

# Extension en basse fréquence et amélioration des incertitudes du banc d'étalonnage primaire des accéléromètres

## *Extension to low frequency and improvement of the uncertainties of the accelerometer primary calibration bench*

Claire BARTOLI, Philippe AVERLANT et Cédric de WAUBERT

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

### Résumé

Le raccordement des mesures d'accélération de l'industrie aux étalons nationaux est assuré en France par le LNE. Cette traçabilité aux étalons nationaux est nécessaire pour les industriels ayant des processus où la connaissance des paramètres liés à l'accélération est primordiale en termes de qualité et de sécurité, comme les domaines de l'armement, du nucléaire, de l'aérospatiale ou de l'automobile.

Ainsi, les étalonnages des accéléromètres de référence des industriels et autres laboratoires sont réalisés sur le site de Trappes du LNE depuis 2006 par méthode absolue mettant en œuvre un interféromètre laser de Michelson selon la norme ISO 16063. Cependant, le banc utilisé, présenté dans l'article « Transfert du banc de référence en accélérométrie du CEA/Cesta au LNE » (RFM n° 10, 2007), est de conception ancienne et un programme de rénovation a été défini et engagé au moment du transfert.

Cet article présente la remise à niveau de ce banc et les améliorations apportées. Les caractéristiques des éléments constitutifs du banc sont exposées. Il s'agit de l'interféromètre laser, de l'excitateur et du système d'acquisition et d'analyse. Pour couvrir les besoins de raccordements primaires pour les fréquences de vibrations inférieures à 10 Hz, un excitateur spécifique pour les basses fréquences a été approvisionné.

La qualification métrologique du banc a été prononcée à partir de la cohérence entre les résultats d'étalonnage d'accéléromètres obtenus à l'aide du banc dans sa configuration finale et ceux obtenus avec le banc d'origine ainsi qu'à partir des comparaisons interlaboratoires.

**MOTS CLÉS :** ACCÉLÉROMÈTRE, VIBRATION, ÉTALONNAGE.

### Abstract

*The national accelerometry references in France are provided by the LNE. Such traceability to national standards is essential for*

*industrial organisations using processes in which an understanding of acceleration related parameters is of primary importance in terms of quality and safety. These fields include the armaments, nuclear, aerospace and automotive industries.*

*The calibration of reference accelerometers for industries and other laboratories has been carried out on the LNE site at Trappes since 2006, using an absolute method involving a Michelson laser interferometer in accordance with standard ISO 16063. The bench used, which is described in "Transfert of the french accelerometry reference from CEA/Cesta to LNE" (RFM n° 10, 2007) is however of an old design and an upgrading program has been drawn up and carried out.*

*This article describes the upgrade of this bench and the improvements. The characteristics of the components of the bench are described. These are the laser interferometer, the shaker and the acquisition and analysis system. In order to cover requirements for traceability chains for vibration frequencies below 10 Hz, a specific shaker for low frequencies has been sourced.*

*Metrological approval was based on the consistency achieved between the calibration results for given accelerometers obtained using the new bench and those obtained using the original bench and on the interlaboratory comparisons.*

**KEY WORDS:** ACCELEROMETER, VIBRATION, CALIBRATION.

### 1. Introduction

Le banc utilisé auparavant, pour les raccordements nationaux en moyenne et haute fréquences, mettait en œuvre la méthode 1 dite « de comptage de franges » et la méthode 2 dite « de recherche des zéros » décrites dans les normes 16063-1 et 16063-11 [1].

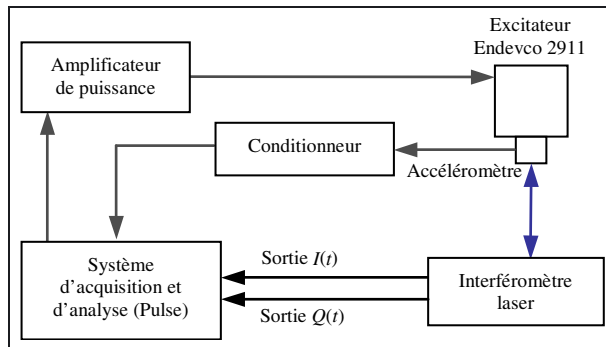


Fig. 1. – Schéma du banc d'étalonnage après mise à jour.

Tous les éléments du banc dataient de 1974 excepté le logiciel de post-traitement des données qui a été transcrit dans un tableur lors du transfert du banc depuis le CEA/CESTA en 2006. Le risque de panne était important et les réparations n'étaient pas toujours possibles. Le LNE avait donc décidé de mettre à jour ce banc avec pour but de :

- fiabiliser les moyens ;
- diminuer les temps d'étalonnage ;
- améliorer les incertitudes sur la sensibilité de l'accéléromètre.

La mise à jour des trois parties constitutives du banc a été engagée :

- l'interféromètre laser ;
- le système d'acquisition et d'analyse ;
- l'excitateur « moyenne et haute fréquences ».

Les matériels approvisionnés sont :

- un interféromètre de Mach Zehnder hétérodyne à deux sorties en quadrature de phase. Sa qualification est présentée dans la partie 2 ;
- un système d'acquisition et d'analyse Pulse 5309 mettant en œuvre la méthode 3 utilisant la transformation de Fourier sur tout le domaine fréquentiel. Sa qualification est présentée en partie 3 ;
- un excitateur électrodynamique « moyenne et haute fréquences » Endevco 2911 par palier à air. Sa qualification est présentée en partie 4.

De plus, un excitateur « basse fréquence » APS 500 travaillant sur une gamme de 0,5 Hz à 160 Hz a été approvisionné et qualifié (partie 5 de l'article).

La figure 1 présente le banc dans sa nouvelle configuration.

Afin de dissocier les sources d'écart possibles et de permettre la continuité métrologique, la qualification des nouveaux matériels a été menée élément par élément. Le plus sensible étant le laser, le programme de mise à jour

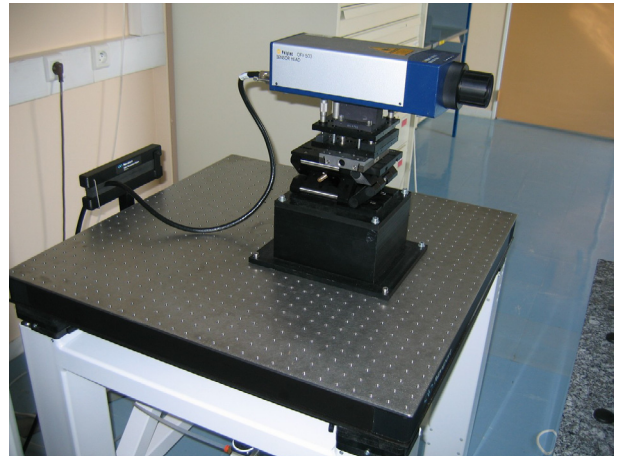


Fig. 2. – Nouvel interféromètre laser.

a commencé par celui-ci. L'élément suivant a été le système d'acquisition et d'analyse puis l'excitateur électrodynamique « moyenne et haute fréquences ». La qualification de l'excitateur « basse fréquence » a ensuite été menée.

L'incertitude élargie ( $k = 2$ ) sur la détermination de la sensibilité d'un accéléromètre ou d'une chaîne accélérométrique dans la configuration transférée depuis le CEA/CESTA était de 1,0 % de 10 Hz à 30 Hz et 0,60 % de 30 Hz à 10 kHz.

Elle est maintenant de 0,30 % de 0,5 Hz à 5 kHz, 0,60 % de 5 Hz à 7 kHz et 1,0 % de 7 Hz à 10 kHz.

## 2. Changement de l'interféromètre laser

L'interféromètre d'origine était un interféromètre de Michelson éclaté où tous les éléments étaient réglables (lentille, polariseur...) et présentait une seule sortie. Le nouvel interféromètre laser (fig. 2) permet la mise en œuvre de la méthode 3 par approximation sinusoïdale [1].

Les principales étapes de la qualification ont été les suivantes :

- la mesure des niveaux vibratoires de l'interféromètre qui est fixé sur une table isolée. Le mouvement propre de l'interféromètre est en effet de nature à fausser la mesure du déplacement de l'accéléromètre ;
- le raccordement métrologique de la longueur d'onde du laser ;
- la comparaison des résultats d'étalonnage de trois capteurs étalons obtenus avec le nouvel interféromètre et celui d'origine.

### 2.1. Mesure des niveaux vibratoires

La norme 16063-11 [1] définit un niveau maximal de vibration résiduel au niveau de l'interféromètre de 0,1 %. Les niveaux mesurés dans les directions longitudinale et transversale à la vibration pendant un étalonnage ont été

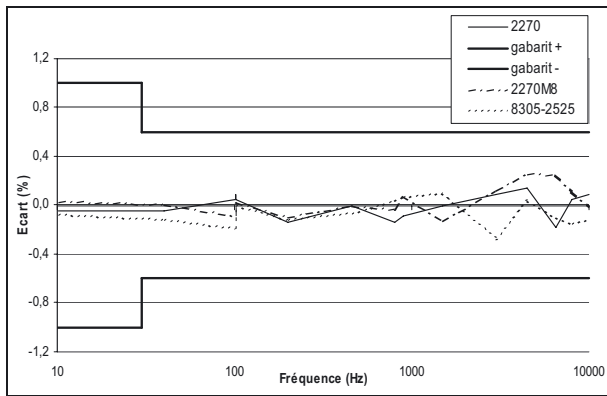


Fig. 3. – Écarts entre les étalonnages réalisés avant et après le changement de laser.

mesurés inférieurs à 0,05 % du niveau d’excitation sur la gamme de fréquences 10 Hz–10 000 Hz.

## 2.2. Raccordement de la mesure de longueur d’onde

La source laser de l’interféromètre de Mach-Zehnder est un laser non-stabilisé dont la longueur d’onde et l’écart type relatif sont définis dans [2]. Les valeurs définies et retenues dans les calculs sont une longueur d’onde de 632,9908 nm dans le vide et un écart type relatif de  $1,5 \times 10^{-6}$ .

## 2.3. Comparaisons avant et après le changement de laser

Les trois capteurs étalons définis lors de la qualification du banc après son transfert [3] sont utilisés pour le suivi métrologique du banc. Ils ont également été utilisés pour qualifier les nouveaux éléments du banc « moyenne et haute fréquences ». Il s’agit de deux capteurs dits « à la base » : un Endevco 2270M8 et un Bruel & Kjaer 8305-001. Le troisième capteur est un Endevco 2270 dit « au sommet ». Ces trois capteurs sont reconnus pour leur stabilité métrologique et sont utilisés dans de nombreux laboratoires nationaux. Le capteur 8305-001 est utilisé comme accéléromètre et comme chaîne accélérométrique (couplé avec l’amplificateur de charge Bruel & Kjaer 2525).

Les étalonnages ont été réalisés par deux opérateurs différents pour valider leur qualification sur le nouveau moyen et à deux périodes différentes pour qualifier également la dérive à court terme.

La figure 3 représente les écarts relatifs entre les deux configurations pour chaque capteur et à chaque point fréquentiel d’étalonnage.

Les écarts constatés entre les étalonnages réalisés avec les deux interféromètres laser sont inférieurs aux incertitudes du banc, *i.e.* non significatifs. Ces résultats ont donc permis de valider le banc de référence en accélérométrie suite au changement d’interféromètre laser.

## 3. Changement du système d’acquisition et d’analyse

### 3.1. Présentation des méthodes et des moyens

Les méthodes dites « de comptage des franges » et la méthode 2 dite « de détection des zéros de la fonction de Bessel » mettaient en œuvre un voltmètre, un filtre analogique et un fréquencemètre compteur.

Le système approvisionné est un système d’acquisition et d’analyse Pulse Bruel & Kjaer. Il est composé d’un frontal d’acquisition et d’un logiciel sur micro-ordinateur qui réalise les mesures en temps réel et en post-traitement. Il utilise notamment la transformée de Fourier en accord avec la norme ISO 16063-11 [1, 3]. La comparaison réalisée prend donc en compte le changement de système et de méthode.

La comparaison a été menée en utilisant un capteur à la base et un capteur au sommet. Dans le but de ne comparer que les méthodes et les moyens, les accéléromètres n’ont pas été démontés pendant les étalonnages.

### 3.2. Présentation de la méthode 3

Cette méthode est applicable sur la gamme 0,5 Hz à 10 000 Hz sans critère sur le déplacement ou l’accélération.

Les signaux de sortie de l’interféromètre laser sont de la forme suivante :

$$I = I_0 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot x\right) \quad \text{et}$$

$$Q = Q_0 \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} x\right) = Q_0 \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left(x + \frac{\lambda}{8}\right)\right).$$

Avec  $x$  défini comme le déplacement mesuré par l’accéléromètre et  $\lambda$  la longueur d’onde du laser. Les signaux  $I$  et  $Q$  sont déphasés spatialement de  $\lambda/8$ , quel que soit le déplacement.

Le déplacement vu du laser est donc de :

$$x_L = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \arctan\left(\frac{Q}{I}\right) [n\pi].$$

L’amplitude maximale du déplacement de l’accéléromètre est égale à l’amplitude maximale du signal  $x_L$ . Cette valeur peut être obtenue par approximation sinusoïdale ou par transformée de Fourier du signal comme c’est le cas avec le système Pulse. Un descriptif plus précis du fonctionnement du système est décrit en [4].

### 3.3. Résultats de la comparaison

Les figures 4 et 5 présentent les écarts entre les étalonnages réalisés avec le même montage mécanique en utilisant les méthodes 1 et 2 d’une part et la méthode 3 d’autre part. Les lignes épaisses correspondent aux incertitudes d’étalonnage du banc dans sa configuration d’origine.

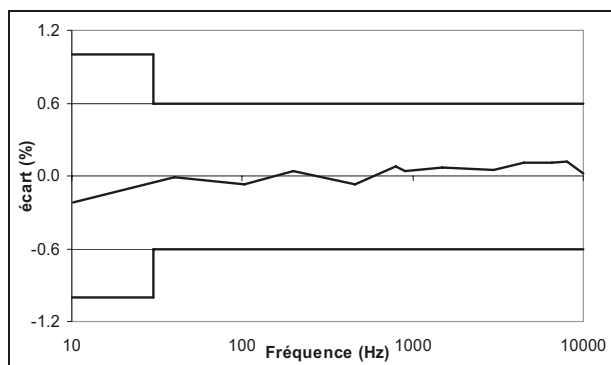


Fig. 4. – Écart entre les étalonnages du capteur Endevco 2270.

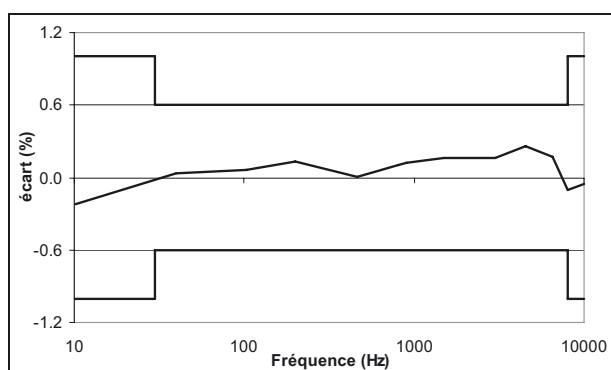


Fig. 5. – Écart entre les étalonnages du capteur 2270M8.

Les écarts observés figures 4 et 5 sont très inférieurs aux incertitudes et permettent de conclure à l'équivalence du système Pulse utilisant la méthode 3 par rapport aux moyens de mesure mettant en œuvre les méthodes 1 et 2 sur le domaine des moyennes et hautes fréquences.

### 3.4. Qualification du système d'acquisition et d'analyse

La qualification d'un système numérique ne peut être réalisée comme celle d'un système analogique mais doit s'en rapprocher.

Le système Pulse est utilisé pour réaliser les tâches suivantes :

- mesurer les tensions de sorties de l'accéléromètre et du laser ;
- générer les signaux sinusoïdaux pour les excitateurs électrodynamiques ;
- calculer la moyenne quand plusieurs points sont mesurés pour un même étalonnage.

Il a donc été étalonné comme un instrument analogique pour :

- la génération des signaux sinusoïdaux ;
- la mesure des tensions d'entrée ;
- l'écart de phase entre les voies issues du laser.

En complément des étalonnages, le logiciel a été validé à l'aide de jeux de données de tests générés *via* un outil mathématique. Les fichiers de points générés ont été implémentés dans le logiciel en lieu et place de ceux acquis par le frontal d'acquisition et permettent donc de comparer et de valider la sensibilité théorique créée à celle issue du logiciel.

La limitation de cette méthode est liée à la vitesse de comptage des franges. La fréquence des franges  $f_f$  est définie par  $f_f = v/d$  avec  $v$  la vitesse de l'accéléromètre et  $d$  le déplacement défini par la succession de deux franges.

La limite de l'accélération maximale de l'accéléromètre est donnée par :

$$a = \pi \cdot f \cdot \lambda \times \frac{f_e}{2,56} \text{ (m/s}^2\text{)},$$

avec  $f_e$  la fréquence d'échantillonnage,  $f$  la fréquence de la vibration et  $\lambda$  la longueur d'onde du laser.

## 4. Changement de l'excitateur « moyenne et haute fréquences »

### 4.1. Présentation de l'excitateur

L'excitateur d'origine est un PM 75 de la marque MB présentant une bobine mobile en aluminium et des paliers de guidage mécanique. Le nouvel excitateur est un Endevco 2911 avec palier de guidage à air. Ses spécifications techniques sont les suivantes :

- force disponible de 45 N ;
- gamme de fréquences de 10 Hz à 10 000 Hz ;
- niveau maximal de transverse de 5 % ;
- déplacement maximal de 10 mm crête à crête.

La qualification a débuté par la vérification des niveaux transverses de l'excitateur puis par la comparaison des résultats d'étalonnage avec ceux obtenus dans la configuration d'origine.

### 4.2. Installation du nouvel excitateur

L'excitateur a été installé sur le même bloc sismique que le précédent excitateur. Une interface a été développée par le fournisseur afin d'adapter le plateau de fixation. L'ancien excitateur étant utilisé en position horizontale et le nouveau en position verticale, une nouvelle table isolante équipée d'un système de rotation pour le laser a été approvisionnée (fig. 6). Les niveaux vibratoires résiduels au niveau de l'interféromètre ont été mesurés inférieurs à 0,05 % du niveau généré.

### 4.3. Détermination des niveaux d'accélération transverses

Les niveaux d'accélération transverses ont également été mesurés. La ligne épaisse de la figure 7 correspond à la spécification technique du fabricant (5 %).





Fig. 6. – Photographie de l'excitateur E2911 et de sa table isolée.

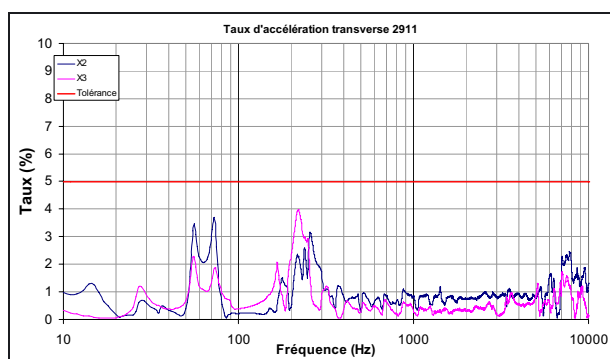


Fig. 7. – Niveaux d'accélération transverses.

L'accélération générée est mesurée avec l'accéléromètre interne 2270 M18 de l'excitateur.

Les niveaux mesurés sont inférieurs à la spécification. Celle-ci peut donc être utilisée dans le calcul d'incertitude.

#### 4.4. Comparaison avant et après le changement d'excitateur

Les écarts constatés entre les étalonnages sont comparés aux incertitudes pour évaluer leur importance (fig. 8 et 9). Les lignes épaisses correspondent à la somme quadratique des incertitudes élargies des deux configurations ( $k = 2$ ).

Les écarts constatés entre les étalonnages menés dans les deux configurations sont inférieurs à la somme

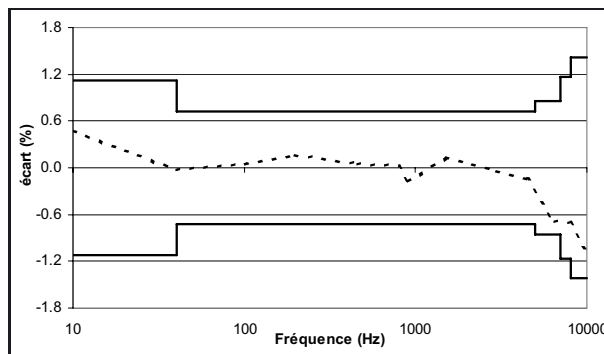


Fig. 8. – Comparaison sur l'accéléromètre Endevco 2270 M8.

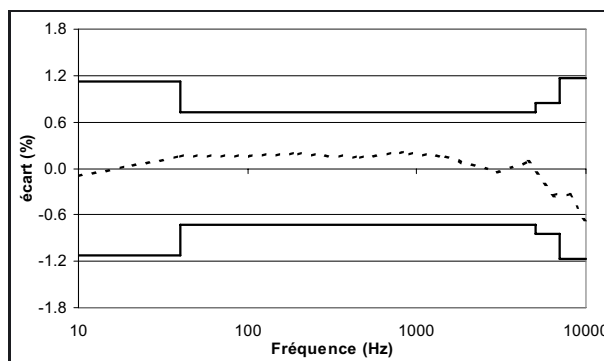


Fig. 9. – Comparaison sur l'accéléromètre Endevco 2270.

quadratique des incertitudes des deux bancs et ne sont donc pas significatifs.

Ces résultats permettent de valider le banc de référence de vibration après mise à jour.

Par ailleurs, les écarts observés en haute fréquence (> 7 kHz) sont répétables et probablement liés au changement de conception du nouvel excitateur.

Des écarts de l'ordre de 1 % à 10 kHz entre des étalonnages réalisés avec deux excitateurs de conception et de matériau différents ont déjà été observés par d'autres [5]. Ils ont également été constatés entre des étalonnages réalisés avec des raccords différents [6].

Même si ces écarts ne sont pas encore complètement expliqués, ils sont inclus dans les incertitudes et justifient l'augmentation des incertitudes à partir de 7 kHz.

## 5. Validation du banc

Un capteur du LNE a été envoyé au PTB pour étalonnage sur la gamme de fréquences 10 Hz–10 kHz. Le PTB et le LNE utilisent la méthode 3. Les figures 10 et 11 présentent l'écart relatif de la sensibilité par rapport à une valeur nominale en fonction de la fréquence. Les barres verticales représentent les incertitudes en fonction de la fréquence de chacun des laboratoires.

Les écarts observés sont inférieurs aux incertitudes et permettent de confirmer les incertitudes d'étalonnage du banc de référence en vibration.

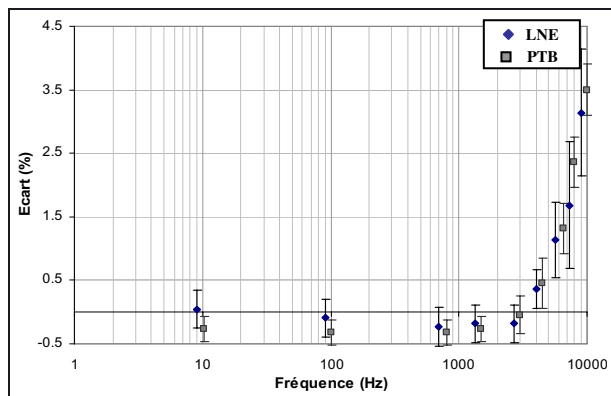


Fig. 10. – Comparaison des résultats d'étalonnage de l'accéléromètre 2270.

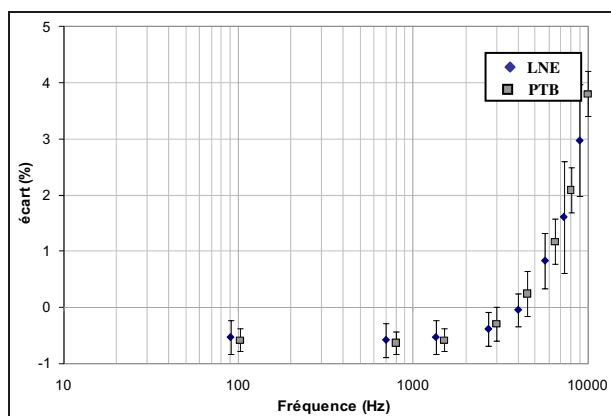


Fig. 11. – Comparaison des résultats d'étalonnage de l'accéléromètre 2270M8.

## 6. Extension des capacités d'étalonnage aux basses fréquences

Cette extension aux basses fréquences répond à des demandes croissantes de la part des industries françaises notamment dans le domaine des transports. Elle permet également de répondre aux demandes relatives à la santé [7] dont la gamme de fréquences peut descendre jusqu'à 0,5 Hz.

L'excitateur « basse fréquence » retenu est un APS 500 de marque SPEKTRA couvrant la gamme de fréquences 0,5 Hz–160 Hz. Il présente un déplacement de 152 mm et une accélération maximale de  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Il permet l'étalonnage d'accéléromètres piézo-électriques du type de ceux utilisés en moyenne et haute fréquences, des accéléromètres de type sismique ou de technologie à quartz Qflex.

La qualification a débuté par la vérification des niveaux d'accélération transverse de l'excitateur puis par la comparaison, sur leur domaine commun, des excitateurs « basse fréquence » et « moyenne et haute fréquences ».

La validation a ensuite été prononcée sur la base d'une comparaison avec un autre laboratoire national de métrologie.



Fig. 12. – Photographie de l'excitateur APS 500.

### 6.1. Mise en place de l'excitateur « basse fréquence »

L'excitateur est situé dans le même local que le banc « moyenne et haute fréquences » (fig. 12).

#### 6.1.1. Massif sismique

Un bloc de granit de plus d'une tonne a été approvisionné. Il a été déposé sur une mousse goudronnée du même type que celle de l'excitateur « moyenne et haute fréquences ». Une plaque d'interface pour la fixation de l'excitateur a été réalisée et scellée sur le massif par l'intermédiaire de onze vis M20 prises dans une colle époxydique à deux composants avec des caractéristiques de résistance mécanique améliorées. La hauteur du massif a été définie de manière à permettre l'alignement des accéléromètres à étalonner avec le laser posé sur la table antivibratoire.

#### 6.1.2. Détermination des niveaux d'accélération transverse

Les niveaux d'accélération transverse ont été mesurés. Deux séries de mesures ont été réalisées correspondant aux deux configurations principales d'utilisation du système : avec un accéléromètre QA700 de marque Honeywell de masse 280 g dédié aux très basses fréquences et avec le cube sur lequel seront montés les accéléromètres de type piézoélectrique. Les figures 13 et 14 présentent les niveaux d'accélération transverse mesurés dans deux directions orthogonales entre elles.

Les traits épais correspondent aux spécifications techniques du fournisseur.

Les niveaux mesurés sont très inférieurs aux spécifications techniques données par le fournisseur sur toute la gamme de fréquences. Ils permettent donc de qualifier l'excitateur APS 500 sur ce point.

#### 6.1.3. Comparaisons des excitateurs « basse fréquence » et « moyenne et haute fréquences »

Les trois capteurs de référence ont été étalonnés par la méthode de comptage de franges sur l'excitateur « basse

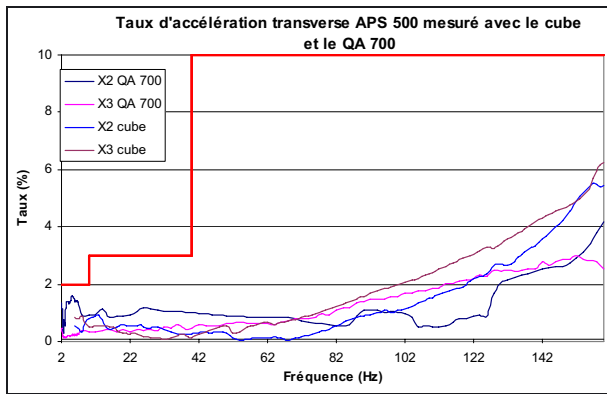


Fig. 13. – Niveau d'accélération transverse mesuré sur le capteur QA700.

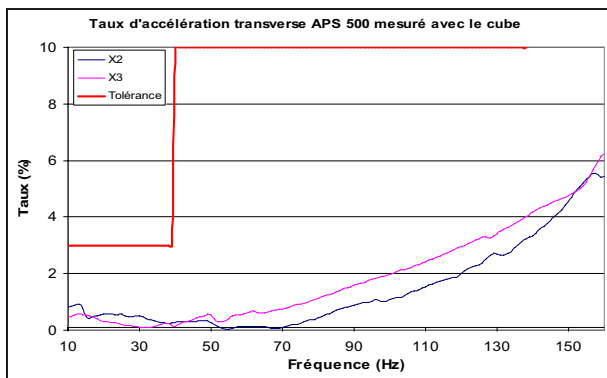


Fig. 14. – Niveau d'accélération transverse mesuré sur le cube de montage.

fréquence » et sur l'excitateur « moyenne et haute fréquences » d'origine.

Le capteur dit « au sommet » a été étalonné dans la même configuration sur les deux excitateurs.

Les capteurs dits « à la base » sont montés sur l'excitateur « basse fréquence » sur un cube où la surface de pointage du laser n'est pas la même que sur l'excitateur « moyenne et haute fréquences ». L'accéléromètre Bruel & Kjaer 8305 est étalonné comme une chaîne accélérométrique avec le conditionneur Bruel & Kjaer 2525.

La figure 15 présente, en fonction de la fréquence, les écarts relatifs de sensibilité entre les étalonnages réalisés avec les deux excitateurs. Les traits épais continus correspondent aux incertitudes inférieure et supérieure du banc moyenne et haute fréquences.

À partir de 15 Hz, les écarts constatés sont très inférieurs aux incertitudes d'étalonnage du banc pour les trois capteurs, base et sommet, *i.e.* non significatifs. La fréquence d'excitation 10,2 Hz présente un écart systématique de l'ordre de 0,6 % pour une incertitude de 1 %. Elle correspond à la limite basse de l'excitateur moyenne et haute fréquence d'origine où le signal présente de la distorsion harmonique expliquant cet écart. Les écarts constatés permettent également de valider le montage sur un cube des capteurs « à la base ».

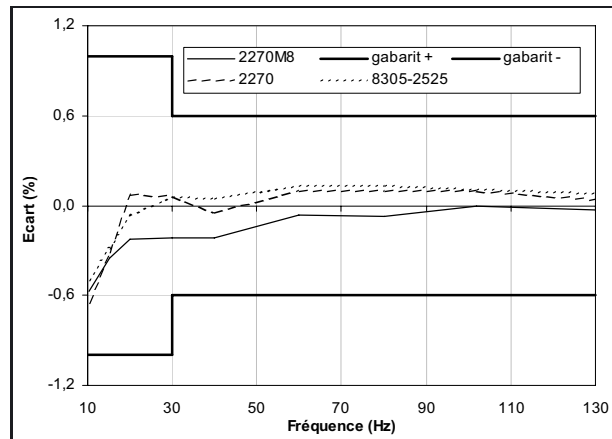


Fig. 15. – Comparaison des deux excitateurs pour les trois accéléromètres.

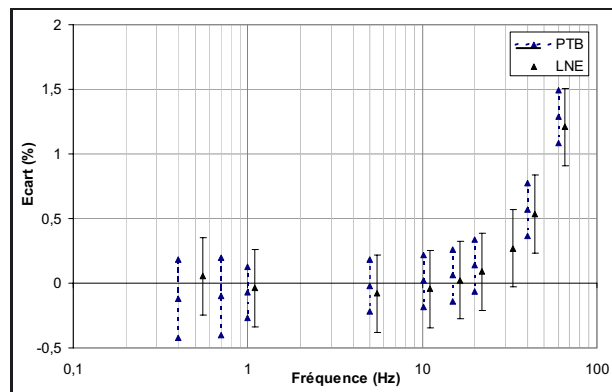


Fig. 16. – Comparaison des étalonnages de l'accéléromètre QA700 réalisés au LNE et au PTB.

## 6.2. Validation de l'excitateur « basse fréquence »

L'accéléromètre QA700 a été étalonné par le PTB sur la gamme de fréquences de 0,4 Hz à 60 Hz. La figure 16 présente, en fonction de la fréquence, les écarts relatifs de sensibilité par rapport à une même valeur nominale pour les deux étalonnages.

Les écarts constatés entre les deux étalonnages sont inférieurs aux incertitudes, représentées par des barres verticales sur la figure 16 et ne sont donc pas significatifs. Cela permet de valider les capacités métrologiques du banc « basse fréquence » de 0,5 Hz à 60 Hz.

## 7. Conclusion

Le banc d'étalonnage primaire des accéléromètres a été complètement renouvelé et sa qualification menée point par point :

- étant l'élément le plus fragile du banc, le laser a été changé en premier et qualifié par comparaison à l'ancienne configuration ;

- le système d’acquisition et d’analyse a ensuite été changé et qualifié par comparaison aux résultats d’étalonnage avant le changement de système et de méthodes ;
- l’excitateur électrodynamique a ensuite été qualifié et validé *via* la comparaison à un autre laboratoire national de métrologie ;
- l’excitateur « basse fréquence » a été qualifié et validé également *via* la comparaison un autre laboratoire national de métrologie.

Le LNE peut maintenant proposer aux industriels un raccordement sur une gamme de fréquences élargie aux basses fréquences avec un banc rénové et des incertitudes améliorées sur une grande partie du domaine fréquentiel.

Cette remise à niveau du banc primaire d’étalonnage des accéléromètres permet au LNE et à la métrologie française, de prendre une place majeure dans le concert des grands laboratoires nationaux de métrologie en accélérométrie.

Elle permet également au LNE de développer de nouveaux services aux industriels comme l’étalonnage des dosimètres vibratoires et d’envisager de futurs développements comme le raccordement des accéléromètres en phase, des vibromètres lasers ou des sismomètres.

---

*Article reçu le 19 mai 2011, version révisée reçue le 17 janvier 2012.*

## Références

- [1] ISO 16063, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1 Basic concepts – Part 11: primary vibration calibration by laser interferometry”.
- [2] STONE J.A. *et al.*, “Advice from the CCL on the use of unstable lasers as standards of wavelength: the helium-neon laser at 633 nm”, *Metrologia*, **46**, 2009, 11-18.
- [3] AVERLANT Ph., « Transfert du banc de référence en accélérométrie du CEA-Cesta au LNE », *Revue Française de Métrologie*, **10**, 2007, 23-30.
- [4] LICHT T.R. et SALBOEL S.E., “ISO 16063-11: Primary vibration calibration by laser interferometry. Evaluation of sine approximation realised by FFT”, *XVIII Imeko World Congress*, Brésil, 2006.
- [5] TAUBNER A., SCHLAAK H., BRUCKE M. et BRUNS Th., “The influence of different vibration exciter systems on high frequency primary calibration of single-ended accelerometers”, *Metrologia*, **47**, 2010, 58-64.
- [6] AVERLANT Ph., LICHT T. et BARTOLI C., « Influence du montage mécanique sur les résultats d’étalonnage des accéléromètres en haute fréquence », *14<sup>e</sup> congrès international de métrologie*, Paris, France, juin 2009.
- [7] Directive Européenne 2002/44, « Prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l’exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (vibrations) ».