

ETALONNAGE DE CAPTEURS DE FORCE ET DE DEPLACEMENT POUR MESURES EN SODIUM LIQUIDE A PARTIR DE LA TEMPERATURE AMBIANTE JUSQU'A 350 °C ET EXEMPLES DE RESULTATS.

Jean-Louis Portier¹, Arnaud Sabaté², Jocelyn Périssé³ et Raymond Buisson⁴

¹CEA – Centre de Cadarache, DTN/STCP/LIET 13 108 Saint-Paul Lez Durance, France

²PRESCAMEX, 10, rue des Ardennes 77 123 Le Vaudoué, France

³AREVA NP, 10, rue Juliette Récamier 69 456 Lyon Cedex 06, France

⁴RBConsultant, 16, rue de la carrière 60 300 Senlis, France

Abstract. Special tests have to be performed at high temperatures (up to 350 °C) in liquid sodium in order to qualify numerical model of dynamic behavior of mechanical structures. Accurate measurements have to be taken during these tests, in order to compare the results of the model calculations with what really happens on the structure. Among all the parameters to be measured inside the liquid sodium, the most important are efforts and relative displacements. Unfortunately, no sensors of these types of parameters, able to take measurement in sodium at 350 °C, are available on the market. In addition to that, the sensors which are needed have to be integrated in the tested structure without large modifications of it. Considering all of that, it has been decided to build special sensors. They are of cantilever type and their sensitive devices are high temperature weldable strain gages. The basis of their design and their description are given. Their measurement values have to be confident and for that they have to be metrologically traceable to the International System of units (SI). That is to say that these special sensors have to be calibrated at temperatures up to 350 °C. But no efforts and displacements measurement standards, working up to 350 °C, are available on the market. The calibration technique which is describe in the document is based on the engineering and fabrication of a special high temperature calibration bench working on the differential method for the coupling between the measurements standards and the sensors which has to be calibrated. These ones are inside an oven and the measurement standards are outside it, at ambient temperature. Thanks' to that, the measurements standards can be simply normal sensors with calibration certificates established by accredited organisms. All the analyses and calculations which demonstrate that the errors coming from the variations of the temperature of the calibration bench stay below the specifications limits are explained. The validation test of this calibration bench which show that the calibration uncertainty is below 0.1 to 0.2% is described. Then the results of the calibrations of the effort and displacement sensors are given. Effort sensor will be able to give measurement results with uncertainties of about 0,6% when they are used at ambient temperature and 1% when they are used at 320 °C. The same figures for the displacement sensors are respectively 1,3% and 1,7%. At the end of the document an example of a useful application of these sensors is given.

1 Contexte, nécessité de faire des mesures à haute température

Une expérimentation ayant pour but de qualifier un logiciel de simulation numérique de comportement dynamique de structures spéciales doit être mise en œuvre.

Cette expérimentation doit se faire en vrai grandeur sur une structure réelle. Le comportement mécanique de celle-ci

doit être entièrement caractérisé, avec une grande exactitude, par un ensemble de moyens de mesure comprenant plusieurs types de capteurs (pression, force, déplacements, etc.).

Du fait que les mesures doivent être relevées dans des conditions rigoureusement identiques aux conditions d'utilisation de la structure, les conditions de mesure sont

^a Email de correspondance de l'auteur : jean-louis.portier@cea.fr

extrêmement sévères : l'essentiel de la structure est plongée dans du sodium liquide dont la température peut varier de 180 à 350 °C.

Les grandeurs à mesurer sur les éléments de la structure immergés dans le sodium à haute température sont : des pressions dynamiques, des températures, des vibrations, des déplacements et des efforts.

Il existe dans le commerce des capteurs susceptibles de mesurer des pressions, des températures et des vibrations jusqu'à 350 °C et même au-delà.

Par contre, pour les mesures de force et de déplacement, il n'y a rien qui permette de faire les mesures souhaitées. De plus, ces mesures doivent être réalisées en des points très précis à l'intérieur du sodium liquide sans modifier significativement le comportement mécanique de la structure en essai, ni l'écoulement du sodium liquide. Il a donc été décidé de fabriquer des capteurs spéciaux de forces et de déplacement.

2 Performances requises des capteurs spéciaux

Les exigences d'exactitude combinées avec la sévérité des conditions d'environnement, l'encombrement réduit et la rapidité des phénomènes à étudier font que ces capteurs spéciaux doivent avoir des performances de haut niveau définies dans le tableau ci-après.

Tableau 1.

Valeurs des paramètres caractérisant les performances des capteurs.

Paramètres		Effort dynamique	Déplacement
Etendue de mesure :		0 _ 9000 N	0 _ 10 mm
Environnement :	Température :	Amb. _ 350 °C	Amb. _ 350 °C
	Fluide environnant :	Sodium liquide	Sodium liquide
Erreur maxi :		0,7%	0,3%
Dynamique, Bande passante		0 _ 500 Hz	0 _ 10 Hz

A ces performances métrologiques, il faut ajouter d'autres performances d'ordre pratique permettant de satisfaire les exigences résultant des conditions particulières d'installation et d'emploi des capteurs.

Aussi, il faut que ceux-ci puissent s'inscrire dans l'emprise des éléments du système sans que les caractéristiques mécaniques (rigidité et tenue mécanique principalement) de ces éléments soient modifiées.

3 Eléments sensibles, principe de fonctionnement et conception des

capteurs spéciaux d'effort et de déplacement retenus

Parmi tous les phénomènes physiques permettant de transformer les grandeurs mesurées en signaux électriques (effets magnétiques tels que : variation de réluctance, variation d'inductance, courants de Foucault, ou effet électrostatiques tels que : piézoélectricité, variation de capacité, ou effet piézorésistif, ou effets optiques tels que : variation de pas de réseaux de Bragg, variation de longueur de chemin optique, interférences, effet Sagniard, ou etc.), celui qui a été retenu est l'effet piézorésistif.

C'est le seul pour lequel, actuellement, il existe des dispositifs dont le fonctionnement fiable à hautes températures a été démontré et dont la mise en œuvre est relativement aisée. Ces dispositifs sont généralement appelés improprement « jauges de contraintes » dont la désignation exacte est jauges de déformations.

Les jauges de déformations finalement retenues sont les jauges à très hautes températures soudables. Avec cette technologie de jauges soudables, il est possible de faire des mesures jusqu'à 950 °C. Le modèle qui a été utilisé ici (voir photo figure 1) est un modèle qui est fait pour fonctionner jusqu'à 650 °C.



Figure 1.

Vue d'une jauge résistive soudable, haute température, avant installation (Document Kyowa).

Ces jauges, en alliage métallique réfractaire (Inconel), sont couplées aux pièces dont les déformations mécaniques doivent être mesurées à l'aide de points de soudure réalisés avec une soudeuse électrique par points. Les éléments sensibles des capteurs spéciaux qui seront utilisés au cours de l'expérimentation seront donc des jauges de déformation.

Pour concevoir ces capteurs, il faut donc imaginer des pièces qui sont appelées : « corps d'épreuve », dont les déformations mécaniques seront proportionnelles aux grandeurs à mesurer (déplacements pour les capteurs de déplacement et efforts pour les capteurs d'effort).

Le type de pièce retenu comme « corps d'épreuve » est : « la poutre encastrée en flexion » (« cantilever beam » pour les anglo-saxons).

Les allures des capteurs ainsi conçus sont celles représentées sur la figure 2 pour les capteurs d'effort et la figure 3 pour les capteurs de déplacement.

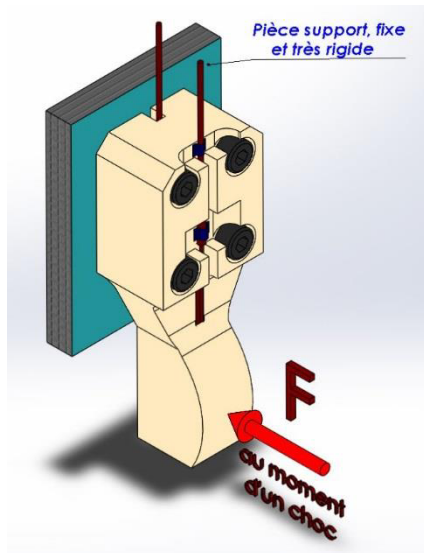


Figure 2.

Vue du corps d'épreuve des capteurs d'effort et de leur fixation sur les pièces dans lesquelles ils sont intégrés.

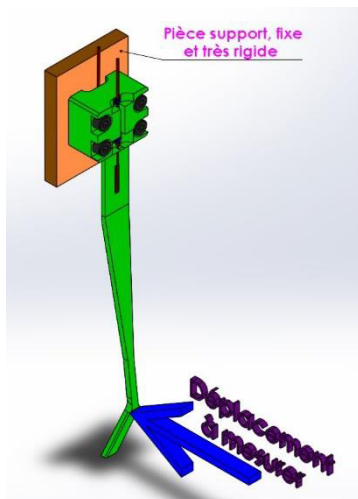


Figure 3.

Vue du corps d'épreuve des capteurs de déplacement et de leur fixation sur les pièces dans lesquelles ils sont intégrés.

Les corps d'épreuve des capteurs ont d'abord été dimensionnés minutieusement, comme ceci se fait chaque fois qu'un nouveau capteur standard pour mesure à température ambiante ou voisine de l'ambiante, est développé. Ce dimensionnement a principalement pour but d'obtenir un capteur de sensibilité égale à la sensibilité requise et de tenue mécanique ainsi que de stabilité au cours du temps acceptables en tenant compte des particularités propres à l'utilisation des jauges résistives soudables.

Les formes des corps d'épreuve doivent en effet permettre d'installer correctement ces jauges dont les dimensions sont plus importantes que celles des jauges traditionnelles à trames pelliculaires. Il faut aussi prendre des précautions pour que, d'une part, les rayons de courbures imposés à la partie sensible des jauges ainsi qu'aux câbles spéciaux à isolant minéral de liaison aux appareils de mesure restent

supérieurs à des rayons de courbure minimum relativement élevés imposés par les fournisseurs de jauges. D'autre part, il faut s'arranger pour que la géométrie des corps d'épreuve soit telle que, dans la zone où sont soudées les parties sensibles des jauges, les répartitions des déformations mécaniques soient uniformes.

Ensuite, le dimensionnement standard a été complété par l'étude approfondie des effets de la haute température sur le fonctionnement du capteur afin que celle-ci ne provoque pas de dégradations rédhibitoires des performances des capteurs.

Les principaux aspects qu'il faut prendre en compte lorsque des capteurs à poutre encastrée en flexion doivent être utilisés à haute température sont : les risques de desserrage de l'encastrement et les effets des dérives en température des indications des jauges résistives de déformation.

C'est cette étude qui a conduit :

- Aux dimensions relativement importantes des embases de fixation des capteurs (voir figures 2 et 3),
- Au nombre de vis sur chaque embase (4),
- Aux choix des matériaux des corps d'épreuve et des vis (Inconel 718),
- A l'installation de 2 jauges soudables, sollicitées en sens inverse, sur chaque corps d'épreuve afin de doubler la sensibilité des capteurs et d'éliminer automatiquement l'effet de la dérive en température des jauges.

Les calculs des dimensions d'embases et de couples de serrage des vis sont faits de telle manière que les phénomènes de non linéarité et d'hystérésis du capteur restent à des niveaux suffisamment faibles pour que les exigences d'exactitude (erreur maxi) soient respectées à l'ambiante mais aussi à la température maximale de 350 °C.

4 Traçabilité métrologique au système international d'unités (SI) des capteurs spéciaux

4.1 Particularité de l'étalonnage des capteurs destinés aux mesures à faire à haute température

La traçabilité métrologique au SI des capteurs se fait par l'intermédiaire d'une opération d'étalonnage. Comme indiqué dans le § 2.39 du VIM (Vocabulaire International de Métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés) [1], un étalonnage est : « l'opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes associées qui sont fournies par les étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis etc. ». Dans le cas présent, la relation est l'égalité des efforts ou des déplacements indiqués par les capteurs à étalonner et les indications correspondantes des étalons.

L'étalonnage consiste donc à comparer les indications des capteurs à étalonner et celles des capteurs étalons lorsqu'ils sont soumis aux mêmes valeurs des grandeurs à mesurer.

La particularité de cette opération tient au fait que pendant l'étalonnage les capteurs doivent se trouver dans des

conditions d'environnement semblables à celles existant lors de leur utilisation réelle.

Ceci veut dire que l'étalonnage doit être réalisé, non seulement, à la température ambiante, mais aussi à d'autres températures pouvant aller jusqu'à 350 °C.

Seulement, à ces températures, il est très difficile voire impossible de trouver des capteurs étalons.

La technique permettant de contourner cette difficulté est présentée dans le sous-paragraphe ci-après.

4.2 Technique employée pour étalonner jusqu'à une température de 350 °C, les capteurs de force ainsi que de déplacement qui seront utilisés au cours de l'expérimentation et conception du banc d'étalonnage

La technique employée pour étalonner jusqu'à 350 °C les capteurs de force et de déplacement qui seront utilisés au cours de l'expérimentation consiste à placer le capteur en cours d'étalonnage dans une enceinte isotherme (caisson d'une étuve) maintenue à la température d'étalonnage (température pouvant être choisie entre l'ambiante et 350 °C) et les capteurs étalons à l'extérieur de l'enceinte.

Ainsi, ces derniers sont à la température ambiante ou à une température voisine de la température ambiante. Il est alors possible d'utiliser des capteurs étalons conventionnels.

Les capteurs utilisés étaient en réalité de simples capteurs d'effort et de déplacements achetés dans le commerce munis de certificats d'étalonnage établis par des laboratoires accrédités.

Pour les efforts, le capteur étalon est un capteur Vishay Measurement Group de 25 000 N d'étendue de mesure (voir figure 4).



Figure 4.

Capteur étalon pour les mesures d'effort

Pour les déplacements, le capteur étalon est un capteur Heidenhain à règle optique de 1 µm de résolution (voir figure 5).

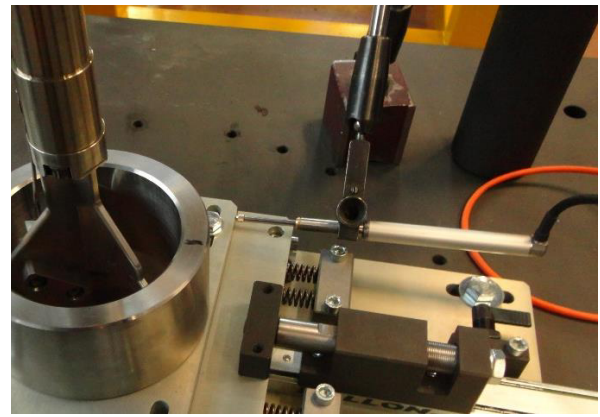


Figure 5.

Capteur étalon pour les mesures de déplacement

Par contre, pour que cette technique simple et économique du point de vue du choix des capteurs étalons, soit acceptable en ce qui concerne la traçabilité métrologique au SI, il est nécessaire de garantir que les capteurs étalons et les capteurs en cours d'étalonnage sont bien soumis aux mêmes valeurs de mesurande.

A la température ambiante, cela ne fait aucun doute.

A 350 °C, la même affirmation n'est pas aussi immédiate. Le comportement en température des montages mécaniques couplant les capteurs à étalonner aux capteurs étalons peuvent introduire des écarts entre les valeurs mesurées par les capteurs à étalonner et celles mesurées par les capteurs étalons, en particulier dans le cas des mesures de déplacement.

Dans le but de minimiser au maximum, sinon d'éliminer, ces écarts, il a été décidé de construire un banc d'étalonnage spécial basé en premier lieu sur un type de montage qui en théorie élimine les erreurs dues aux variations de température : **le montage différentiel**.

Dans ce type de montage, le système qui réunit le capteur à étalonner au capteur étalon est constitué de 2 ensembles de pièces concentriques : de matériaux de même nature, de mêmes longueurs et portées aux mêmes températures.

L'un des ensembles de pièces est solidaire de l'embase du capteur à étalonner et constitue le référentiel de la mesure. L'autre est solidaire du point d'application de la grandeur à mesurer.

Dans le cas de l'étalonnage des capteurs de déplacement, les capteurs à étalonner mesurent les déplacements relatifs entre les extrémités de chacun des 2 ensembles se trouvant à l'intérieur de l'enceinte.

Le capteur étalon mesure la différence de déplacement entre les 2 autres extrémités de chacun des 2 ensembles, qui, elles, se trouvent à l'extérieur de l'enceinte.

Cette différence de déplacement est égale à la différence de déplacement des extrémités se trouvant à l'intérieur de l'enceinte, éventuellement modifiée par des différences de dilatations thermiques linéaires des pièces mécaniques constituant les 2 ensembles.

Si les conditions indiquées ci-avant (matériaux de même nature, mêmes longueurs et mêmes températures) sont

effectivement satisfaites, alors les différences de dilatations thermiques sont nulles.

Le schéma de principe de constitution et de fonctionnement de ce banc d'étalonnage est donné sur la figure 6.

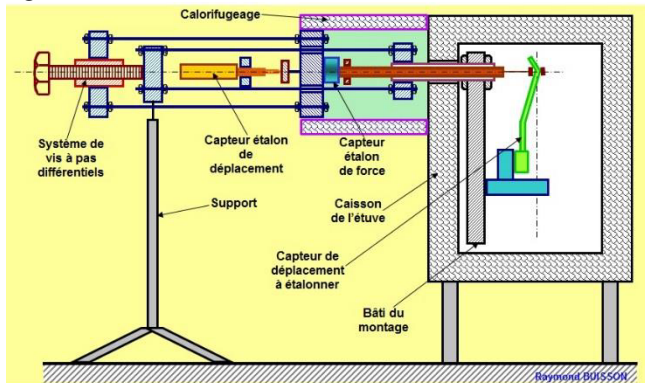


Figure 6.

Schéma de principe du banc d'étalonnage

Ce type de banc d'étalonnage ne fonctionne correctement que si les dispositifs d'actionnement qui permettent de faire varier les mesurandes appliqués sur les capteurs sont en amont des capteurs étalons, c'est-à-dire aussi à l'extérieur de l'enceinte en température.

En second lieu, pour minimiser au maximum, sinon éliminer les écarts entre les valeurs de mesurandes appliqués aux capteurs à étalonner et celles appliquées aux capteurs étalon, le dimensionnement des pièces faisant partie des 2 ensembles de couplage des capteurs est calculé avec grande précision.

En particulier l'effort nécessaire à l'application d'un déplacement sur le capteur de déplacement à étalonner engendre des contraintes mécaniques de traction dans la barre (ou la tige) d'application du déplacement au capteur à étalonner et des contraintes mécaniques de compression dans le tube et le bâti du montage constituant la référence du système de mesure.

Aux contraintes mécaniques de traction de la barre d'application du déplacement correspondent des déformations mécaniques d'allongement qui se traduisent par une légère augmentation de longueur de la barre. Au contraire les contraintes mécaniques de compression dans le tube et dans le bâti du montage, il correspond des déformations mécaniques de contraction qui se traduisent par une légère réduction de longueur. Les valeurs absolues de ces 2 variations de longueur s'ajoutent et constituent une erreur sur l'indication du capteur de déplacement étalon.

Les pièces sollicitées en traction et en compression ont été dimensionnées de manière à ce que cette erreur soit négligeable par rapport à l'erreur maxi tolérée sur la grandeur mesurée. L'écart est inférieur à 0,05% de la grandeur mesurée, soit 5 μm lorsque le capteur de déplacement mesure 10 mm.

Le même genre de calcul de dimensionnement a été fait sur tous les constituants structuraux du banc d'étalonnage

(traverses, tirants de renvoie d'effort, supports de capteurs, etc.).

De plus, pour permettre à l'opérateur d'appliquer des valeurs de grandeurs à mesurer entières (par exemple : 1,0000 mm), lui permettant de se rendre compte facilement s'il y a des écarts entre les indications du capteur à étalonner et celles du capteur étalon, un actionneur par système de vis à pas différentiels a été réalisé.

Ceci permet de se rendre compte immédiatement si il y a des anomalies dans l'étalonnage. Grâce à ce système à vis à pas différentiels, il est possible, par exemple, d'appliquer une valeur de déplacement sur le capteur à étalonner à mieux que le micron.

Pour que les erreurs d'étalonnage dues au fonctionnement légèrement imparfait du montage différentiel soient négligeables, il faut qu'à l'intérieur de l'enceinte la température soit uniforme à 0,5 $^{\circ}\text{C}$ et qu'au niveau de la partie du montage différentiel à l'extérieur de l'étuve, la température soit uniforme à 0,5 à 1 $^{\circ}\text{C}$ près.

C'est pour cela, qu'à l'intérieur de l'étuve, le montage d'étalonnage a été placé dans une enveloppe calorifugeante composée d'une première couche de laine de roche, de plaques d'aluminium de 5 mm d'épais et d'une deuxième couche de laine de roche (voir figure 9).

La partie du montage différentiel se trouvant à l'extérieur de l'étuve est isolée thermiquement par une enveloppe de plusieurs épaisseurs de laine de roche (voir figure 6 : calorifugeage).

Le banc d'étalonnage est aussi conçu de manière à ce que les 2 capteurs étalons (capteur étalon d'effort et capteur étalon de déplacement) fonctionnent en même temps, que le capteur à étalonner soit un capteur d'effort ou un capteur de déplacement.

Ainsi, au moment d'un étalonnage de capteur d'effort, le capteur étalon de déplacement indique la flèche prise par le capteur et inversement lors d'un étalonnage de capteur de déplacement, le capteur étalon d'effort indique l'effort nécessaire à l'application du déplacement.

De cette manière, dans un cas comme dans l'autre, en plus de fournir les informations nécessaires à l'établissement du certificat d'étalonnage, le banc d'étalonnage permet en même temps de déterminer les coefficients de raideur des capteurs.

Pour terminer la présentation des particularités du banc d'étalonnage, il y a lieu de signaler la technique employée pour éliminer les erreurs dues aux phénomènes irréversibles souvent présents dans les montages d'étalonnage.

Lorsque les étalonnages sont réalisés à hautes températures, ces phénomènes peuvent prendre des amplitudes gênantes, qui plus est, de manière aléatoire. Ils apparaissent lorsque qu'il y a des glissements entre certaines pièces intervenant dans l'application ou la mesure des grandeurs, objets de l'étalonnage. A haute température, les coefficients d'adhérence ou de frottement

peuvent brutalement changer de valeur et engendrer ainsi des erreurs imprévisibles.

Ces phénomènes ennuyeux apparaissent dans les dispositions de type articulations, guidages, etc.

Pour éliminer ce type d'erreur, l'articulation qu'il y aurait eu lieu d'utiliser pour appliquer les valeurs de mesurande sur le capteur à étalonner a été remplacée par une articulation fictive.

C'est une lame élastique qui possède les 2 degrés de liberté autorisant les déplacements relatifs qui doivent se produire entre le capteur à étalonner et la pièce d'application des valeurs du mesurande au moment de l'application de celles-ci (voir figure 7).

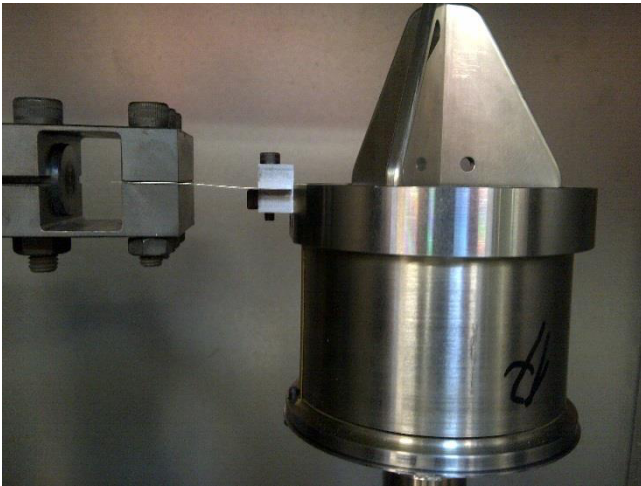


Figure 7.

Articulation fictive reliant l'extrémité d'un capteur à étalonner à l'extrémité de la barre d'application des valeurs du mesurande

Les degrés de liberté de l'articulation fictive de la figure 7 sont le déplacement vertical et la rotation autour d'un axe horizontal perpendiculaire au plan de la figure.

La technique de l'articulation fictive élimine tout déplacement relatif de glissement entre pièces, mais n'annule pas les actions de contact (efforts et/ou moments).

Ainsi les phénomènes irréversibles qui provoquent des défauts de non linéarité et/ou d'hystérésis, impossibles à corriger, sont éliminés. Les actions de contact sont, quant à elles, connues et proportionnelles à la grandeur à mesurer. D'où 2 possibilités pour assurer l'exactitude des résultats de l'étalonnage : soit les actions de contact sont très faibles par rapport à l'erreur maximale tolérée et elles sont négligées, soit elles ne sont pas très faibles. Dans ce cas, ce sont des erreurs systématiques qui, du fait que les actions de contact sont proportionnelles aux grandeurs à étalonner, sont connues et du coup sont éliminées par correction des indications des capteurs étalons.

Dans le cas du banc d'étalonnage dont il est question ici, ce sont les effets des moments qui sont les plus importants. Les erreurs qui en résultent demeurent tout de même faibles. Elles ne sont que de 0,06% de la mesure dans le cas de l'étalonnage des capteurs d'effort et de 0,03% de la

mesure dans le cas de l'étalonnage des capteurs de déplacement.

En plus de l'articulation pour l'application des valeurs des mesurandes aux capteurs à étalonner, il y a un autre dispositif qui présente un phénomène de glissement. C'est le guidage en translation de l'extrémité, coté enceinte, de la barre d'application des valeurs des mesurandes aux capteurs à étalonner.

Pour rendre négligeables, les erreurs dues aux glissements, cette barre est en appui sur 2 petits roulements à billes comme indiqué sur la figure 8.

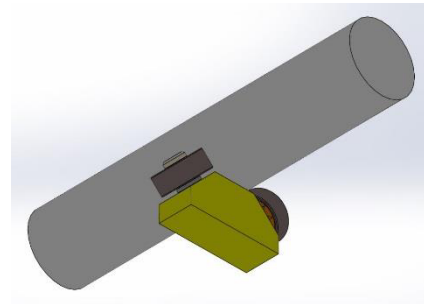


Figure 8.

Mode de supportage de la barre de traction, limitant les erreurs de trainée dues aux frottements.

Les efforts normaux qui, par frottement engendrent les composantes axiales qui provoquent les erreurs de d'indication du capteur étalon d'effort sont la masse de la barre et les efforts de flexion de la lame élastique de l'articulation fictive. L'utilisation de roulements à billes réduit d'un facteur au moins égal à 10 l'amplitude de ces erreurs.

Dans le cas de l'étalonnage des capteurs d'efforts, l'effet de la masse produit une erreur de 0,18 N (soit 0,002% de l'étendue de mesure des capteurs) et l'effet de la flexion de la lame élastique produit une erreur de $18,35 \cdot 10^{-6}$ fois l'effort à mesurer (soit 0,00183% de l'effort mesuré).

Ces erreurs sont négligeables.

4.3 Validation du banc d'étalonnage

Le banc d'étalonnage une fois réalisé conformément à sa définition résultant de l'étude de conception et de dimensionnement, a été validé à l'aide d'un mannequin au cours d'un essai spécifique.

Ce mannequin est une barre très rigide munie d'une embase en forme de bride se montant sur le bâti du banc d'étalonnage. Ainsi, l'embase est serrée sur la traverse inférieure de ce dernier et la barre peut être considérée comme encastrée sur le banc d'étalonnage (voir photo sur la figure 9).



Figure 9.

Photo du mannequin en cours d'installation sur le banc d'étalonnage à l'intérieur de l'enceinte en température.

Pour faire l'essai, les capteurs étalons d'effort et de déplacement sont normalement attelés aux extrémités des ensembles de couplage des capteurs.

Plusieurs montées descentes progressives en température à l'intérieur de l'enceinte, entre la température ambiante et 350 °C, ont alors été réalisées.

Les résultats obtenus montrent que lorsque la température varie de 330 °C (350 °C – θ Amb de 20 °C), il y a une indication de variation de déplacement entre les extrémités des 2 dispositifs de couplage de 50 μ m et une variation d'effort d'environ 15 N, les 2 évoluant dans le même sens.

Des calculs de comportement mécanique de l'ensemble « banc d'étalonnage / mannequin » montrent que 15 N est l'effort qu'il faut appliquer au mannequin pour le faire fléchir de 50 μ m.

Le défaut de comportement imparfait du montage différentiel est donc tel que lorsque la température varie de 330 °C la différence de dilatation entre les deux ensembles de couplage des capteurs est de 50 μ m.

Les étalonnages ne sont jamais réalisés au cours de telles variations de température. Ils sont toujours réalisés à température constante à +/- environ 1°C.

Au cours d'un étalonnage, l'erreur d'indication du capteur étalon de déplacement sera donc de $50/330 = 0,15 \mu$ m. Ceci correspond à 0,0015% de l'étendue de mesure des capteurs de déplacement. Cette erreur a été négligée.

Le banc d'étalonnage a été déclaré conforme au besoin.

4.4 Incertitude d'étalonnage

Au cours de la conception du banc d'étalonnage, la réduction de l'incertitude d'étalonnage a été un souci permanent (voir § 4.2).

Ce n'est pas pour autant que les incertitudes sur les indications des capteurs étalons sont nulles. Elles doivent donc être quantifiées.

Cette opération est réalisée en utilisant le GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement ou norme NF EN ISO 13 005) [2].

Dans le cas général, la mise en œuvre de cette norme se fait au travers d'une démarche en 7 étapes qui sont :

- la définition du modèle mathématique du mesurage,
- L'établissement de la liste des grandeurs mesurées,
- La recherche des facteurs influents,
- Le choix des lois de densité de probabilités à priori et la quantification des effets des facteurs influents (incertitudes types),
- La détermination des incertitudes types composées sur chacune des grandeurs mesurées en utilisant la loi du cumul des variances,
- La détermination de l'incertitude globale sur les grandeurs étudiées en utilisant la loi de propagation des incertitudes,
- La détermination de l'incertitude élargie.

Pour le banc d'étalonnage dont il est question ici, du fait que dans chaque cas de détermination d'incertitude (incertitude sur les mesures d'efforts de référence, incertitude sur les mesures de déplacement de référence), l'incertitude est déterminée directement sur l'indication du système de mesure, la démarche en 7 étapes se simplifie. Le modèle mathématique du mesurage se limite au nom de la grandeur mesurée. La liste des grandeurs mesurées se limite au paramètre mesuré.

Il n'y a pas de détermination d'incertitude globale puisque le modèle mathématique se limite au nom de la grandeur mesurée. L'incertitude globale est confondue avec l'incertitude type composée.

En conséquence, la détermination des incertitudes comprend essentiellement la recherche des facteurs influents et la quantification de leurs effets.

La recherche des facteurs influents est faite de manière structurée en utilisant le diagramme de recherche de causes à effets d'Ishikawa spécifique à l'analyse des phénomènes susceptibles de perturber les moyens de mesure (voir figure 10).

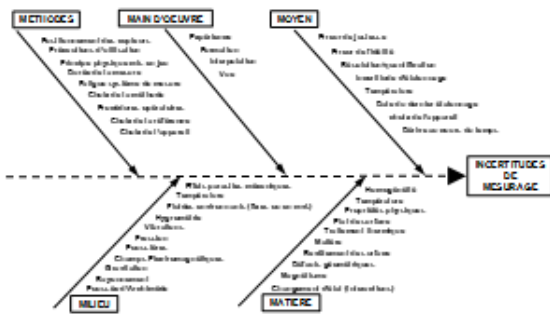


Figure 10.

Diagramme de cause à effet d'Ishikawa adapté à la recherche des facteurs influents provoquant les erreurs qui sont à l'origine des incertitudes d'un système de mesure.

C'est un diagramme basé sur la règle des 5 M. Il est utilisé pour établir la liste des facteurs influents. Pour chaque grandeur mesurée, il est balayé et les phénomènes qui sont identifiés comme étant influents sont listés ci-après sous leur dénomination qui correspond aux essais d'étalonnage des capteurs d'effort ou de déplacements.

Les phénomènes qui ne sont pas retenus n'apparaissent pas dans la liste. Il n'a pas été jugé pertinent de justifier pourquoi ils n'ont pas été retenus.

Les facteurs influents à l'origine de l'incertitude sur les indications du capteur étalon d'effort qui ont été identifiés sont :

- le défaut de linéarité du capteur,
- l'erreur d'hystérésis du capteur,
- l'erreur de répétabilité du capteur,
- la dérive en température du zéro du capteur,
- la dérive en température de la sensibilité du capteur,
- le frottement dans les roulements à billes de guidage de l'extrémité de la barre de traction sous l'action de la masse de celle-ci,
- le frottement dans les roulements à billes de guidage de l'extrémité de la barre de traction sous l'action de l'effort de flexion des lames élastiques,
- L'effet du moment de flexion parasite qui apparaît lorsque les lames élastiques d'application de l'effort à mesurer sont fléchies.

Les facteurs influents à l'origine de l'incertitude sur les indications du capteur étalon de déplacement qui ont été identifiés sont :

- le défaut d'exactitude de la partie numérique du système de mesure de déplacement de référence (système de mesure HEIDENHAIN),
- l'effet de l'erreur de linéarité du convertisseur numérique analogique,
- la résolution de la partie numérique du système de mesure de déplacement de référence,
- les déplacements parasites dus aux augmentations ou diminutions de longueur des pièces de couplage dus aux efforts de transmission des déplacements,

- le léger écart qu'il peut y avoir entre les coefficients de dilatation thermique linéaire de la barre de traction, du tube de réaction, du matériau de la traverse, des lames élastiques et de la pince,
- la différence de coefficient de dilatation qu'il y a entre le matériau du montage d'étalonnage et l'inconel 718, lorsque le déplacement à mesurer n'est pas égal à zéro.

Pour chacun des 2 types de grandeurs à mesurer, les amplitudes des effets de ces facteurs influents et les lois de distributions statistiques a priori sont déterminées, la plupart du temps, en utilisant la méthode type B de détermination des incertitudes.

Toujours pour chacun des 2 types de grandeurs mesurées, ces effets sont cumulés en utilisant la loi de propagation des incertitudes.

Une fois tous ces calculs faits, pour chaque type de grandeur mesurée, l'incertitude se met sous la forme d'une expression comprenant un terme constant et un terme proportionnel à la grandeur mesurée. Il y a un jeu de coefficients de ces expressions pour chaque température d'étalonnage.

Ainsi, par exemple, l'incertitude sur les indications du capteur étalon d'effort au cours des étalonnages à la température ambiante est donnée par la relation :

$$U_{F_Réf} = 10,02 \cdot \sqrt{1 + 5,607\,422 \cdot 10^{-9} \cdot Fm^2} \text{ N} \quad (1)$$

à 320 °C, la relation est :

$$U_{F_Réf} = 10,02 \cdot \sqrt{1 + 4,789\,223 \cdot 10^{-9} \cdot Fm^2} \text{ N} \quad (2)$$

De manière similaires, les relations qui donnent les incertitudes sur les indications du capteur étalon de déplacement sont, par exemple :

$$U_{d_Réf} = 0,0037 \cdot \sqrt{1 + 0,131\,451 \cdot dm^2} \text{ mm} \quad (3)$$

pour les étalonnages à la température ambiante, et

$$U_{d_Réf} = 0,026 \cdot \sqrt{1 + 1,968\,835 \cdot 10^{-3} \cdot dm^2} \text{ mm} \quad (4)$$

pour les étalonnages à 320 °C.

Ainsi, par exemple, l'incertitude sur l'indication du capteur étalon de déplacement lors d'un étalonnage à la température ambiante d'un déplacement de 10 mm est de : 0,014 mm. Ce qui fait une incertitude relative de : 0,14%. Cette incertitude n'est pas très élevée, mais pas si faible que cela par rapport à l'erreur maxi spécifiée qui est de 0,3%.

L'incertitude pour le même étalonnage à 320 °C est de : 0,029 mm, soit une incertitude relative de 0,29%, toujours à comparer à l'erreur maxi spécifiée qui est de 0,3%.

Ainsi, il apparaît qu'à 320 °C, il va être difficile de respecter les exigences spécifiées puisque l'incertitude d'étalonnage est déjà presque égale à l'erreur maxi spécifiée.

5 Résultats de l'étalonnage

5.1 Caractérisation du fonctionnement des capteurs

Tous les capteurs d'effort et de déplacement ont été étalonnés, en général, à 3 températures différentes (à la température ambiante, à 180 °C et à 320 °C).

A chaque étalonnage, les capteurs sont soumis à une succession de 3 cycles de montée descente de la grandeur mesurée.

Pour visualiser, le fonctionnement des capteurs, les courbes de réponse (signal de sortie en fonction de l'indication du capteur étalon) sont tracées.

Un échantillon de courbes obtenues pour un capteur d'effort et un capteur de déplacement est donné sur les figures 11, 12 13, 14, 15, 16, 17 et 18.

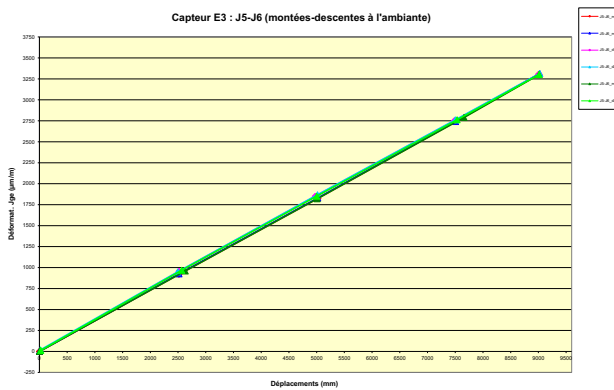


Figure 11.

Courbe de réponse d'un capteur d'effort étalonné à la température ambiante.

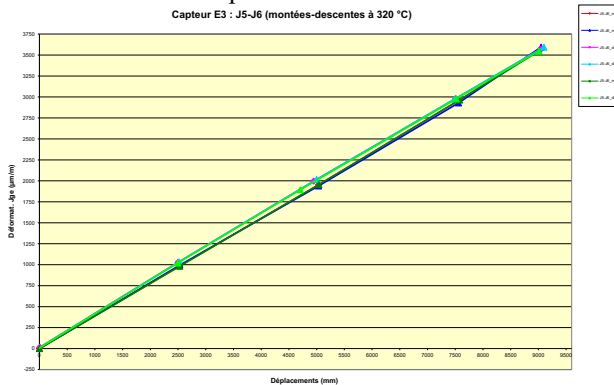


Figure 12.

Courbe de réponse d'un capteur d'effort étalonné à 320 °C.

Au premier abord, ces courbes montrent que le capteur :

- a une réponse d'une assez bonne linéarité,
- est un peu plus sensible à 320 °C qu'à l'ambiante,
- est assez répétitif,
- a un assez bon retour à zéro.

En y regardant de plus près, il apparait que les courbes représentant la descente sont toutes légèrement au-dessus des courbes représentant la montée et que ces écarts sont plus importants à 320 °C qu'à la température ambiante (environ à peine une fois et demie).

Ce phénomène se voit beaucoup mieux sur les courbes qui représentent les écarts entre les indications des capteurs et la droite des moindres carrés de leur réponse (courbes d'erreur des capteurs) (voir figure 13 et 14).

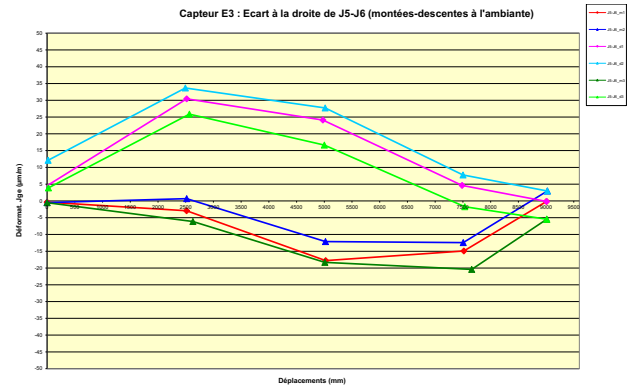


Figure 13.

Courbes d'écarts entre les indications des capteurs étalonnés à la température ambiante et la droite des moindres carrés de leur réponse.

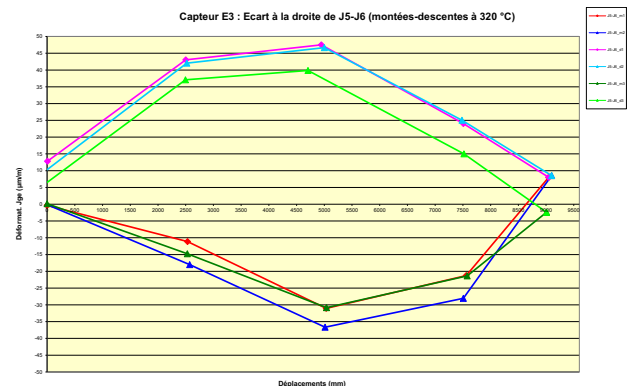


Figure 14.

Courbes d'écarts entre les indications des capteurs étalonnés à 320 °C et la droite des moindres carrés de leur réponse.

Les courbes d'écarts montrent que les capteurs présentent des erreurs de non linéarité et d'hystérésis dont l'amplitude cumulée est d'environ 0,9% à l'ambiante et 1,2% à 320 °C. Il y a 2 causes principales à ces erreurs. La première est une particularité des jauges résistives soudables à hautes température. Contrairement aux jauges à trames pelliculaires, ces jauges présentent toujours un petit décalage entre des indications obtenues au cours d'une montée en déformation et des indications obtenues au cours de la descente qui lui succède. La deuxième est la présence de micro glissements irréversibles au niveau de l'embase de fixation du capteur (l'encastrement du corps d'épreuve du capteur, qui est une poutre encastree, n'est pas un encastrement parfait).

Les mêmes types de courbes de réponses et d'écarts sont obtenus avec les capteurs de déplacements (voir figures 15 à 18).

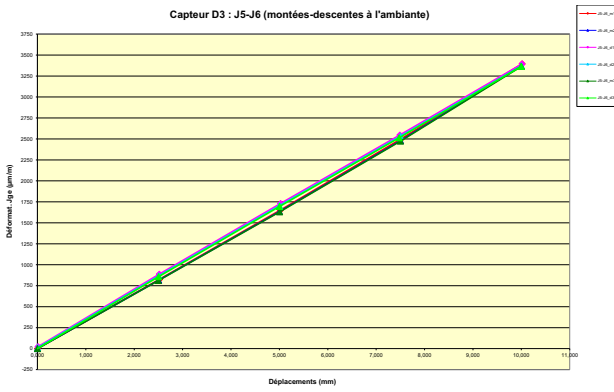


Figure 15.

Courbe de réponse d'un capteur de déplacement étalonné à la température ambiante.

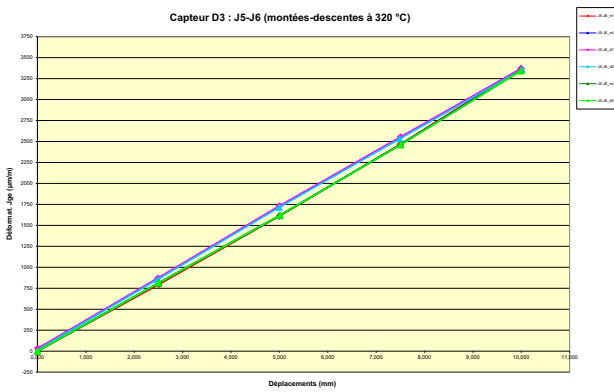


Figure 16.

Courbe de réponse d'un capteur de déplacement étalonné à 320 °C.

Les écarts entre les courbes de réponses obtenues à la montée et celles obtenues à la descente sont légèrement plus importants qu'avec les capteurs d'effort. Ils sont aussi dans le même sens, c'est-à-dire que les indications des capteurs à la descente sont au-dessus de celles obtenues à la montée. Contrairement aux capteurs d'effort, la sensibilité à 320 °C est pratiquement la même que la sensibilité à la température ambiante.

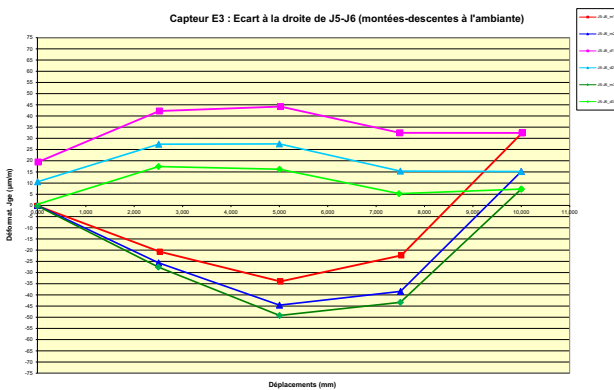


Figure 17.

Courbes d'écarts entre les indications des capteurs étalonnés à la température ambiante et la droite des moindres carrés de leur réponse.

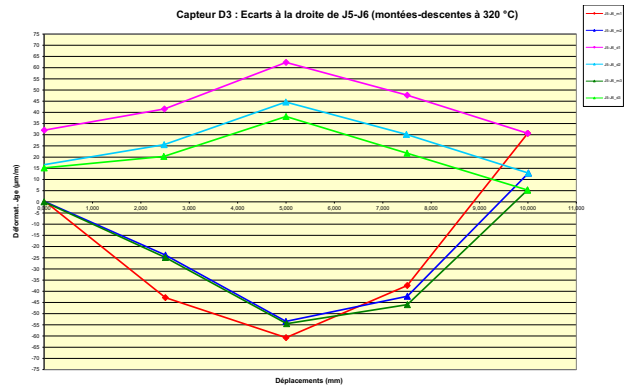


Figure 18.

Courbes d'écarts entre les indications des capteurs étalonnés à 320 °C et la droite des moindres carrés de leur réponse.

Pour les capteurs de déplacement, en relatif, les erreurs de non linéarité et d'hystérésis cumulées sont d'environ 1,3% à la température ambiante et de 1,7% à 320 °C.

5.2 Certificats d'étalonnage

Les opérations d'étalonnage ont donné lieu à l'établissement d'un certificat d'étalonnage par température d'étalonnage et par capteur. En général, il y a donc 3 certificats d'étalonnage par capteur.

Un fac similé du début et de la fin d'un certificat d'étalonnage de capteur de déplacement étalonné à la température ambiante est donné aux figures 19 et 20.

PRESCAMEX Certificat d'étalonnage du capteur de déplacement D3 pour l'utilisation à l'ambiante

Identification du capteur: **CD3**

Méthode d'étalonnage :

L'étalonnage du capteur de déplacement D3 est fait en lui appliquant des déplacements parfaitement connus et en comparant ses indications avec ces déplacements parfaitement connus. Les déplacements parfaitement connus appliqués au capteur sont mesurés avec un capteur à réseau optique ayant une résolution et une exactitude égales au micron (capteur Heidenhain quelquefois appelé aussi comparateur Heidenhain).

L'effort à appliquer sur le capteur pour déplacer son extrémité du déplacement à mesurer est aussi mesuré afin de déterminer le coefficient de raideur du capteur. Cette information ne fait pas partie intégrante de l'étalonnage. Les résultats ne figurent pas dans le certificat d'étalonnage. Cette mesure d'effort est faite avec un capteur d'effort de référence (capteur de marque Vishay Measurement group).

Identification des étalons et de leur raccordement :

Capteur de déplacement :	Capteur d'effort :
Marque : HEIDENHAIN	Marque: VISHAY
Type : ST 3076	Type : 363
ID : 375134-01	Model: 363-D3-2,5T-20P1-R
SN : 36934843 P	SN : 70143682
date inspection : 17/01/2012	date inspection 18/02/2012

Afficheur : CATMAN Afficheur : CATMAN

Mesures relevées au cours de l'étalonnage :

Jauge DJ5					
Déplacements (mm)	1ère courbe : Déformations (µm/m)	Déplacements (mm)	2ème courbe : Déformations (µm/m)	Déplacements (mm)	3ème courbe : Déformations (µm/m)
0,000	0	0,000	0	0,000	0
2,527	436	2,505	432	2,499	429
5,021	871	5,003	867	5,005	862
7,521	1322	7,505	1318	7,501	1310

Figure 19.

Fac similé du début du certificat d'étalonnage d'un capteur de déplacement étalonné à l'ambiante.

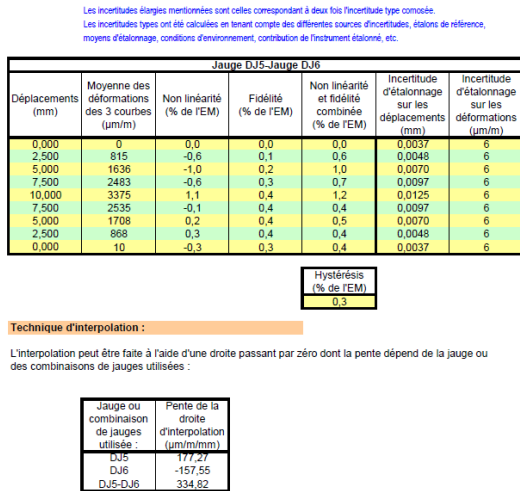


Figure 20.

Fac similé de la fin du certificat d'étalonnage d'un capteur de déplacement étalonné à l'ambiante.

Dans les certificats d'étalonnage, entre le début et la fin, il y a tous les tableaux de mesures relevées au cours de l'étalonnage ainsi que leurs résultats de traitement.

A la fin, il y a les incertitudes sur les indications du capteur étalonné, y compris les incertitudes propres aux moyens d'étalonnage (banc d'étalonnage).

Comme ceci apparait sur la figure 20, les principales composantes d'incertitude des capteurs sont, en premier lieu, l'hystérésis, puis la non linéarité, puis le non-retour à zéro, etc. et, au final, l'incertitude d'étalonnage.

Par exemple, à la température ambiante, l'incertitude sur les indications des capteurs de déplacement est de l'ordre de 1,3%. L'incertitude sur les indications des capteurs d'effort est de l'ordre de 0,5 à 0,6%.

Les erreurs maximales spécifiées sont de 0,3% pour les capteurs de déplacement et de 0,7% pour les capteurs d'efforts.

A la température ambiante, les mesures d'effort sont compatibles avec les spécifications (même légèrement meilleures). Par contre, les mesures de déplacement ne sont pas tout à fait au niveau des exigences du cahier des charges.

Au moment de la réception des capteurs, il a été admis que les exigences d'exactitude en matière de mesure de déplacements avaient été surévaluées.

Compte-tenu de leur bonne fidélité, les capteurs de déplacement ont été acceptés.

La suite a montré qu'il s'agissait d'une bonne décision. Ces capteurs ont donnés de très bons résultats de mesure au cours des essais.

6 Exemple d'informations retirées des mesures fournies par les capteurs de déplacement

Les capteurs dont la construction et l'étalonnage viennent d'être décrits ont été utilisés au cours d'une expérimentation qui avait pour but de valider un logiciel de simulation numérique de comportement de structures complexes au moment de chocs.

Pour cela, il y avait entre autre l'utilisation des capteurs de déplacements pour mesurer, en dynamique, les positions relatives de pièces de la structure au moment des chocs.

Par ailleurs, ce type d'évolution au cours du temps de position relative a été calculé par le logiciel de simulation numérique.

La figure 21 donne la forme de la courbe d'évolution au cours du temps de la position relative calculée et la figure 22, ces mêmes positions relatives mesurées à l'aide de 3 capteurs de déplacements tels que ceux qui ont été décrits ci-avant.

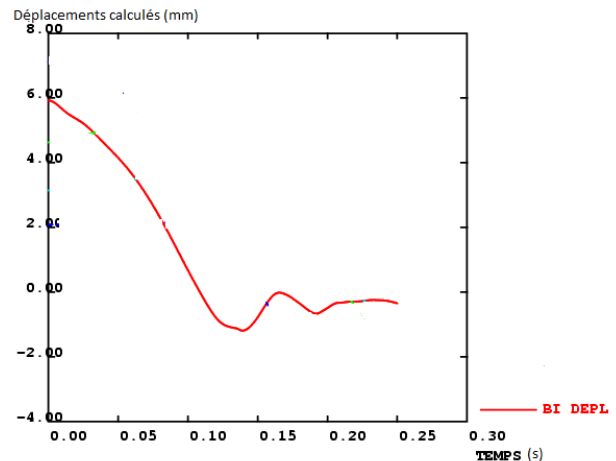


Figure 21.

Evolution au cours du temps de la position relative calculée des pièces impliquées dans l'expérimentation.

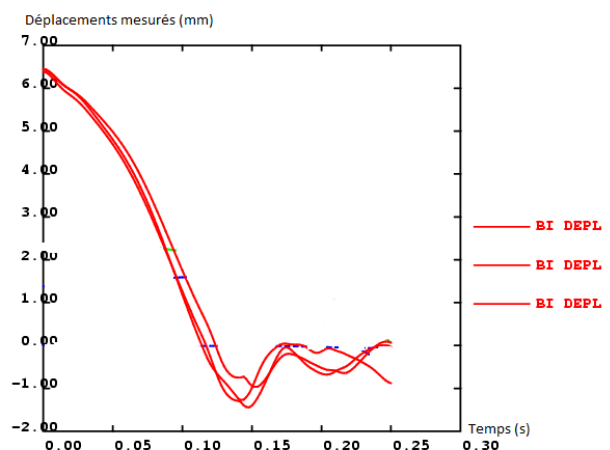


Figure 22.

Evolution au cours du temps de positions relatives mesurées à l'aide de 3 capteurs de déplacement pendant l'expérimentation.

Les informations de positions relatives fournies par les capteurs de déplacement sont parfaitement cohérentes entre elles (ceci sous-entend que la fidélité des capteurs est bonne). Les défauts de non linéarité et d'hystérésis des capteurs ne paraissent pas gênants.

Comme ceci apparaît nettement en examinant les 2 graphiques (figures 21 et 22), la forme de la courbe calculée et celle des courbes déduites des indications des capteurs sont très proches.

Ainsi, ces informations de positions relatives ont contribué à la validation sans équivoque du logiciel de simulation numérique.

7 Conclusion

L'étalonnage de capteurs destinés à faire des mesures à hautes températures est toujours une opération difficile.

En effet, il n'est jamais aisé et c'est même quelquefois impossible de disposer de capteurs étalons pouvant fonctionner à la température à laquelle vont être utilisés les capteurs (350 °C dans le cas des travaux qui viennent d'être présentés).

Une technique permettant de contourner cette difficulté a été présentée.

Elle consiste à utiliser des capteurs conventionnels utilisés à température ambiante dont la traçabilité métrologique au SI est démontrée (capteur étalonné par un laboratoire accrédité) et qui sont couplés mécaniquement aux capteurs à étalonner qui, eux, sont dans une enceinte isotherme à haute température.

Cette technique est réalisable, en pratique, car il est possible de ménager un ou même plusieurs orifices de passage dans les parois d'une enceinte isotherme.

Mais au-delà du caractère réalisable de l'opération il est nécessaire de prouver que le dispositif de couplage ne provoque pas d'erreur incontrôlable au cours de l'étalonnage et de quantifier sa contribution à l'incertitude d'étalonnage.

L'application de cette idée, qui vient d'être présentée pour étalonner des capteurs d'effort et de déplacement, s'appuie sur :

- l'utilisation d'un montage dit « différentiel »,
- l'analyse détaillée de tous les effets thermiques et mécaniques susceptibles de se produire dans le dispositif de couplage, au cours des étalonnages,
- l'élimination de tout dispositif à effets irréversibles du type articulations, guidages, etc. et leur remplacement par des accessoires au comportement élastique et linéaire,
- l'estimation par calcul de l'amplitude de tous les phénomènes susceptibles de perturber les indications des capteurs étalons qui est possible si le comportement de tous les éléments du système d'étalonnage est élastique et linéaire,

- la validation de l'ensemble du dispositif d'étalonnage (banc d'étalonnage) par un ou des essais sur un ou des mannequins indéformables permettant de matérialiser une ou de plusieurs valeurs parfaitement connues du ou des mesurandes.

Sur ces bases, les amplitudes de toutes les erreurs imputables au banc d'étalonnage sont calculables et suivant leur niveau, soit elles entrent dans l'incertitude d'étalonnage si elles sont suffisamment faibles soit elles deviennent une erreur systématique et font l'objet d'une correction si leurs amplitudes ne sont pas acceptables.

Dans le cas présent, une validation à l'aide d'un mannequin a été réalisée. Elle a montré que l'erreur d'imperfection du montage différentiel était de 0,0015% des grandeurs mesurées. Ce qui, dans ce type d'étalonnage est parfaitement négligeable.

Les articulations pour l'application des valeurs du mesurande sur le capteur à étalonner ont été remplacées par des articulations fictives élastiques dont les erreurs dues aux réactions mécaniques proportionnelles aux grandeurs à mesurer ont simplement été intégrées dans l'incertitude d'étalonnage du fait qu'elles étaient très faibles.

La conception et le dimensionnement du banc d'étalonnage ont été fait de telle manière que toutes les déformations dues à l'application des valeurs des mesurandes sur les capteurs soient élastiques et de très faibles niveaux. Les erreurs qui en ont résulté ont toutes été très faibles et ont simplement été intégrées dans la détermination de l'incertitude d'étalonnage.

Moyennant cette démarche, l'incertitude d'étalonnage du banc, aussi bien pour les étalonnages de capteurs d'effort que de déplacement est de l'ordre de 0,1 % (de l'ordre du pour mille).

Les incertitudes des capteurs d'effort qui ont été étalonnés à l'aide de ce banc sont d'environ 0,5 à 0,6% à l'ambiante et d'environ 1% à 320 °C.

Celles des capteurs de déplacement sont d'environ 1,3% à l'ambiante et 1,7% à 320 °C.

L'incertitude d'étalonnage est pratiquement négligeable devant ces valeurs.

Les capteurs étalonnés sur ce banc ont permis de faire des mesures au cours d'une expérimentation en dynamique en vraie grandeur d'un système mécanique.

Cette expérimentation avait pour but de valider un logiciel de simulation numérique de comportement mécanique de systèmes complexes au moment de chocs.

Il n'y a eu aucun doute sur la validité des informations fournies par les capteurs. La validation du logiciel a été prononcée sans équivoque.

Références :

1. GUM <http://www.bipm.org>
2. VIM <http://www.bipm.org>