Ayrton-Perry"

La moitié des spires est bobinée dans un sens, l'autre moitié est bobinée par dessus dans le même sens mais dans la direction opposée jusqu'au début de l'enroulement.

Les performances d'un transformateur peuvent être optimisées selon la manière dont vont être bobinés les différents enroulements destinés à fournir les rapports étalons. Malheureusement, la minimisation des inductances et capacités de fuite sont mutuellement exclusives. En effet, réduire les inductances de fuite imposerait d'avoir des enroulements aussi proches que possible les uns des autres, ce qui a pour effet d'augmenter les capacités de fuite. Et inversement, réduire les capacités inter-enroulements conduirait à éloigner les enroulements les uns des autres, ce qui augmente les inductances de fuite. Deux types de bobinages sont principalement employés dans la construction de transformateur étalon : le premier, constitué de fils en nappes, permet de réduire les capacités entre enroulements; le second, constitué de fils torsadés, vise à diminuer les inductances de fuite.

Nos transformateurs ont été réalisés en employant ce dernier type de bobinage. Les différents conducteurs destinés à former les enroulements sont torsadés; la torsade ainsi formée est bobinée sur un nombre de tours suffisants autour du tore magnétique. La position de chacun des conducteurs tout au long de la torsade doit être aléatoire, ainsi les capacités inter-enroulements peuvent être sensiblement égales. Pour minimiser le courant capacitif entre les différentes sections, les enroulements présentant la plus forte capacité ont été connectés entre eux pour les soumettre à une faible tension. Une torsade de douze conducteurs est connectée comme indiqué ci-dessous (figure 3) pour former un transformateur à douze sections.



**Figure 3** : schéma des connexions des différents enroulements dans un transformateur de douze sections

Les enroulements magnétisant et métrologique comportent 240 spires réalisés en fil de cuivre de 1 mm de diamètre. Le magnétisant possède

des prises d'accès à 0, 20, 120, 220 et 240 spires. Chacune des sections de l'enroulement métrologique est accessible [4].

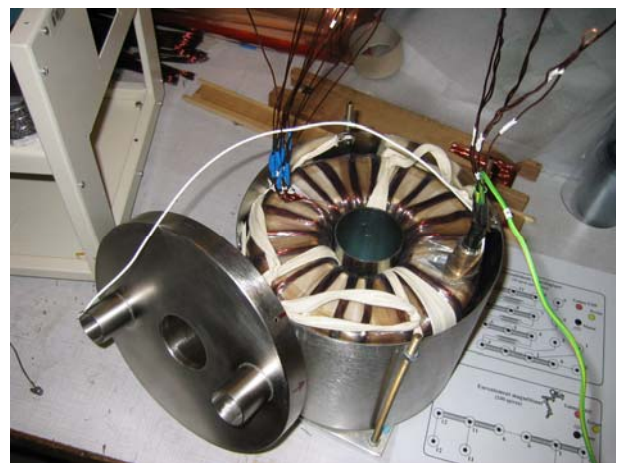
## Les écrans

### Ecrans électriques

En cas de présence d'une tension de mode commun entre les enroulements primaire et secondaire (secondaire "flottant"), et afin d'éviter les courants capacitifs dans ces enroulements, ils sont séparés par deux écrans électrostatiques qui sont portés au potentiel de chacun de ces enroulements. Ainsi, les courants capacitifs circulent uniquement entre les écrans sans traverser les enroulements.

### Ecrans magnétiques

L'utilisation d'écrans magnétiques permet de s'affranchir d'une part, du flux de fuite existant aux extrémités de la spirale constituant le noyau magnétique et d'autre part, d'être insensible aux champs magnétiques extérieurs et par réciprocité de ne pas rayonner. Chaque spire est ainsi traversée par le même flux. Un écran magnétique réalisé en matériau conducteur peut également servir d'écran électrique. On veillera toujours, lors de leur mise en place, à ce qu'ils ne forment pas une spire en court-circuit. Un dernier écran magnétique en mu-métal agit comme blindage contre les perturbations électromagnétiques extérieures. La figure 4 montre la mise en place du dernier écran magnétique. L'ensemble terminé est ensuite monté dans un châssis suspendu sur amortisseurs, afin de limiter des vibrations et chocs mécaniques.



**Figure 4** : Mise en place du dernier écran magnétique en mu-métal.

L'ensemble des éléments constitutifs de ce transformateur sont présentés sur la figure 5.

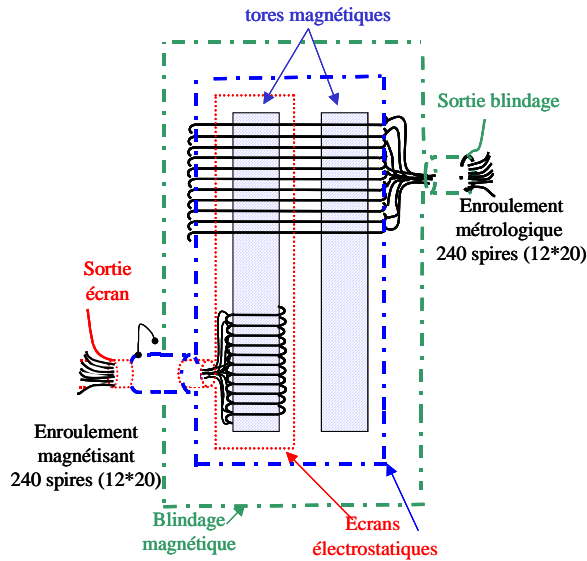


Figure 5: vue d'ensemble de l'autotransformateur

## Étalonnage

### Principe

La méthode retenue pour étalonner ces appareils consiste à comparer la tension délivrée par le secondaire d'un transformateur de tare, de rapport 12:1, à la tension délivrée par chacune des douze sections du transformateur à étalonner (figure 6)[4].

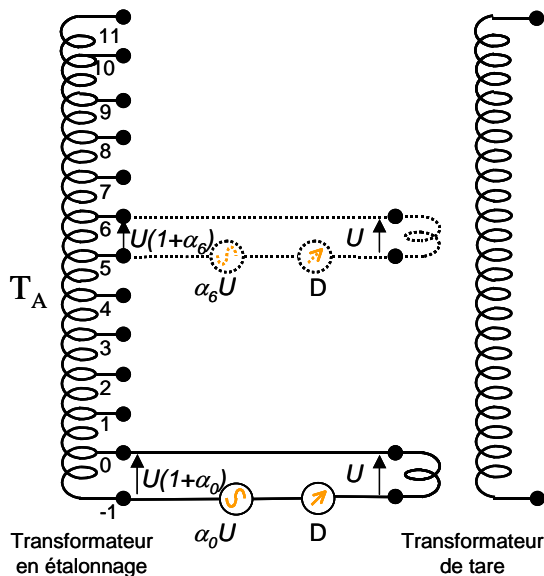


Figure 6 : étalonnage par comparaison à une tension de référence, seuls l'enroulement métrologique de l'autotransformateur en étalonnage et le secondaire du transformateur de tare sont représentés.

La tension de sortie du transformateur de tare est égalisée avec celle délivrée par la première section du transformateur en étalonnage à l'aide du

générateur de tension  $\alpha_0 U$ . A l'équilibre, aucun courant ne circule dans la boucle de mesure, cette condition est vérifiée à l'aide du détecteur D. Les différentes sections sont connectées successivement, le courant dans la boucle de mesure est annulé chaque fois et les écarts  $\alpha_i$  sont relevés. On peut ainsi déterminer les corrections des différents rapports accessibles. Si  $n$  est le numéro de la borne qui détermine le rapport du transformateur, la correction à apporter au rapport  $11-n:n$  est donnée par :

$$c_{\frac{11-n}{n}} = \frac{I}{(11-n)} \sum_{i=n}^{10} \alpha_i - \frac{I}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i \quad (2)$$

avec  $0 < n < 11$

La figure 7 présente un schéma détaillé du montage utilisé pour réaliser l'étalonnage des transformateurs. Dans ce montage, et afin d'augmenter sa résolution de réglage, la tension d'équilibre  $\alpha_0 U$  de la figure 6 a été placée en série avec l'enroulement primaire du transformateur de tare. Il s'agit d'un pont coaxial où circule dans la gaine de chacun des câbles un courant égal et de sens opposé à celui circulant dans son âme. Cette condition est remplie en introduisant dans chaque boucle de conducteurs de masse un égalisateur de courant [4].

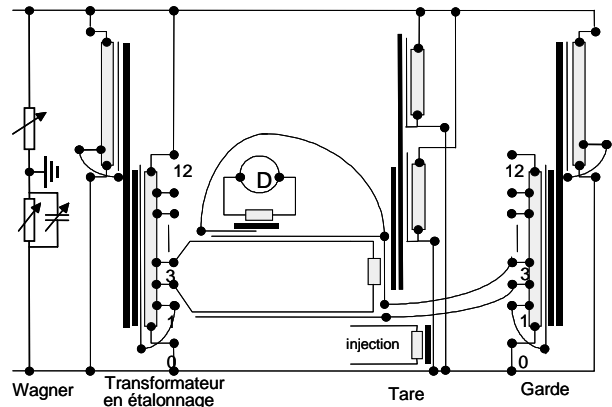


Figure 7: représentation du montage utilisé pour l'étalonnage des transformateurs

### Transformateur de tare

La pièce maîtresse de cette méthode est le transformateur de tare qui fournit la tension de référence  $U$ . Cet appareil doit fournir une tension stable pendant la durée d'une mesure et indépendante du potentiel de la masse. Pour obtenir ces propriétés, certaines précautions doivent être prises lors de sa fabrication.

Nous avons réalisé un transformateur avec les caractéristiques principales suivantes : double étages et double écrans, il possède un rapport 1/12

et supporte une tension de 200 V à la fréquence de 400 Hz. Le secondaire est constitué d'un câble coaxial dont la gaine sera portée au potentiel de garde. La réalisation est illustrée par la photo de la figure 8. La figure 9 montre le schéma de principe de ce transformateur.



Figure 8 : transformateur de tare dédié à l'étalonnage des transformateurs étalons

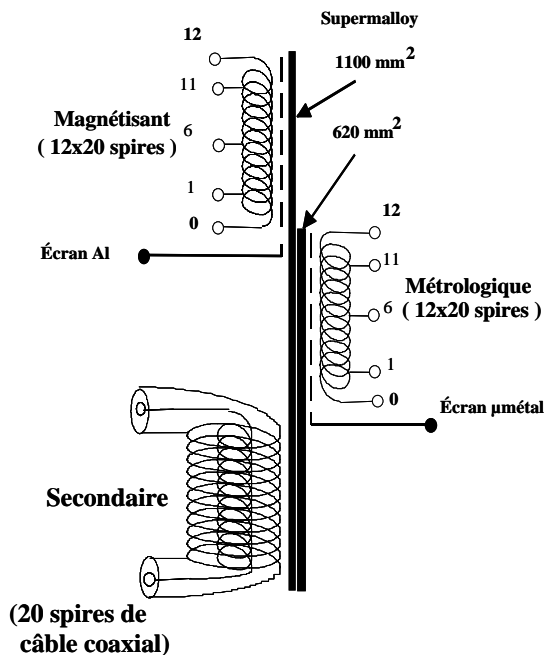


Figure 9 : schéma électrique équivalent du nouveau transformateur de tare

## Conclusion

Les mesures préliminaires réalisées sur ces transformateurs donnent des corrections de rapports de l'ordre de  $1.10^{-6}$  à 800 Hz. Toutefois, la mise en place définitive du banc d'étalonnage nécessite la fabrication d'un deuxième autotransformateur identique à l'appareil présenté. Les incertitudes

attendues sur la connaissance des corrections à apporter aux différents rapports sont de l'ordre de quelques  $10^{-9}$ .

## Références

- [1] G. TRAPON, O.THEVENOT, J.C.LACUEILLE, W. POIRIER. "Determination of the quantized Hall resistance  $R_K$  in terms of the BNM calculable capacitor-Fifteen years of investigations", *Metrologia*, 40, pp.159-171, 2003
- [2] O. THEVENOT, Etalonnage de transformateurs étalons, Mémoire d'ingénieur CNAM, Avril 2003
- [3] T.A. DEACON, J.J. HILL. "Two stage inductive voltage dividers", *PROC. IEE.* Vol. 115, N° 6, june 1968
- [4] B.P. Kibble, G.H. Rayner, "Coaxial AC Bridges", ISBN 0-85274-389-0, disponible auprès du NPL