

# TRANSPOSITION ALTERNATIF-CONTINU EN TENSION JUSQU'À 100 MHz AU LNE

André POLETAEFF, Djamel ALLAL, Dominique LEPRAT

LNE  
29, avenue Roger HENNEQUIN  
78197 TRAPPES  
FRANCE

## Résumé

De nouveaux développements en transposition alternatif-continu ont été réalisés au LNE, afin d'améliorer le niveau de performance du laboratoire dans la métrologie des tensions alternatives pour les fréquences allant de 1 MHz à 100 MHz. Les étalons utilisés, les moyens de mesure ainsi que les méthodes de caractérisation des étalons sont décrits ici. Les performances obtenues sont présentées et les problèmes liés aux connecteurs équipant les convertisseurs sont mis en évidence.

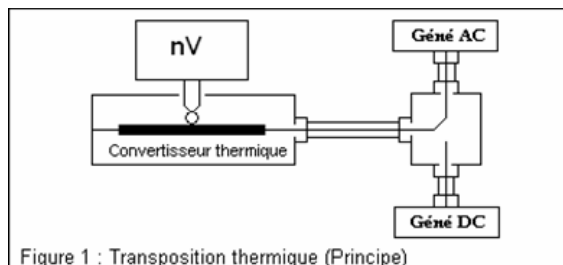
## Abstract

*New developments in the field of AC-DC transfer have been realised at LNE to improve the level of performance of voltage measurements at frequencies ranging between 1 MHz and 100 MHz. Standards used, measurement capability and methods for calibration of these standards are described here. Performances obtained are presented and problems arising from input connectors of thermal converters are underscored.*

## Introduction

La transposition thermique est actuellement le moyen le plus précis pour raccorder les valeurs efficaces des grandeurs mesurées en courant alternatif aux unités servant à mesurer ces grandeurs en régime continu, y compris pour les tensions hautes fréquences. Elle consiste à appliquer successivement le signal alternatif à mesurer et le signal continu de référence à un convertisseur thermique (voir fig. 1). Celui-ci est constitué d'une résistance chauffante et d'un thermocouple destiné à mesurer l'échauffement de cette résistance. Lorsque le niveau du signal continu (de référence) est ajusté de façon à produire la même réponse que le signal alternatif, la valeur efficace de ce dernier est égale à la valeur du signal continu, à l'erreur près du

convertisseur. Pour effectuer un tel raccordement avec la meilleure incertitude, une bonne connaissance de cette erreur, appelée aussi écart de transposition, est indispensable.



Les travaux menés au LNE ont eu pour objet, d'une part la meilleure estimation possible de cette erreur, d'autre part la mise en œuvre de moyens permettant de la mesurer avec la meilleure exactitude.

## Description des étalons

Parmi les étalons utilisés, on distingue ceux qui servent de références primaires, et ceux qui constituent les références secondaires et qui sont raccordés aux premiers.

## Les étalons primaires

Les étalons primaires du LNE sont constitués par des convertisseurs thermiques, développés au NMI-VSL (Pays Bas). Leurs corrections peuvent être déterminées par calcul à partir de leurs caractéristiques électriques et de leur géométrie, pour des fréquences allant de 0,5 MHz à 100 MHz [1,2]. Leur résistance d'entrée est de 800  $\Omega$  et ils présentent une résistance de sortie d'environ 8  $\Omega$ . Ils génèrent une tension d'environ 7 mV en réponse à un signal de valeur nominale égale à 4 V. Ils sont équipés d'un connecteur de type N mâle à l'entrée, et d'un connecteur bifilaire blindé en sortie.

Afin de nous assurer de leur stabilité au cours du temps, ces références sont régulièrement étalonnées au VSL.

## Les étalons secondaires

Les étalons secondaires sont constitués par des convertisseurs thermiques de type HF de différents calibres disponibles sur le marché. Le domaine de tension actuellement couvert au laboratoire va de 0,5 V à 30 V, mais l'extension jusqu'à 100 V est en cours. Comme les références primaires, ces convertisseurs délivrent une tension d'environ 7 mV en réponse à un signal de valeur nominale, mais leur résistance d'entrée dépend de leur calibre. Ils sont par ailleurs équipés de connecteurs d'entrée différents, de type GR 874.

Ces convertisseurs sont raccordés aux références primaires (voir fig. 2) au moyen d'une procédure de « remontée » pour les tensions supérieures à 4 V ou de « step-down » pour les tensions inférieures. La procédure de remontée consiste à étalonner chaque convertisseur par rapport au convertisseur de calibre immédiatement inférieur déjà étalonné, puis de l'utiliser comme référence pour l'étalonnage du convertisseur de calibre immédiatement supérieur, avec comme point de départ les références primaires. Le même principe est appliqué en sens inverse pour l'étalonnage des étalons de calibres inférieurs à la tension nominale des références primaires (step-down).

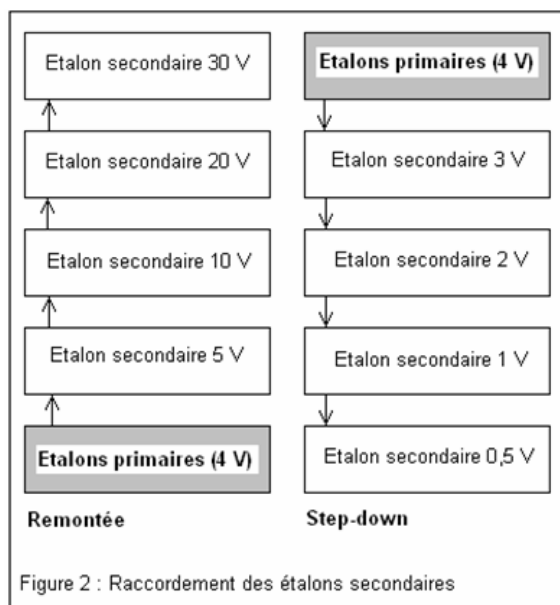


Figure 2 : Raccordement des étalons secondaires

## Le banc de mesure

Afin de pouvoir effectuer des étalonnages dans le cadre des procédures de « remontée » ou de « step-down » ou d'autres raccordements dans le domaine

des tensions HF avec les meilleures incertitudes, nous avons développé un banc d'étalonnage automatique, spécifique à ce domaine de fréquences. Ce banc reprend le principe du banc utilisé pour les étalonnages en tension BF [3].

## Description du banc de mesure

Le schéma du banc de mesure est donné sur la figure 3.

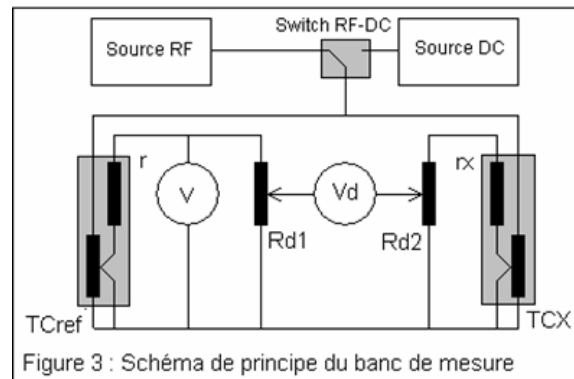


Figure 3 : Schéma de principe du banc de mesure

Les entrées des deux convertisseurs en comparaison,  $TC_{ref}$  et  $TC_X$  sont connectées en parallèle et alimentées successivement, par l'intermédiaire d'un commutateur RF-DC, par la source de tension RF et la source de tension continue.

La source RF est constituée d'un synthétiseur délivrant des niveaux compris entre  $-143$  dBm et  $+23$  dBm à des fréquences allant de 125 kHz à 1040 MHz. Il est associé à un amplificateur d'une puissance maximale de 10 W, couvrant la gamme de fréquence 500 kHz – 1 GHz et dont le gain est ajustable manuellement jusqu'à 40 dB. Une banque de 13 filtres, de fréquences de coupure comprises entre 1,5 MHz et 1300 MHz, connectée à la sortie de l'amplificateur, garanti une forme d'onde pratiquement sinusoïdale.

La source de tension continue est constituée par un calibrateur continu.

Le commutateur RF-DC permet de commuter rapidement la sortie de l'une ou de l'autre source sur l'entrée des convertisseurs thermiques. Sa structure coaxiale, d'impédance caractéristique  $50 \Omega$ , lui permet de transmettre les signaux RF sans provoquer de réflexions lorsqu'il est utilisé avec une ligne adaptée.

Les tensions de sortie des convertisseurs sont mesurées au moyen de deux voltmètres de précision. Le voltmètre V mesure directement la tension de sortie du convertisseur étalon. Le voltmètre  $V_d$  mesure une tension « différentielle » entre les sorties des deux convertisseurs.

Les diviseurs résistifs  $R_{d1}$  et  $R_{d2}$  permettent, par un ajustement adéquat de leurs rapports de division,

de rendre négligeable l'influence de petites variations de la tension d'alimentation sur la tension lue par le voltmètre  $V_d$ . L'incertitude sur cette tension s'avère en effet être la principale composante d'incertitude sur le résultat de l'étalonnage.

## Principe de la mesure

En premier lieu, le diviseur  $R_{d2}$  est ajusté de la façon suivante : si la tension de sortie du convertisseur de référence est supérieure à celle de l'autre convertisseur, le rapport de division de  $R_{d2}$  est réglé à sa valeur maximale, soit 0,9 ; dans le cas contraire, il est réglé de façon à ce que sa tension de sortie soit voisine de la tension de sortie du convertisseur de référence (autrement dit, de façon à pouvoir lire une tension voisine de zéro avec le voltmètre  $V_d$ ).

Ensuite, avant de procéder au cycle de mesure, deux déterminations préliminaires sont à effectuer :

### Détermination des coefficients « n »

La relation entre la tension d'entrée  $E$  d'un convertisseur thermique et sa tension de sortie  $S$  est assez bien décrite par l'expression  $S = g.E^n$ . La connaissance de ce coefficient « n » ( $n_{réf}$  pour le convertisseur de référence,  $n_x$  pour l'autre convertisseur) est nécessaire au calcul du résultat de l'étalonnage.

Pour la détermination de ces coefficients, les tensions continues  $E$  et  $E + \Delta E$  (telles que  $\frac{\Delta E}{E} = 1\%$ ) sont successivement appliquées à l'entrée des convertisseurs et les tensions de sortie  $S$  et  $S + \Delta S$  auxquelles elles donnent lieu sont déduites à partir des mesures faites au moyen des voltmètres  $V$  et  $V_d$ . Les valeurs de ces coefficients sont finalement données par :

$$n_{réf} = \frac{E}{\Delta E} \cdot \frac{\Delta S_{réf}}{S_{réf}} = \frac{E}{\Delta E} \cdot \frac{\Delta V}{V},$$

$$n_x = \frac{E}{\Delta E} \cdot \frac{\Delta S_x}{S_x} = \frac{E}{\Delta E} \cdot \frac{k \cdot \Delta V - \Delta V_d}{k \cdot V - V_d}$$

$k$ , étant le rapport de division du diviseur  $R_{d1}$ ,  $V$  et  $V_d$ , les tensions lues par les voltmètres  $V$  et  $V_d$ .

### Détermination du rapport de division du diviseur $R_{d1}$

La tension continue  $E$  est appliquée à l'entrée des convertisseurs et les tensions  $V$  et  $V_d$  sont mesurées par les deux voltmètres. La valeur  $k$  du rapport à donner au diviseur  $R_{d1}$  est obtenue par :

$$k = \frac{n_x}{n_{réf}} \cdot \frac{k_0 \cdot V - V_d}{V}$$

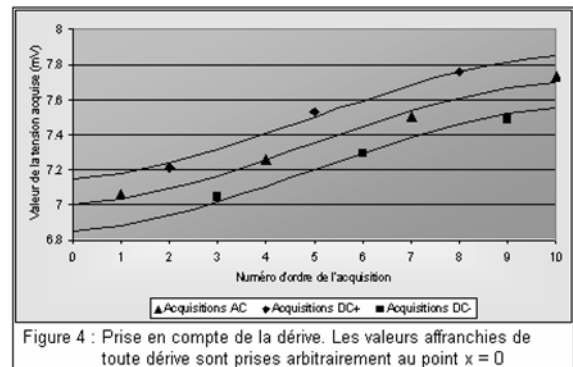
$k_0$  étant la valeur initiale de ce rapport.

La relation ci-dessus traduit la condition  $\frac{\partial V_d}{\partial E} = 0$ . Le diviseur alors est réglé à cette valeur qu'il garde durant toute la suite de l'étalonnage.

### Cycle de mesure

Les tensions alternatives et continues sont alors successivement appliquées sur l'entrée des convertisseurs suivant le cycle AC, DC+, DC-, AC, DC+, DC-, AC, DC+, DC-, AC et les valeurs lues par les deux voltmètres sont à chaque fois enregistrées. A partir de cet ensemble de données, des valeurs finales  $V_a$ ,  $V_c$ ,  $V_{da}$  et  $V_{dc}$  sont calculées par la méthode des moindres carrés, prenant ainsi en compte la dérive du système pendant les mesures (voir fig. 4) qui est modélisée par un polynôme du 3<sup>ème</sup> degré [4] où :

- $V_a$  et  $V_c$  représentent les valeurs des tensions mesurées par le voltmètre  $V$  lorsque les convertisseurs sont alimentés respectivement en alternatif et en continu (en continu c'est la moyenne des tensions mesurées dans les deux polarités qui est prise en compte) affranchies de toute dérive ;
- $V_{da}$  et  $V_{dc}$ , les valeurs des tensions affranchies de toute dérive mesurées dans les mêmes conditions par le voltmètre  $V_d$ .



La différence entre les écarts de transposition  $d_x$  de  $TC_x$  et  $d_{réf}$  de  $TC_{réf}$  est finalement obtenue à partir de cet ensemble de données au moyen de la relation

$$d_x - d_{réf} = \frac{1}{n_{réf}} \cdot \left[ \frac{V_a}{V_c} - 1 \right] - \frac{1}{n_x} \cdot \left[ \frac{k \cdot V_a - V_{da}}{k \cdot V_c - V_{dc}} - 1 \right]$$

## Performances du banc

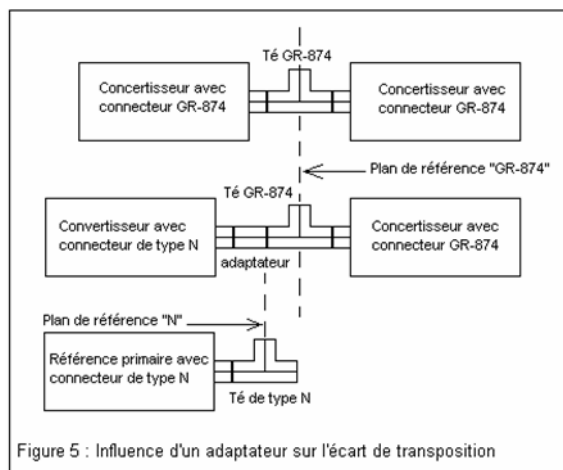
Ce banc permet d'atteindre des incertitudes inférieures à la dizaine de  $\mu\text{V}/\text{V}$  sur la comparaison de convertisseurs, pour des fréquences n'excédant pas 5 MHz et lorsque les mesures sont faites dans des conditions favorables. Ces incertitudes dépendent en effet des convertisseurs en comparaison et se dégradent rapidement pour les fréquences plus élevées.

Ce banc est actuellement utilisable pour effectuer des étalonnages sous des tensions comprises entre 0,5 V et 30 V dans un domaine de fréquences allant de 0,5 MHz et 100 MHz. Une extension des possibilités jusqu'à 100 V est en cours.

Il faut aussi noter que la connectique utilisée pour le branchement des convertisseurs est à l'origine d'une composante d'incertitude qui peut dans certains cas devenir nettement prépondérante.

## Problèmes liés aux connecteurs

Comme nous l'avons indiqué plus haut, les convertisseurs servant de références primaires sont équipés de connecteurs de type N alors que les connecteurs des autres convertisseurs sont de type GR-874. Lors du raccordement, l'étalon primaire, connu dans le plan de référence d'un té de type N, a été connecté au té de type GR-874 (compatible avec les autres convertisseurs) au moyen d'un adaptateur N—GR-874 (voir fig. 5).



Son écart de transposition dans le nouveau plan de référence a été calculé à partir de sa valeur dans le plan de référence du té de type N en utilisant la théorie des lignes de transmission avec prise en compte de l'effet de peau. L'influence de l'adaptateur sur l'écart de transposition obtenue par ce calcul est présentée dans le tableau 1.

Le même modèle a été utilisé pour calculer l'influence d'éléments de ligne de différentes longueurs intercalés entre le convertisseur de référence et le té. La cohérence entre les valeurs

ainsi obtenues et les résultats expérimentaux a confirmé la validité de ce modèle appliqué à ce cas précis.

Fréquence (MHz)	Infl. adapt.
0.5	2
1	1
2	-7
5	-74
10	-321
20	-1320
50	-8335
100	-33436

Tableau 1 : Influence de l'adaptateur N-GR sur l'écart de transposition de la référence primaire ( $\mu\text{V}/\text{V}$ )

## Conclusion

Le LNE dispose maintenant d'étalons de transposition alternatif-continu caractérisés dans le domaine 0,5 V – 30 V / 0,5 MHz – 100 MHz. Il dispose également de moyen de mesures permettant cette caractérisation ainsi que le raccordement d'autres convertisseurs à ces étalons. Une extension des possibilités jusqu'à 100 V est en cours.

Les problèmes de passage de la connectique de type N équipant les références primaires à la connectique de type GR-874 équipant les autres convertisseurs ont été étudiés et pris en compte.

## Références

- [1] M. NOMAIR and C. HARMANS, "High accuracy calculable AC-DC transfer standards for the LF – 30 MHz frequency range", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 38, pp 342-345, 1989.
- [2] C. J. VAN MULLEM, W. J. G. D. JANSSEN and J. P. M. DE VREEDE, "Evaluation of the calculable high frequency AC-DC standards", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 46, n°2, pp 361-364, April 1997.
- [3] A. POLETAEFF, "Automated comparator for accurate AC-DC difference measurements at the BNM-LCIE", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 48, n°2, pp 412-414, April 1999.
- [4] P. MARTIN and R. B. D. KNIGHT, "Components and systems for AC-DC transfer at the ppm level", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. IM-32, pp 63-72, 1988.