



Ph. AVERLANT

# Transfert du banc de référence en accélérométrie du CEA-CESTA au LNE

## *Transfer of the French accelerometry reference from CEA-CESTA to LNE*

Philippe AVERLANT

LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais), 1 Rue Gaston Boissier, 75724 Paris Cedex 15, France, philippe.averlant@lne.fr.

### Résumé

Le LNE a repris la mission de laboratoire de référence en accélérométrie à la suite de la décision du CEA-CESTA d'arrêter cette activité. Cet article présente le banc de référence en vibration moyenne et haute fréquence, son transfert et sa nouvelle qualification.

**MOTS CLÉS** : ACCÉLÉROMÉTRIE, VIBRATION.

### Abstract

*LNE has taken over the function of accelerometry reference laboratory following the decision of the CEA-CESTA to give up this activity. This article presents the principal stages in the transfer of the reference for medium and high frequency vibrations.*

**KEY WORDS**: ACCELEROMETRY, VIBRATION.

### 1. Introduction

Les références nationales d'accélérométrie sont en pleine restructuration par suite de la décision du CEA-CESTA prise en 2005, d'abandonner la mission de laboratoire de référence associé dans ce domaine qu'il assurait depuis 1974. Le LNE a repris cette mission et a installé un nouveau laboratoire dédié à cette activité sur son site de Trappes.

Les références nationales primaires du CEA-CESTA étaient constituées de trois bancs :

- un banc absolu pour les accélérations en régime sinusoïdal (vibrations en moyenne et haute fréquence) ;

- deux bancs absolus pour les accélérations en régime impulsionnel (chocs).

Au cours de l'année 2005, le banc de vibration moyenne et haute fréquence ainsi que le vélocimètre laser associé aux bancs chocs, ont été transférés au LNE. Le CEA-CESTA conserve les bancs chocs (hors vélocimètre) pour ses besoins propres d'étalonnage par comparaison.

Le banc transféré est donc celui en vibration moyenne et haute fréquence par méthode absolue (interférométrie laser). Ce banc constitue la référence, en France, pour le raccordement des accéléromètres utilisés par les laboratoires d'étalonnage pour leur banc par comparaison.

Après un rappel des principales caractéristiques du banc transféré, les parties suivantes présentent :

- les aménagements (local, massif, informatisation),
- la qualification,
- les résultats des comparaisons,
- la remise à niveau et les futures extensions.

### 2. Présentation du banc transféré

Le banc primaire d'accélérométrie en régime vibratoire sinusoïdal pour les moyennes et hautes fréquences (fig. 1) est principalement composé de :

- un massif sismique ;
- un excitateur ;
- un interféromètre de Michelson avec laser hélium-néon ;
- un fréquencesmètre-compteur et un voltmètre.

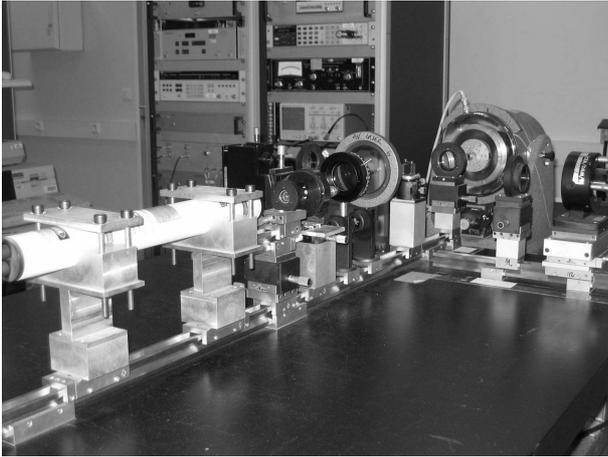


Fig. 1. – Banc d'accélérométrie vibratoire moyenne et haute fréquence.

Le schéma électrique suivant (fig. 2) de l'installation permet une vue simplifiée du fonctionnement de ce genre de banc :

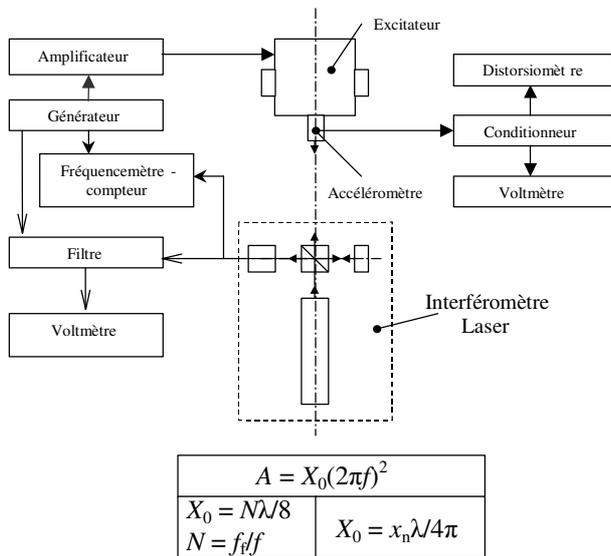


Fig. 2. – Principe du banc d'accélérométrie.

Les méthodes mises en œuvre par ce banc ont déjà été présentées [1], et font l'objet d'une norme internationale [2] ; en voici une synthèse.

### 2.1. Accélérométrie par interférométrie

L'accéléromètre fixé sur l'excitateur est soumis à un mouvement sinusoïdal de fréquence  $f$  et d'amplitude  $X_0$ . Par dérivées successives, l'amplitude  $A$  de l'accélération sinusoïdale qui lui est appliquée est alors égale à  $X_0(2\pi f)^2$ .

L'amplitude du déplacement est mesurée par un interféromètre de Michelson dont le miroir mobile est fixé sur l'accéléromètre. Le déplacement nécessaire de l'accéléromètre pour l'apparition successive de deux franges d'interférence correspond à une demi-longueur d'onde laser ( $\lambda/2$ ).

Pour un déplacement linéaire en fonction du temps de l'accéléromètre, le signal de l'interféromètre de Michelson est sinusoïdal en fonction du temps, le déplacement nécessaire à la succession de deux signaux maxi étant d'une demi-longueur d'onde laser.

La représentation graphique de ce phénomène est donnée en figure 3 pour un déplacement linéaire du miroir en fonction du temps et en figure 4 pour un déplacement sinusoïdal en fonction du temps.

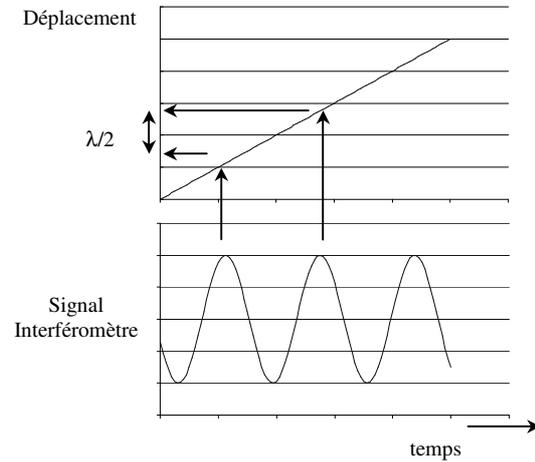


Fig. 3. – Signal pour un déplacement linéaire.

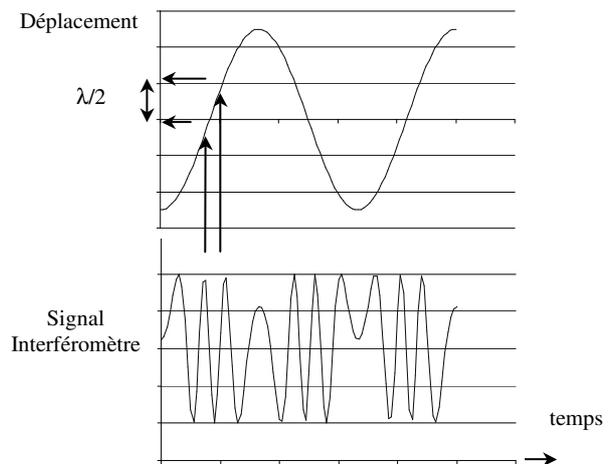


Fig. 4. – Signal pour un déplacement sinusoïdal.

### 2.2. Comptage de franges

Si  $N$  franges sont comptées sur une période du déplacement de l'accéléromètre, c'est-à-dire pour un déplacement de  $4X_0$ , alors ce déplacement correspond à  $N\lambda/2$ , et on obtient :  $X_0 = N\lambda/8$ .

Sur une même durée, le compteur détermine le nombre de franges  $n_f$  à partir du signal de l'interféromètre et le nombre de périodes de déplacement  $n_d$  à partir du signal du générateur. Leur quotient permet de calculer  $N$  le nombre de franges sur une période :  $N = n_f/n_d$ .

La division du numérateur et du dénominateur par la durée du comptage ne change pas l'égalité et permet

d'exprimer le nombre de frange pour une période de déplacement  $N$ , en fonction de la fréquence du mouvement  $f$ , et d'une fréquence équivalente  $f_i$  des franges.  $N = f_i/f$ .

Pour de très faibles amplitudes de déplacement, ce qui est notamment le cas lorsque les fréquences sont élevées, l'incertitude due au comptage peut prendre en valeur relative une part prépondérante. La méthode suivante est alors utilisée.

### 2.3. Recherche des zéros

Lorsque le déplacement  $X(t)$  est une fonction sinusoïdale du temps de fréquence  $f(X(t) = X_0 \cos(\omega t))$ , pulsation  $\omega = 2\pi f$ , le signal en sortie du détecteur  $I(t)$  est un signal sinusoïdal modulé en fréquence dont le cycle est  $1/f$  (fig. 4) et qui s'écrit :

$$I(t) = M\{1 + N \cos[(4\pi/\lambda)(d_0 - X_0 \cos(\omega t))]\},$$

où  $M$  et  $N$  sont des coefficients dépendant de l'intensité et du contraste des franges et  $d_0$  représente la différence de chemin optique entre les deux faisceaux au repos.

On démontre mathématiquement qu'un tel signal présente un spectre de raies régulièrement espacées de pulsation  $\omega, 2\omega, 3\omega \dots$

$$I(t) = M \left( 1 + \sum_{i=1}^{\infty} M_i \cos(i\omega t) \right)$$

L'amplitude de chacune de ces composantes spectrales varie en fonction de l'amplitude crête du déplacement  $X_0$ . Par exemple si on considère le coefficient  $M_1$ , qui est l'amplitude normalisée crête de la composante à la pulsation  $\omega$ , on a :

$$M_1 = W \cos(4\pi d_0/\lambda) J_1(4\pi X_0/\lambda),$$

où  $W$  est dépendant du contraste.

Ce coefficient  $M_1$  oscille en fonction du déplacement crête  $X_0$  et s'annule pour certaines valeurs particulières de celui ci qui annule la fonction de Bessel de 1<sup>re</sup> espèce  $J_1(x)$ .

Si on filtre le signal de sortie du détecteur en ne laissant passer que la composante  $\omega$ , il suffit alors d'augmenter l'amplitude du déplacement jusqu'à obtenir un signal nul à la sortie du filtre correspondant au 1<sup>er</sup> zéro de la fonction  $J_1(x)$ , puis le 2<sup>e</sup>, etc.

Pour ces valeurs particulières, l'amplitude du déplacement crête  $X_0$  peut être connue avec une grande précision et correspond à :

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	...
$4\pi X_0/\lambda$	3,831 7	7,015 59	10,173 46	...

Ces valeurs successives des  $x_0$  qui annule la fonction de Bessel de 1<sup>re</sup> espèce  $J_1(x)$  sont données dans le document [2].

### 2.4. Domaine

Ce banc permet l'application de la méthode de comptage de franges et celles de recherche des zéros. Par contre ce banc ne permet pas l'application de la méthode plus récente qui nécessite la mise en œuvre d'un interféromètre laser avec sortie en quadrature.

Les limites en amplitude du domaine dépendent des possibilités d'application des méthodes présentées, des caractéristiques techniques de l'excitateur et de la masse qui charge son équipement mobile.

Avant son transfert, ce banc faisait l'objet d'une accréditation par le Cofrac (comité français d'accréditation). L'incertitude d'étalonnage élargie ( $k = 2$ ) était égale à  $\pm 0,6 \%$  de la sensibilité de l'instrument étalonné (accéléromètre ou chaîne accélérométrique). La sensibilité est définie par le rapport de la sortie électrique de l'instrument par l'accélération appliquée. Cette dernière est déterminée par comptage de franges de 10 Hz à 900 Hz et par recherche des zéros de  $J_1(z)$  de 800 Hz à 10 kHz.

## 3. Les aménagements et le déménagement

### 3.1. Le local

Afin d'accueillir les nouveaux moyens, un laboratoire de 45 m<sup>2</sup> a été aménagé et climatisé avec des conditions compatibles avec celles de la norme internationale [2] :

- température : 23 °C  $\pm$  1 °C ;
- humidité relative : 55 %  $\pm$  10 %.

Une station connectée à une sonde placée en partie centrale permet une surveillance du bon respect de ces conditions ambiantes. Une vérification d'homogénéité spatiale a été réalisée sur une période d'une semaine montrant le respect des conditions précédentes.

Le plancher permet une charge répartie jusqu'à 350 kg/m<sup>2</sup>. Afin de vérifier les caractéristiques vibratoires de la dalle, des mesures ont été réalisées. Elles mettent en évidence un faible niveau vibratoire du sol du nouveau laboratoire avec des accélérations négligeables inférieures à 0,05 % des accélérations du banc soit un niveau conforme aux exigences normatives.

### 3.2. Le massif sismique

Le massif sismique du CEA-CESTA, implanté dans une mini-fosse, n'a pas été transféré. Un bloc de granit de plus d'une tonne (1 200 kg) a été approvisionné. Il a été déposé sur une mousse goudronnée de type de celle utilisée sous les massifs des comparateurs de masses du LNE. Une plaque d'interface pour la fixation de l'excitateur a été réalisée et scellée sur le massif par l'intermédiaire de 12 vis M20 prises dans une colle époxydique à deux composants avec des caractéristiques de résistance mécanique améliorées.



Fig. 5. – Dépose de la plaque d'interface de l'excitateur sur le nouveau massif sismique de 1 200 kg.

Dans le nouveau laboratoire, ce massif sismique n'étant pas disposé dans une fosse, un châssis supportant la table de l'interféromètre laser a été réalisé pour retrouver une hauteur compatible.

### 3.3. L'informatisation

Au CEA-CESTA le banc était piloté par un ordinateur d'une génération obsolète. Une panne irrémédiable de ce ordinateur a remis en cause la reprise rapide de l'activité. Une des solutions envisagées était la mise en service d'un nouveau banc dont certains composants étaient déjà approvisionnés. Mais, la qualification de ce nouveau système entraînait également un report important de la reprise de l'activité.

Pour y remédier, les calculs ont été transcrits dans un tableur. Elle permet d'assister et de rendre possible une utilisation manuelle du banc transféré. Dans un souci de paramétrage et de facilité de gestion, un onglet spécifique comportant l'ensemble des paramètres métrologiques des méthodes et des moyens mis en œuvre est créé. Il s'agit d'une mini base de données des paramètres métrologiques. Le classeur est ensuite constitué de 4 autres onglets principaux qui sont liés à l'onglet de la base de données :

- « Programme » : Fixe le programme d'étalonnage par rapport au domaine en fonction de la méthode, de l'amplitude et de la fréquence ;
- « Contrôle » : Teste le bon fonctionnement de la partie puissance du banc ;
- « Comptage » : Détermine les valeurs cible en tension du générateur, puis à partir des mesures, calcule l'amplitude de l'accélération et la sensibilité de la chaîne accélérométrique. Dans le cas d'un étalonnage d'un accéléromètre seul, sa sensibilité est déterminée à partir du gain de l'amplificateur. Ce dernier est interpolé à partir de la fréquence à réaliser et de la gamme de gain déclarée, le tout en utilisant le tableau de la base de données ;
- « Zéros » : Fonctions identiques à l'onglet précédent mais en appliquant la méthode de recherche des zéros.

Des commentaires sont liés à chaque cellule comportant une formule pour la décrire. Des onglets « notice » donnent le détail des fonctions et des formules appliquées dans chacun des onglets principaux.

Parallèlement, une informatique spécifique pour l'édition des certificats d'étalonnage avec détermination automatisée de la dérive de l'instrument a été mise en place. Cette deuxième informatisation est indépendante de l'informatisation du pilotage du banc de manière à rester d'actualité suite à un changement du banc.

### 3.4. Le déménagement (fig. 6)

Le démontage du banc au CEA, le montage, le câblage et les réglages au LNE ont été effectués par la nouvelle équipe du LNE en totale collaboration avec le responsable du laboratoire accélérométrie du CEA-CESTA.



Fig. 6. – Vue de l'installation au LNE après remontage.

## 4. La qualification

Les principales étapes de la qualification menées à la suite du transfert ont été :

- Mesures des niveaux vibratoires de la table support de l'interféromètre laser pour différents niveaux de fonctionnement de l'excitateur. Le mouvement propre de l'interféromètre est en effet de nature à fausser la mesure du déplacement de l'accéléromètre.
- Mesures du taux de mouvement transversal de la partie mobile de l'excitateur. Ce mouvement transversal perturbe la mesure du déplacement axial par le défaut de parallélisme créé. D'autre part, en fonction de la sensibilité transverse de l'instrument étalonné, une composante d'incertitude fonction du taux de mouvement transversal est prise en compte.
- Raccordement des équipements métrologiques du banc. A chaque fois, le programme de raccordement appliqué par l'ancien laboratoire a été optimisé par rapport au domaine d'utilisation et avec des incertitudes nécessaires et suffisantes. Les principaux équipements faisant l'objet d'un raccordement sont :
  - l'interféromètre laser,

- le voltmètre,
- le fréquencemètre-compteur,
- le conditionneur.

L'analyse des résultats a permis une nouvelle détermination des incertitudes liées à l'utilisation du banc.

L'incertitude de détermination de la sensibilité d'un accéléromètre ou d'une chaîne accélérométrique devient en valeur relative ( $k = 2$ ) égale à :

- $\pm 1,0 \%$  de 10 Hz à 30 Hz ;
- $\pm 0,60 \%$  de 30 Hz à 10 000 Hz.

La dégradation retenue pour les faibles fréquences ne semble pas avoir pour origine le transfert du banc mais une dégradation des performances d'origine de l'excitateur, déjà constatée au CEA-CESTA (mouvement transversal et distorsion).

## 5. Les comparaisons

Afin de vérifier la continuité métrologique du banc suite à son transfert, des accéléromètres témoins ont été étalonnés au CEA-CESTA avant le déménagement. Ces mêmes accéléromètres ont été à nouveau étalonnés au LNE.

Cette partie décrit les comparaisons effectuées dans cet objectif :

- le matériel utilisé ;
- le programme ;
- les résultats ;
- l'analyse des écarts.

### 5.1. Les accéléromètres

Le banc permet des mesures de l'accélération soit au niveau de la surface de fixation de l'accéléromètre sur l'excitateur (mesure à la base), soit au niveau de la face opposée (mesure au sommet). La deuxième configuration est mise en oeuvre pour étalonner des accéléromètres de référence qui sont ensuite utilisés pour étalonner d'autres accéléromètres. Un miroir est fixé au sommet de l'accéléromètre, à la place des accéléromètres qu'il étalonnera.

Pour que les conclusions des comparaisons ne dépendent pas de l'accéléromètre et du conditionneur utilisé, un accéléromètre et une chaîne accélérométrique de référence (accéléromètre et conditionneur) ont été définis et approvisionnés. Avec l'accéléromètre de référence fourni par le CEA avec le banc, les trois instruments témoins permettent une redondance suffisante.

- Accéléromètre Endevco, type 2270 :  
Spécialisé pour les mesures d'accélération transmise au sommet de l'accéléromètre. Ce capteur a été utilisé par le CEA depuis plusieurs années comme moyen de vérification de la stabilité métrologique du banc.
- Accéléromètre Endevco, type 2270M8 :  
Spécialisé pour une mesure de l'accélération appliquée à sa base. Il a été acquis par le LNE à l'occasion de la

prise en charge de l'activité accélérométrique. La configuration du banc pour les étalonnages « à la base » est différente de celle pour les étalonnages « au sommet ». L'utilisation des deux types d'accéléromètre permettra de vérifier les caractéristiques pour les deux configurations du banc.

– Accéléromètre B&K, type 8305-001 :

Cet accéléromètre est à nouveau spécialisé pour une mesure de l'accélération appliquée à sa base. Il a également été acquis par le LNE à l'occasion de la prise en charge de l'activité accélérométrique. La redondance métrologique ainsi constituée permettra de montrer que les résultats ne dépendent pas du capteur utilisé.

### 5.2. Les conditionneurs

Le conditionneur permet une conversion du signal de sortie de l'accéléromètre en grandeur électrique compatible avec le voltmètre du banc.

- Conditionneur B&K, type 2626 :  
Il s'agit du conditionneur associé traditionnellement au banc dans le cas d'un accéléromètre présenté seul pour étalonnage. Ce conditionneur a été associé aux deux accéléromètres Endevco.
- Conditionneur B&K, type 2525 :  
Il s'agit d'un conditionneur de nouvelle génération. Également acquis pour l'occasion, cette nouvelle redondance métrologique permettra d'imputer d'éventuels écarts sur un des conditionneurs ou sur les autres composants du banc. Il a été associé à l'accéléromètre B&K.

### 5.3. Les étalonnages réalisés

Pour chacun des trois capteurs, un programme d'étalonnage a été défini de manière à couvrir le domaine de fonctionnement du banc. Chaque point d'étalonnage d'un programme est défini par la fréquence et l'amplitude de l'accélération sinusoïdale appliquée. Le programme retenu est le suivant :

Fréquence (Hz)	10	40	102	102	102	200	460	800
Amplitude ( $m \cdot s^{-2}$ )	5	10	50	100	200	60	400	40

Fréquence (Hz)	900	1 500	3 000	4 500	6 500	8 000	10 000
Amplitude ( $m \cdot s^{-2}$ )	50	45	125	155	320	490	760

L'étalonnage d'un des accéléromètres a également été réalisé par la société B&K sur son propre banc au point 160 Hz avec une amplitude de  $50 m \cdot s^{-2}$ . Afin d'exploiter également les résultats, le programme suivant a été ajouté pour l'accéléromètre B&K :

Fréquence (Hz)	102	102	160	160
Amplitude ( $m \cdot s^{-2}$ )	20	200	50	300

Les étalonnages au CEA-CESTA ont été répétés avec changement de l'opérateur pour valider la qualification des nouveaux intervenants et à deux périodes différentes de manière à quantifier la dérive à cours terme.

Les étalonnages ont débutés au CEA-CESTA, par Christian Barreau, ancien responsable du centre d'étalonnage accrédité Cofrac, en binôme avec Philippe Averlant, responsable du laboratoire d'accélérométrie du LNE. Deux étalonnages ont été ainsi réalisés dans les deux configurations du banc (base et sommet).

Le deuxième étalonnage a ensuite été répété sans l'aide du CEA. Les écarts obtenus permettent de confirmer l'aptitude du nouvel opérateur. Deux étalonnages supplémentaires seront également réalisés par ce dernier avec un changement d'accéléromètre puis un changement de conditionneur.

A quelques temps d'intervalle et toujours au CEA-CESTA, ces cinq étalonnages ont été répétés par M. Christian Barreau et par Cédric de Waubert, technicien en accélérométrie au LNE. A nouveau les écarts permettent de confirmer l'aptitude de l'opérateur et la stabilité métrologique du banc à court terme.

A la suite du transfert du banc entre le CEA-CESTA (Bordeaux) et le LNE (Trappes), les cinq étalonnages ont à nouveau été répétés pour confirmer la conservation des caractéristiques métrologiques du banc à la suite du déménagement.

Le tableau 1 synthétise les étalonnages réalisés en précisant le lieu et la date ; les opérateurs ; les moyens et le code utilisé dans la suite du document.

Tableau 1  
Déroulement des comparaisons.

Lieu	Date	Intervenants	Matériel	Référence
DK	24/04/05	B&K	B&K 8305-001	K
CEA	7/06/05	C. Barreau (CEA)	Endevco 2270	A
	8/06/05	P. Averlant (LNE)	Endevco 2270M8	B
	8/06/05	P. Averlant (LNE)	Endevco 2270M8	C
	9/06/05		B&K 8305-001/2525	D
	9/06/05		B&K 8305-001	E
CEA	5/07/05	C. Barreau (CEA)	Endevco 2270	F
	6/07/05	C. de Waubert (LNE)	Endevco 2270M8	G
	6/07/05	C. de Waubert (LNE)	Endevco 2270M8	H
	7/07/05		B&K 8305-001/2525	I
	7/07/05		B&K 8305-001	J
LNE	10/02/06	C. de Waubert (LNE)	Endevco 2270	G010303/4
	07/02/06		Endevco 2270M8	G010303/1
	09/02/05		B&K 8305-001/2525	G010303/3
	09/02/06		B&K 8305-001	G010303/2

#### 5.4. Présentation des résultats

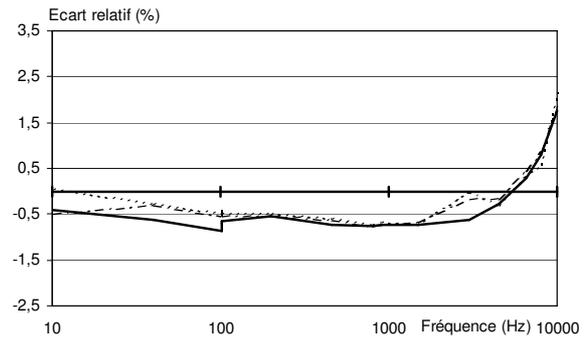


Fig. 7. – Écarts relatifs par rapport à une même valeur nominale pour l'Endevco 2270 (Étalonnages A-F et G010303/4).

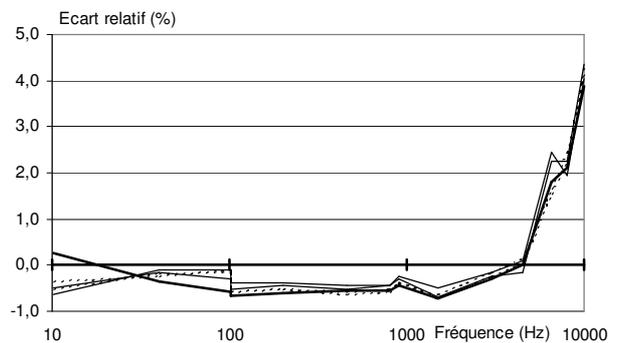


Fig. 8. – Écarts relatifs par rapport à une même valeur nominale pour l'Endevco 2270M8 (Étalonnages B-C-G-H et G010303/1).

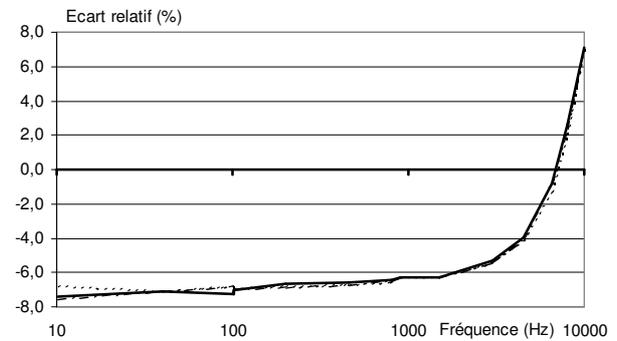


Fig. 9. – Écarts relatifs par rapport à une même valeur nominale pour B&K 8305-001/2525 (Étalonnages D-I et G010303/3).

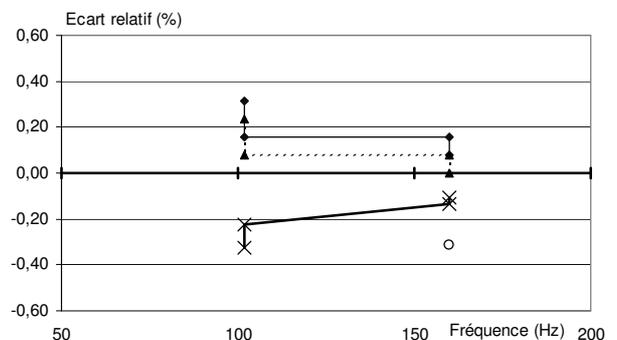


Fig. 10. – Écarts relatifs par rapport à une même valeur nominale pour B&K 8305-001 (Étalonnages K-E-J et G010303/2).

Les graphiques (Fig. 7 à 10) présentent les résultats obtenus pour chacun des accéléromètres et pour la chaîne accélérométrique. La référence des étalonnages est celle définie dans le tableau 1. A chaque fois, la courbe en trait continu épais correspond à l'étalonnage après transfert (au LNE). Les graphiques représentent en fonction de la fréquence, les écarts relatifs de sensibilité par rapport à une même valeur nominale pour toute la plage de fréquence.

Ces courbes représentent la non-linéarité de la réponse du capteur en fonction de la fréquence de la vibration. Les cassures des courbes observables à 100 Hz sont liées au programme d'étalonnage retenu (cf. § 5.3) avec la répétition de cette fréquence pour plusieurs amplitudes d'accélération. L'ensemble des irrégularités de ces courbes et les écarts entre elles sont à interpréter au regard de leur incertitude. Pour cela, une autre représentation graphique des résultats est utilisée.

### 5.5. Ecarts obtenus

Les écarts entre les différentes courbes précédentes représentent les écarts entre les résultats des étalonnages. Pour juger de leur importance et de leur signification, et donc de la stabilité du banc suite à son transfert, ils sont à comparer aux incertitudes d'étalonnage.

Les graphiques suivants (Fig. 11 à 14) présentent à nouveau les résultats obtenus pour chacun des accéléromètres et pour la chaîne accélérométrique. Cette fois, les courbes représentent en fonction de la fréquence, les écarts relatifs de sensibilité par rapport à des sensibilités de référence. Pour une fréquence donnée, la sensibilité de référence est déterminée par la moyenne des résultats des étalonnages réalisés. Ces graphiques correspondent donc à une représentation des écarts entre les étalonnages réalisés avant et après le transfert.

Les traits continus épais représentent l'incertitude du banc donnée au paragraphe 4 en plus ou moins deux écarts-types.

### 5.6. Analyse

Les graphiques (Fig. 11 à 14) montrent que les écarts obtenus ne sont pas significatifs vis à vis de l'incertitude d'étalonnage du banc de vibration.

Rappelons que les étalonnages comparés avant et après transfert du banc ont été obtenus avec changement de moyen de comparaison et changement des opérateurs. Le résultat d'étalonnage d'un laboratoire étranger a même été pris en compte.

Ces résultats permettent de conforter la continuité des références d'accélérométrie suite au transfert et sont de nature à confirmer la confiance dans l'estimation retenue des incertitudes. Cette confiance était le préalable nécessaire à la participation du LNE aux comparaisons internationales. Les mesures d'une telle comparaison sont en cours et les premiers résultats provisoires sont tout à fait satisfaisants pour le LNE.

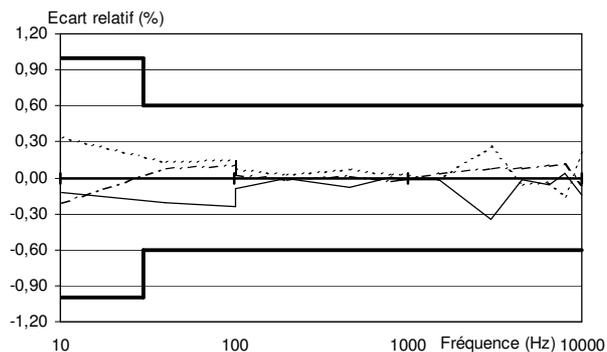


Fig. 11. – Ecarts relatifs entre les étalonnages pour l'Endevco 2270 (Etalonnages A - F et G010303/4).

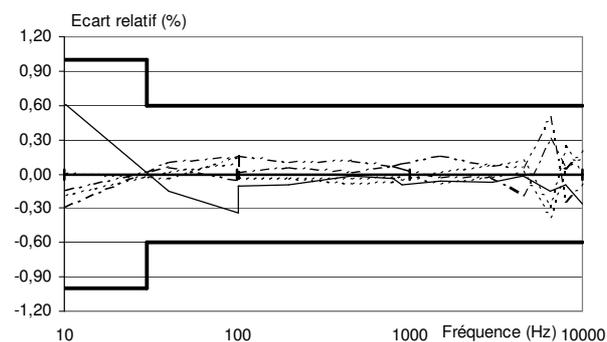


Fig. 12. – Ecarts relatifs entre les étalonnages pour l'Endevco 2270M8 (Etalonnages B-C – G-H et G010303/1).

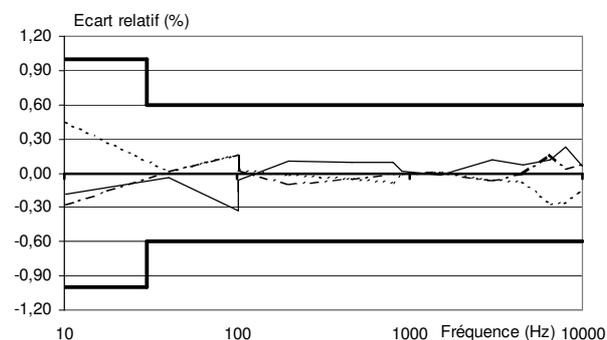


Fig. 13. – Ecarts relatifs entre les étalonnages pour B&K 8305-001/2525 (Etalonnages D-I- et G010303/3).

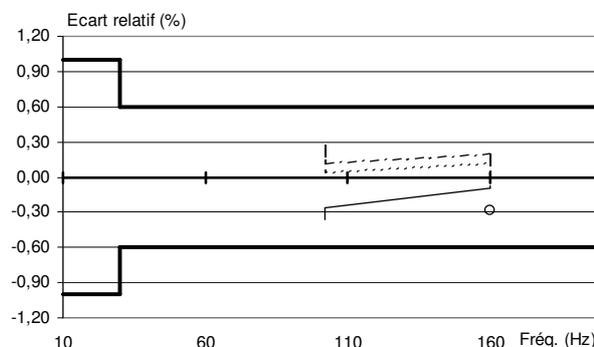


Fig. 14. – Ecarts relatifs entre les étalonnages pour B&K 8305-001 (Etalonnages K-E-J et G010303/2).

## 6. Remise à niveau

Le banc d'accélérométrie transféré fonctionne depuis plus de 15 ans sur une technologie dont la conception et les principaux éléments métrologiques ont parfois plus de 20 ans d'âge. L'entretien de ce type d'équipement n'est plus possible et en cas de panne, des modifications importantes devront être apportées. De plus, de nouvelles connaissances et techniques ont été développées. Une nouvelle méthode d'étalonnage a été normalisée [2]. Elle ne peut pas être appliquée à l'aide du banc actuel. Enfin, les incertitudes de ce banc ( $\pm 0,6\%$ ) commencent à s'éloigner des meilleures incertitudes rencontrées dans les laboratoires nationaux étrangers (de  $0,2\%$  à  $0,5\%$ ).

La remise à niveau de ce banc moyenne et haute fréquence est donc nécessaire. Une nouvelle partie laser et le système de mesure, de traitement et d'édition ont déjà été approvisionnés. Il reste à faire leur qualification métrologique d'une part et la remise à niveau de l'excitateur et de l'amplificateur de puissance d'autre part. A la suite de cette remise à niveau, une nouvelle comparaison internationale devra être réalisée.

Un objectif supplémentaire est envisagé. En France, il n'existe actuellement aucun banc de référence pour couvrir les besoins de raccordements primaires pour des fréquences de vibration inférieures à 10 Hz.

Le laser et le système de mesure moyenne et haute fréquence auront la particularité d'être utilisables pour des étalonnages en basses fréquences. Il est envisagé de compléter les acquisitions précédentes par l'approvisionnement d'un excitateur et d'un massif spécifique pour la basse fréquence.

Ainsi, la configuration finale visée est un excitateur moyenne et haute fréquence, un autre pour la basse fréquence, un seul et même laser et, enfin, un système commun de mesure, de traitement et d'édition. La mise en commun des équipements et des méthodes permet d'optimiser l'extension vers les basses fréquences.

L'ancien banc transféré pourra être mis au rebut. Le déménagement aura été utile en favorisant l'échange des compétences et en facilitant la comparaison entre l'ancien et le nouveau système pour la continuité des références métrologiques. D'autre part, ce déménagement aura permis une reprise de l'activité plus rapide. En effet, le nouveau système basé sur un analyseur numérique, pose encore des problèmes de traçabilité métrologique qu'il faudra lever.

## 7. Conclusion

Le transfert des références en accélérométrie du CEA-CESTA vers le LNE, s'est concrétisé par le déménagement du banc de référence en vibration sinusoïdale moyenne et haute fréquence par méthode absolue.

Le soin apporté dans ce déménagement, dans l'appropriation des techniques et processus de ce nouveau domaine pour le LNE et l'importance accordée à la confirmation de la stabilité métrologique de cette référence ont permis de démontrer l'aptitude de l'équipe à intégrer l'activité d'un nouveau domaine de mesure et à réaliser les étalonnages correspondants avec un des plus hauts niveaux métrologiques.

Le raccordement des mesures de l'industrie a été rendu à nouveau opérationnel. Ces raccordements sont nécessaires pour les industriels ayant des processus où la connaissance des paramètres liés à l'accélération est primordiale en terme de qualité et de sécurité comme les domaines de l'armement, du nucléaire, de l'aérospatial ou de l'automobile.

La dynamique créée par ce transfert se poursuit actuellement par les opérations de comparaisons internationales et par une remise à niveau des moyens devant permettre au LNE, et à la métrologie française, de prendre une place majeure dans le concert des grands laboratoires en accélérométrie.

## Remerciements

L'auteur tient à remercier Christian Barreau, responsable du laboratoire d'accélérométrie au CEA-CESTA pour l'aide apportée au transfert du banc.

Cédric de Waubert (LNE) a également participé activement au transfert. Enfin, Jean-Noël Durocher, responsable du laboratoire d'acoustique au LNE, a apporté son expertise dans le traitement des signaux.

## Références

- [1] FROMENTIN J., CEA-CESTA, « Méthodes d'étalonnage absolues de capteurs d'accélération moyenne fréquence », Bulletin du BNM, 1974, vol.5, **15**, 15-20.
- [2] ISO, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic concepts – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry", ISO16063.