

Qualification métrologique des nouveaux bancs de référence de couple de 5 N·m et de 50 N·m du LNE

Metrological qualification of the new 5 N·m and 50 N·m torque standard machines of LNE

Carole DUFLON et Philippe AVERLANT

Laboratoire National de métrologie et d'Essais, 1 Rue Gaston Boissier, 75724 Paris Cedex 15, France, carole.duflon@lne.fr.

Résumé

Suite au développement des nouveaux bancs de référence de couple de 5 N·m et 50 N·m le LNE a réalisé leur qualification métrologique. Cet article présente la détermination des incertitudes sur les couples étalons générés par ces bancs, notamment la composante liée à la mobilité et à la sensibilité du bras. Il présente également les comparaisons bilatérales réalisées avec les laboratoires nationaux de métrologie espagnol (CEM) et allemand (PTB). Les résultats obtenus montrent que les incertitudes estimées sont satisfaisantes. En effet, les incertitudes sur les références de couples ont été divisées par un facteur d'au moins cinq par rapport aux anciens bancs du LNE.

MOTS CLÉS : BANC DE RÉFÉRENCE DE COUPLE, INCERTITUDE, COMPARAISON.

Abstract

After the development of two new torque standard machines, LNE realized their metrological qualification. This paper describes the determination of the uncertainties of these torque standard machine, including the uncertainty due to the mobility and the sensitivity of the moment arm. It describes also the comparisons carried out with the national metrology institutes of Spain (CEM) and Germany (PTB). The results show that the estimated uncertainties are satisfactory because divided by a factor of at least five compared to the old standard machines.

KEY WORDS: TORQUE STANDARD MACHINE, UNCERTAINTY, COMPARISON.

1. Introduction

Le banc de référence de couple de 50 N·m a été développé [1] dans le but de mettre à niveau les références en métrologie des couples du laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). En effet, les bancs d'étalonnage

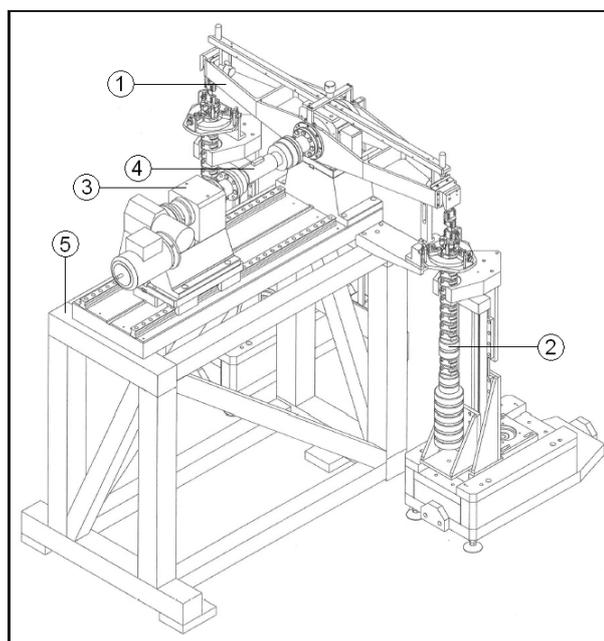


Fig. 1. – Schéma du nouveau banc couple de 50 N·m du LNE.

actuels, de conception ancienne, ont des incertitudes de mesure qui ne répondent plus aux besoins de raccordement de l'industrie.

Le banc de référence de couple de 50 N·m (fig. 1 et 2) est composé d'un bras (1), d'une chaîne de masse de chaque côté de ce bras (2), d'une poutre mobile (3), des



Fig. 2. – Photo du nouveau banc couple de 50 N·m du LNE.

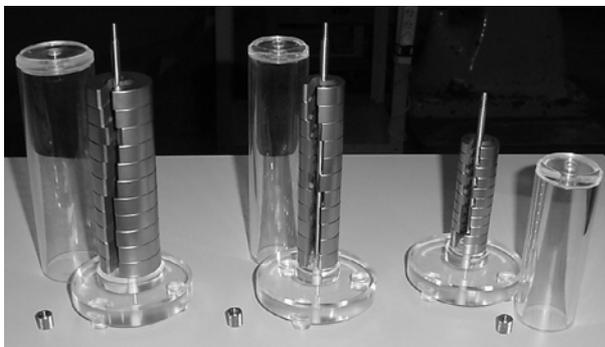


Fig. 3. – Photographie des masses du nouveau banc couple de 5 N·m du LNE.

interfaces pour le montage de couplemètre (4), un bâti (5) et d'un carter de protection.

La conception choisie pour les bancs 5 N·m et 50 N·m [1] avec l'utilisation d'un palier à air et une géométrie rigoureuse permettait d'espérer une incertitude 5 fois moins élevée que les incertitudes des anciens bancs.

Le banc de 5 N·m utilise le même bâti et le même bras que le banc de 50 N·m. Le banc de 5 N·m est à dépose de masses manuelle (fig. 3) et celui de 50 N·m à dépose automatique. Le banc de 5 N·m a permis d'étendre

le domaine d'étalonnage vers les petits couples. Le premier palier d'étalonnage qui était de 1 N·m est maintenant de 0,1 N·m.

La qualification métrologique présentée dans cet article comporte une estimation de chacune des composantes d'incertitude et notamment celle liée à la sensibilité et à la mobilité du bras de levier et de son palier. Des comparaisons bilatérales avec les laboratoires nationaux de métrologie espagnol (*Centro Español de Metrología*, CEM) et allemand (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, PTB) ont été réalisées et les écarts obtenus sont également présentés.

2. Incertitude du banc de couple étalon de 50 N·m

Les composantes d'incertitudes sur le couple étalon (C), de 1 N·m à 50 N·m, généré par le banc de 50 N·m (fig. 1) sont estimées en distinguant l'incertitude sur la force, sur la longueur du bras de levier et sur la transmission du couple.

De plus, comme ce banc est équipé d'un palier à air, contrairement aux anciens bancs qui étaient équipés de roulement à billes, nous avons approfondi la qualification de la mobilité et de la sensibilité du bras.

Le détail des composantes d'incertitudes est donné dans les paragraphes 2.1 à 2.4.

2.1. Incertitude sur la force appliquée sur le bras

L'incertitude sur la force appliquée à l'extrémité du bras de levier a été déterminée de façon identique à la détermination de l'incertitude sur les forces étalons appliquées par les bancs de force à masses suspendues du LNE et notamment le banc de 5 kN [2].

2.1.1. Incertitude sur la masse

La détermination des masses a été réalisée avec une incertitude type inférieure ou égale à $0,86 \times 10^{-6} \times M_C$. (M_C : valeur conventionnelle de la masse).

Les masses ont été ajustées à une valeur cible permettant d'obtenir une valeur numérique ronde lors du calcul du couple appliqué. La tolérance d'ajustage des masses, égale à $\pm 1,5 \times 10^{-6} \times M_C$ est retenue comme estimation de l'incertitude type de justesse.

En l'absence d'informations particulières sur la stabilité de la masse consécutivement à son encrassement et à l'usure des parties en contact, une incertitude type de conservation égale à l'incertitude type d'étalonnage a été retenue, ainsi qu'il est courant de pratiquer en métrologie des masses.

2.1.2. Incertitude due à l'accélération de la pesanteur

La valeur moyenne de l'accélération de la pesanteur dans le laboratoire a été déterminée à partir de la mesure

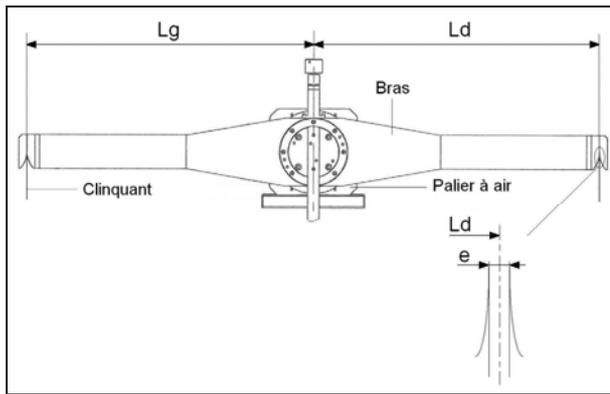


Fig. 4. – Schéma du bras avec clinquants.

réalisée par liaison gravimétrique avec le point de référence A3 du BIPM à Sèvres.

Pour le couple généré C , la composante d'incertitude type due à l'accélération de la pesanteur est prise égale à $3,1 \times 10^{-7} \times C$.

2.1.3. Incertitude due à la poussée de l'air

Une correction est appliquée systématiquement sur les valeurs des forces pour tenir compte de la poussée de l'air. Les variations de la poussée de l'air autour de cette correction systématique sont prises en compte dans l'incertitude. Elles sont fonction de la masse volumique des masses et des variations de la masse volumique de l'air. La masse volumique des masses a été déterminée sur des échantillons. Elle est supérieure à $8\,400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Les variations relatives de la masse volumique de l'air restent inférieures à $\pm 3 \%$.

Il en résulte une composante d'incertitude type due à la correction de la poussée de l'air, sans correction de ses variations, égale à $1,4 \times 10^{-6} \times C$.

2.2. Incertitude sur la longueur du bras

2.2.1. Incertitude sur la détermination de la longueur

Les longueurs des parties gauche (L_g) et droite (L_d) du bras (fig. 4) ont été ajustées à une valeur cible de 500 mm (L) afin d'obtenir une valeur numérique ronde lors du calcul du couple appliqué. Les longueurs L_g et L_d ont été mesurées sur une machine à mesurer tridimensionnelle avec une incertitude type égale à $8,3 \times 10^{-6} \times L$. La tolérance d'ajustage des longueurs, égale à $\pm 6,1 \times 10^{-6} \times L$ est retenue comme estimation de l'incertitude type de justesse.

En l'absence d'usure au niveau du bras, la dérive de la longueur est négligée. Toutefois, une incertitude type de dérive égale à l'incertitude type d'étalonnage a été retenue de façon conservative.

Enfin, la force engendrée par les masses est appliquée à l'extrémité du bras de levier par l'intermédiaire d'un

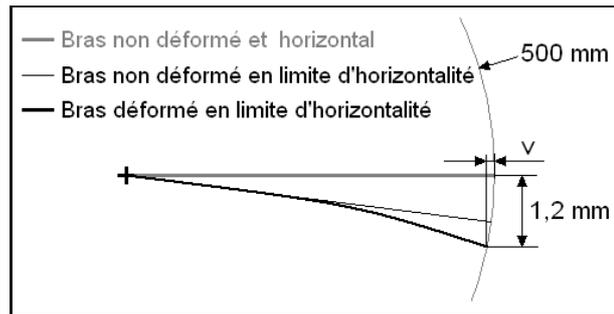


Fig. 5. – Schéma de la déformation sous charge et du défaut d'horizontalité du bras.

clinquant d'épaisseur (e) de 0,2 mm. Il existe une incertitude sur le positionnement de la force qui correspond à la résultante des efforts dans l'épaisseur du clinquant. Il est fait l'hypothèse que la résultante de la force se trouve à la moitié de l'épaisseur du clinquant [3] avec une incertitude type de 0,02 mm soit une composante d'incertitude sur la génération de C de $1,3 \times 10^{-5} \times L$ (loi normale).

2.2.2. Incertitude due à la correction et à la variation de température

L'étalonnage ayant été réalisé à une température moyenne légèrement différente de la température moyenne d'utilisation, le résultat de l'étalonnage est corrigé en fonction des coefficients de dilatation thermique des éléments composant le bras (majoritairement en aluminium). L'effet des variations de la température d'étalonnage et d'utilisation est pris en compte en fonction de ces coefficients de dilatation.

La composante d'incertitude type due à la correction et aux variations de température est égale à $1,6 \times 10^{-5} \times L$.

Une règle en Invar, donc à faible coefficient de dilatation thermique, montée à demeure et équipée de deux capteurs de déplacement capacitifs, permet de mesurer les déplacements des extrémités du bras en aluminium. Cette règle peut ainsi être utilisée pour surveiller les dilatactions thermiques du bras et le respect des valeurs maximales tolérées.

2.2.3. Incertitude due à la déformation sous charge et au défaut d'horizontalité

La déformation sous charge est estimée à partir du calcul de la flexion d'une poutre d'épaisseur 8 mm, de longueur 500 mm et de hauteur 60 mm en alliage d'aluminium 7075 soumise à une charge de 50 N. Cette flexion est de l'ordre de 0,2 mm. De plus, la tolérance de positionnement du bras par rapport à l'horizontalité est de $\pm 1 \text{ mm}$ au bout de 500 mm. Ainsi, une pente maximale de 1,2 mm pour une longueur de 500 mm est retenue. Cela représente une variation (v) de la longueur projetée inférieure à $1,5 \mu\text{m}$ (fig. 5), soit une composante d'incertitude type de $1,7 \times 10^{-6} \times L$ (en considérant une loi uniforme).

Tableau 1

Composantes d'incertitude du couple étalon C du banc de 50 N·m.

Origine de l'incertitude	Incertitude type sur C (en N·m)
Force appliquée sur le bras	$2,4 \times 10^{-6} \times C$
Longueur du bras	$2,5 \times 10^{-5} \times C$
Mobilité/Sensibilité du bras	$140,0 \times 10^{-6} + 4,7 \times 10^{-6} \times C$
Transmission du couple	$10,0 \times 10^{-5} + 1,0 \times 10^{-5} \times C$

2.3. Incertitude due à la sensibilité et la mobilité du bras

Le résultat d'un étalonnage en couple est exprimé en déformation du capteur pour une différence de couple connue. Lors du relevé des indications, le bras se situe dans une zone angulaire de ± 1 mm au bout de la longueur de 500 mm. Cette zone angulaire crée une variation de couple liée à la sensibilité et à la mobilité. La sensibilité est liée à la différence de positionnement entre l'axe de rotation et le centre de gravité du bras. La mobilité est liée au frottement de l'axe de rotation.

La sensibilité/mobilité a été déterminée à l'aide d'un couplemètre de 5 N·m ayant une résolution inférieure à 0,03 mN·m. Les indications sont relevées pour les deux positions extrêmes du bras.

Des mesures ont été réalisées pour plusieurs valeurs de charges radiales : bras seulement et bras avec des masses de chaque côté. La charge radiale a été réalisée avec les chaînes de masses des bancs. Ces mesures nous ont permis de retenir une tolérance maximum de mobilité/sensibilité de $\pm(30,0 \times 10^{-5} + 1,0 \times 10^{-5} \times C)$ N·m. La mobilité/sensibilité intervenant deux fois (à couple nul et sous charge), la composante d'incertitude type est prise égale à la tolérance multipliée par $\sqrt{2}$ et divisée par 3 (loi normale). Elle est égale à $(140,0 \times 10^{-6} + 4,7 \times 10^{-6} \times C)$ N·m.

2.4. Incertitude due à la transmission du couple

La composante d'incertitude liée au transfert des couples est estimée à partir des résultats de la comparaison réalisée avec le CEM et présentée en partie 4. L'écart maximum observé sur la gamme de 1 N·m à 50 N·m est de $(30,0 \times 10^{-5} + 3,0 \times 10^{-5} \times C)$ N·m et la composante d'incertitude type est prise égale à $(10,0 \times 10^{-5} + 1,0 \times 10^{-5} \times C)$ N·m (loi normale).

2.5. Bilan d'incertitude pour le banc de 50 N·m

Les résultats de l'estimation des composantes d'incertitude du banc de 50 N·m sont présentés dans le tableau 1.

Les quatre composantes d'incertitude permettent d'estimer l'incertitude sur le couple C, variant de 1 N·m à 50 N·m, généré avec le banc de 50 N·m. L'incertitude élargie ($k = 2$) est estimée à :

$$(50,0 \times 10^{-5} + 5,0 \times 10^{-5} \times C) \text{ N·m.}$$

3. Incertitude du banc de couple étalon de 5 N·m

Le banc de 5 N·m utilise le même bras et le même bâti que le banc 50 N·m, seules les masses utilisées sont différentes (masses individuelles pour le banc 5 N·m, fig. 3). Le banc de 5 N·m permet de générer un couple étalon (C) de 0,1 N·m à 5 N·m.

3.1. Incertitude sur la force appliquée sur le bras

La détermination des masses a été réalisée avec une incertitude type inférieure ou égale à $2,0 \times 10^{-6} \times M_C$. (M_C : valeur conventionnelle de la masse).

La tolérance d'ajustage des masses, égale à $\pm 1,0 \times 10^{-5} \times M_C$ est retenue comme estimation de l'incertitude type de justesse.

Plusieurs étalonnages des masses ont été réalisés et ont permis de retenir une tolérance de conservation de $\pm 1,0 \times 10^{-5} \times M_C$. L'incertitude type est prise égale à $5,8 \times 10^{-6} \times M_C$ (en considérant une loi uniforme).

3.2. Incertitude sur la longueur du bras

Le bras étant commun aux deux bancs, les estimations présentées au paragraphe 2.2 sont reprises à l'identique pour le banc de 5 N·m.

3.3. Incertitude sur la sensibilité et la mobilité du bras

Cette composante est déterminée comme pour le banc de 50 N·m avec des charges radiales adaptées.

La tolérance de sensibilité/mobilité retenue en fonction des résultats obtenus est de $\pm(15,0 \times 10^{-5} + 2,0 \times 10^{-5} \times C)$ N·m. La mobilité/sensibilité intervenant deux fois (à couple nul et sous charge), la composante d'incertitude type est prise égale à la tolérance multipliée par $\sqrt{2}$ et divisée par 3 (loi normale). Elle est égale à $(70,0 \times 10^{-6} + 9,4 \times 10^{-6} \times C)$ N·m.

3.4. Incertitude sur la transmission du couple

La composante d'incertitude liée au transfert des couples est estimée à partir des résultats de la comparaison réalisée avec la PTB et présentée en partie 4. L'écart maximum observé sur la gamme de couples de 0,1 N·m à 5 N·m est de $(14,0 \times 10^{-5} + 4,0 \times 10^{-5} \times C)$ N·m et la composante d'incertitude type est prise égale à $(5,0 \times 10^{-5} + 1,3 \times 10^{-5} \times C)$ N·m (loi normale).

3.5. Bilan d'incertitude pour le banc de 5 N·m

Les résultats de l'estimation des diverses composantes d'incertitude du banc de 5 N·m sont présentés dans le tableau 2.

Les quatre composantes d'incertitude permettent d'estimer l'incertitude sur le couple C, variant de 0,1 N·m

Tableau 2

Composantes d'incertitude de couple étalon du banc 5 N·m.

Origine de l'incertitude	Incertitude type sur C (en N·m)
Force appliquée sur le bras	$1,2 \times 10^{-5} \times C$
Longueur du bras	$2,5 \times 10^{-5} \times C$
Mobilité/sensibilité du bras	$70,0 \times 10^{-6} + 9,4 \times 10^{-6} \times C$
Transmission du couple	$5,0 \times 10^{-5} + 1,3 \times 10^{-5} \times C$

à 5 N·m, généré avec le banc de 5 N·m. L'incertitude élargie ($k = 2$) est estimée à :

$$(20,0 \times 10^{-5} + 5,0 \times 10^{-5} \times C) \text{ N·m.}$$

4. Comparaisons interlaboratoires

Deux comparaisons ont été réalisées : chacune pour un banc du LNE. Dans ces comparaisons bilatérales, les capteurs de transfert utilisés étaient des couplemètres Raute type TT1 associés à un pont de mesure HBM type MGC plus ABB22A.

Dans chaque laboratoire, l'étalonnage de chaque capteur a été réalisé en effectuant, dans l'ordre, les opérations suivantes :

- trois applications de la charge maximale du capteur pendant environ trente secondes avec retour à zéro entre chacune pendant environ trente secondes ;
- application d'un minimum de trois séries de charges par valeurs croissantes et d'au minimum une série de charges par valeurs décroissantes sans retour à charge nulle entre chaque palier. Les mesures sont relevées après trente secondes environ ;
- rotation du capteur autour de son axe.

4.1. Comparaison du banc de 50 N·m avec le CEM

Le laboratoire national de métrologie espagnol, CEM (*Centro Español de Metrología*), a utilisé son banc de 1 000 N·m, dont l'incertitude élargie ($k = 2$) sur le couple C généré est $(2,0 \times 10^{-5} \times C)$ N·m.

Le domaine de comparaison était de 1 N·m à 50 N·m. Quatre couplemètres d'étendue de mesure respective de 5 N·m, 10 N·m, 20 N·m et 50 N·m ont été utilisés. Les écarts par rapport au banc de 50 N·m du LNE sont présentés en figure 6. Les barres verticales représentent l'incertitude élargie ($k = 2$) sur le couple généré par chaque laboratoire.

L'écart maximum de comparaison observé avec le CEM est égal à $(30,0 \times 10^{-5} + 3,0 \times 10^{-5} \times C)$ N·m.

4.2. Comparaison du banc de 5 N·m avec la PTB

Le laboratoire national de métrologie allemand, PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*), a utilisé ses bancs de 1 000 N·m et de 1 N·m. L'incertitude élargie

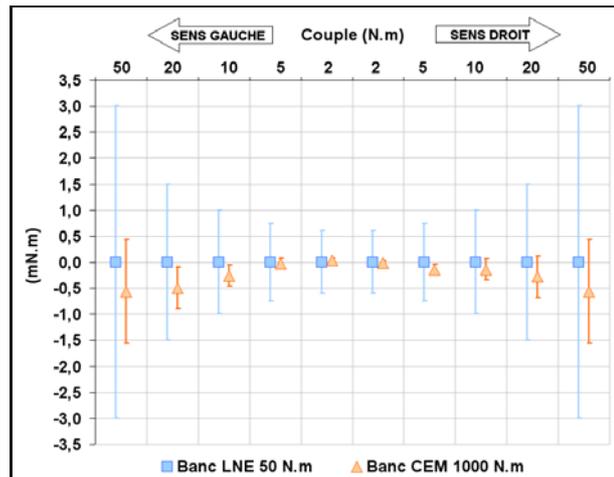


Fig. 6. – Écarts entre les mesures du LNE (banc de 50 N·m) et du CEM (banc de 1 000 N·m).

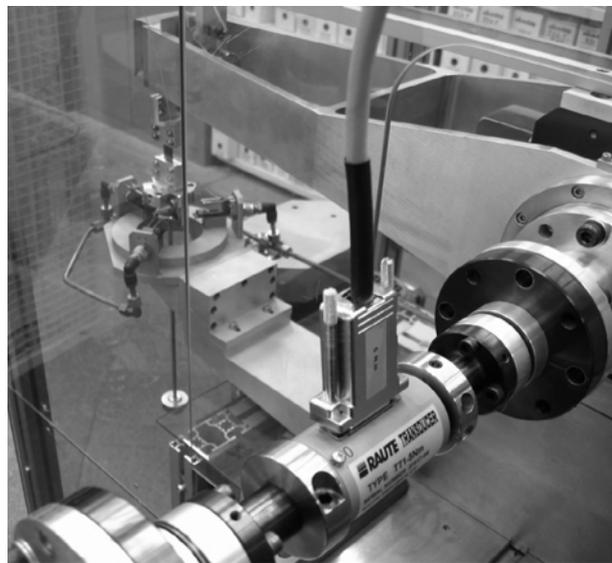


Fig. 7. – Couplemètre Raute TT1 5 N·m sur banc de 5 N·m du LNE.

($k = 2$) sur le couple C appliqué est $(2,0 \times 10^{-5} \times C)$ N·m avec le banc de 1 000 N·m et de $(1,0 \times 10^{-4} \times C)$ N·m avec le banc de 1 N·m.

Le domaine de comparaison s'étendait de 0,1 N·m à 5 N·m. Un couplemètre d'une étendue de mesure de 5 N·m a été utilisé (fig. 7).

Les mesures réalisées par le PTB et le LNE sont présentées sous forme d'écarts par rapport aux mesures du LNE réalisées sur le banc de 5 N·m. La figure 8 présente les résultats de la comparaison avec le banc du PTB de 1 000 N·m et la figure 9 ceux de la comparaison avec le banc du PTB de 1 N·m.

Les barres verticales représentent l'incertitude élargie ($k = 2$) sur le couple généré par chaque laboratoire.

L'écart maximum de comparaison observé avec le laboratoire national de métrologie allemand (PTB) est égal à $(14,0 \times 10^{-5} + 4,0 \times 10^{-5} \times C)$ N·m.

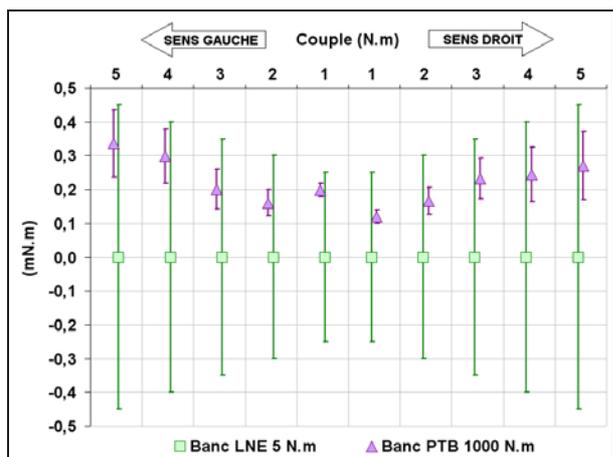


Fig. 8. – Écarts entre les mesures de LNE avec le banc de 5 N·m et du PTB avec le banc de 1 000 N·m.

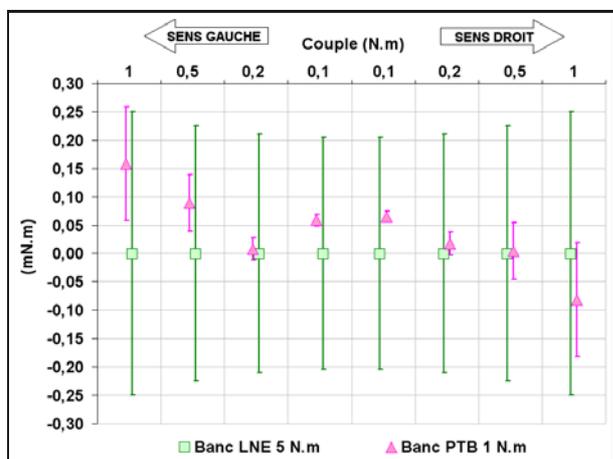


Fig. 9. – Écarts entre les mesures du LNE (banc de 5 N·m) et du PTB (banc de 1 N·m).

Article reçu le 29 mars 2013, version révisée reçue le 26 mai 2014.

5. Conclusion

La qualification métrologique des bancs de 5 N·m et 50 N·m a permis d'estimer les incertitudes élargies ($k = 2$) suivantes :

$$(20,0 \times 10^{-5} + 5,0 \times 10^{-5} \times C) \text{ N}\cdot\text{m de } 0,1 \text{ N}\cdot\text{m à } 5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$(50,0 \times 10^{-5} + 5,0 \times 10^{-5} \times C) \text{ N}\cdot\text{m de } 1 \text{ N}\cdot\text{m à } 50 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Les comparaisons bilatérales réalisées avec les laboratoires nationaux de métrologie espagnol (CEM) et allemand (PTB) montrent que ces incertitudes sont cohérentes.

Ainsi, les incertitudes sur les références de couples ont été divisées par un facteur d'au moins cinq par rapport aux anciens bancs du LNE.

Ces nouvelles incertitudes sont supérieures à celles d'autres laboratoires nationaux de métrologie mais sont suffisantes pour les besoins actuels de l'industrie. Si les besoins industriels évoluent, il sera possible d'améliorer ces incertitudes avec la mise en œuvre de clinquants plus fins et/ou une amélioration de la maîtrise de l'effet thermique sur la longueur du bras.

Cette qualification métrologique a permis de valider les choix technologiques et le processus de qualification qui va être appliqué pour les prochains bancs 500 N·m et 5 000 N·m en cours de développement.

Références

- [1] AVERLANT P. et GOSSET A., « Développement du banc de référence de couple de 50 N·m », *20th Imeko Conference on Measurement of Force, Mass and Torque (TC3)*, Merida, Mexique, 27 nov.–1^{er} déc. 2007.
- [2] AVERLANT P. et GOSSET A., « Nouvelle référence de force de 5 kN du LNE », *11^e Congrès International de Métrologie*, Toulon, France, 20–23 octobre 2003.
- [3] RÖSKE D., “Some problems concerning the lever arm length in torque metrology”, *Measurement*, **20**, 1, 1997, 23–32.