Un dispositif original pour la métrologie acoustique basse fréquence appliquée aux capteurs d'infrasons

Franck Larsonnier, Philippe Millier
CEA
DAM/DIF
F-91297 Arpajon
E-mail : philippe.MILLIER@CEA.FR

Résumé
Les signaux acoustiques infrasonores se propageant dans l'atmosphère à une vitesse moyenne de 330 m/s sont d'un grand intérêt dans de nombreux domaines scientifiques pour l'aide à la modélisation des phénomènes de transport atmosphérique par exemple mais aussi à des fins de surveillance. De très nombreux signaux ont été notamment enregistrés et caractérisés depuis la mise en place d'un réseau de surveillance mondial initié par l'organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE) à la fin des années 90. C'est dans ce cadre et pour pouvoir répondre aux spécifications techniques élaborées par ce traité que le CEA a développé dans les années 2000 un microbaromètre : le MB2005. Cet article, après une rapide description du principe de fonctionnement du capteur, se propose de détailler une méthode originale mise au point au CEA pour assurer la métrologie de ces dispositifs avec une incertitude RMS de ±5% en amplitude et de ±5 degrés en phase, tout ceci dans un cadre normatif basé sur le référentiel ISO 10012.

Abstract
Infrasound signals propagating at a mean speed of 330 m/s in the atmosphere are of great interest in many scientific fields, for example in helping modelling atmospheric transportation phenomena or for monitoring operations. Many sources of infrasound have been recorded since the installation of the worldwide network built for the comprehensive test ban treaty (CTBT) at the end of the 90's. In order to address to the technical specifications of this treaty, the CEA has developed at this time a microbarometer: the MB2005. This article will first explain the main principle of the sensor. Then in a second part, we will detail the methodology the CEA developed to make the calibration of the system with an RMS uncertainty of ±5% in amplitude and ±5 degrees in phase. These operations and processes are led under the standard ISO10012 reference.

La mesure infrasonore est aujourd'hui d'un grand intérêt dans de nombreux domaines. Les 60 stations du réseau du TICE dont 8 sont de responsabilité française, constitueront à terme un maillage exceptionnel. Ce réseau mondial a été défini dans les années 90 pour détecter des explosions nucléaires dans le cadre du Traité de non prolifération (TNP). Quatre technologies sont déployées (sismique, infrason, particule et gaz) pour un total de 321 stations. D'ores et déjà, les stations existantes ont permis de mesurer un très grand nombre d'évènements naturels ou non naturels qui peuvent se propager sur des dizaines de milliers de kilomètres. Citons dans cette liste les rentrées de météorites, les volcans en éruption, les phénomènes d'avalanche, les ondes de gravité mais aussi les explosions de toute nature ou les tirs de carrière. La détection de ces signaux est réalisée grâce à une antenne acoustique constituée de 4 capteurs répartis suivant un triangle équilatéral avec un capteur au centre. L'ouverture du réseau est alors de quelques kilomètres.

Dans ce dispositif, l'élément central est le capteur. Il se doit d'être robuste car toujours au contact de l'air mais aussi extrêmement performant. Des résolutions de quelques mPa sont requises sur toute la bande d'intérêt qui va généralement de 0,01 à une vingtaine de Hertz ainsi qu'une dynamique d'analyse supérieure à 100 dB.

Le CEA a développé le capteur MB2005 qui répond à l'ensemble de ces spécifications. Ce capteur est reconnu par la communauté scientifique pour sa robustesse, sa fiabilité et la stabilité de sa réponse instrumentale. Il s'est donc agit parallèlement de mettre au point un dispositif capable d'étalonner les nombreux capteurs nécessaires pour la constitution des stations du TICE de responsabilité française. Notons qu'à ce jour, aucun laboratoire de métrologie ne propose de prestation dans ce domaine, que ce soit au niveau national ou même à l'échelle mondiale. Cet article propose de décrire en détail le travail réalisé par le CEA en métrologie acoustique basse fréquence durant ces dix dernières années.

Le capteur MB2005 au cœur d'un site de mesure

Le microbaromètre est un capteur dédié à la mesure de signaux acoustiques de faible amplitude et dont la propagation a lieu dans l'atmosphère [1]. La bande infrasonore est quant à elle généralement limitée à 20 Hz pour ce qui est de la fréquence maximale utile mais peut s'étendre en deça du mHz en basse fréquence. La partie inférieure du capteur constitue la chambre de mesure (0,6 litres) renfermant une capsule barométrique en Durinval[1] (Fig. 1) dans laquelle on a fait le vide pour limiter les effets de température et qui se déforme sous l'effet des variations de la pression atmosphérique. Ce type de capsule permet de mesurer des variations de pression autour de la pression ambiante entre 0 et 4 000 m d'altitude. La micro déformation de la capsule (quelques dizaines de nm/Pa) est ensuite mesurée par un capteur de déplacement de type LVDT (Linear Variation Différentiel Transformer) de grande résolution.

Fig. 1 : Capteur MB2005. Cartes électroniques sur la partie supérieure et chambre de mesure avec les 4 entrées d'air sur la partie inférieure. Au premier plan, le soufflet en durinval surmonté du transducteur LVDT
MB2005 sensor overview. Electronic board at the upper part and pressure chamber with 4 inlets at the lower part. Durinval aneroid capsule with LVDT transducer in front of the picture

La partie supérieure étanche du capteur reçoit la partie électronique constituée d'une carte alimentation et d'une carte mesure. Le MB2005 peut mesurer des variations de pression < 2 mPa (le bruit instrumental étant inférieur à 2 mPa sur la bande [0,02 - 4] Hz). Le niveau maximal de pression observable sur la sortie directe avant saturation est de l'ordre de ± 100 hPa pour une sensibilité de 1mV/Pa, ce qui confère au capteur une dynamique de 134 dB. La sensibilité type du capteur sur la sortie filtrée est généralement de 20 mV/Pa ceci afin d'adapter le capteur aux numériseurs 24 bits (le niveau de pression maximal est alors de ± 5 hPa et la dynamique de 108 dB). Cette amplification de la sensibilité nécessite la suppression de la composante continue correspondant à la pression atmosphérique. Ce traitement est réalisé par filtrage électronique passe haut dont la fréquence peut être ajustée de 800 s à 50 s (Fig. 2).

1- Durinval : Alliage Fe-Ni-Cr-Ti-Al mis au point par Pierre Chevenard

Cette solution confère au MB2005 une réponse en fréquence et en phase très stable au cours du temps (contrairement à un capteur basé sur un principe acoustique différentiel comme les microphones).

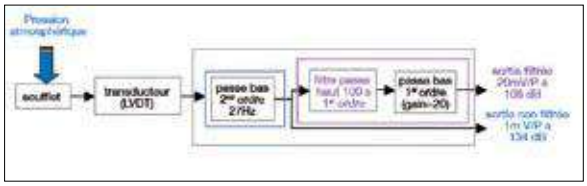

Fig. 2 : Schéma bloc du capteur MB2005 avec sa sortie non filtrée et sa sortie filtrée différentielle (configuration TICE)
Bloc diagram of the electronic with the non filtered and filtered differential output (CTBT configuration)

Le capteur est ensuite installé au cœur d'un site de mesure constitué de plusieurs prises d'air réparties sur une surface de quelques dizaines de mètres de diamètre. Cette configuration classiquement utilisée sur les stations du TICE revêt une topologie dite en forme de rosette (Fig. 3 et 4). Des concentrateurs permettent alors de ramener le signal acoustique à travers un jeu de tuyaux au niveau du capteur protégé au sein d'une cave.

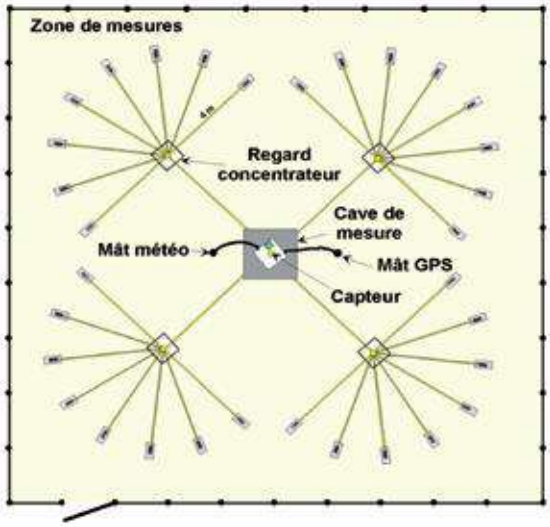

Fig. 3 : Topologie type d'un site de mesure infrason, avec le capteur au centre du système au sein d'une cave et les multiples prises d'air réparties sous forme d'une rosette
Typical topology of an infrasound site with the sensor in a vault located in the center of a rosette type multi-inlets wind noise reduction system

Ce mode d'acquisition du signal acoustique permet de réduire les effets perturbateurs liés au vent. En effet, le signal acoustique d'intérêt possède une longueur d'onde très grande au regard de la taille de la rosette. Le signal ramené au niveau du capteur est donc identique pour chaque prise d'air. *A contrario*, les turbulences liées au vent sont locales et incohérentes entre chaque prise d'air. La mesure finale résulte d'une amélioration significative du rapport signal sur bruit en présence de vent.

Fig. 4 : Photo d'un site de mesure d'une station infrason du TICE sous responsabilité française à Madagascar
Picture of site of an actual infrasound station of the CTBT under French responsibility at Madagascar

La figure 5 montre l'enregistrement du passage d'un avion de chasse au-dessus de la station de Flers en Normandie. On remarquera la forme d'onde en N sur le signal mesuré caractéristique du passage en mode supersonique de l'aéronef, avec ici une amplitude de l'ordre de 40 Pa càc.

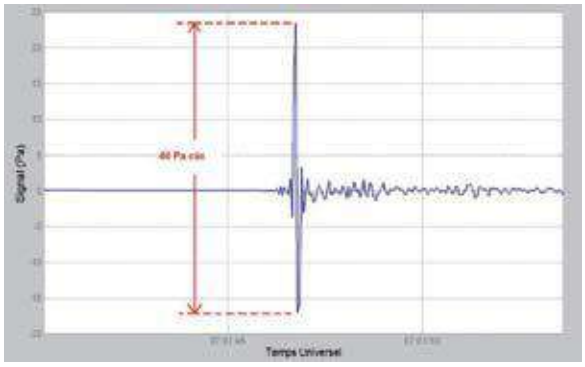

Fig. 5 : Exemple d'un signal provenant d'un avion de chasse enregistré par un MB au dessus de la station de Flers (Normandie). Visualisation de l'onde en N caractéristique du passage en mode supersonique
Aircarft signal example recorded by a French IS station in Flers (Normandie). Visualisation of the 'N' wave representative of the supersonic mode

La métrologie dédiée au capteur MB2005

La confirmation métrologique d'un capteur MB2005 se décompose en deux grandes étapes. Premièrement, une étape de vérification dite statique et deuxièmement, une étape de vérification dite dynamique. L'ensemble des opérations de vérification se déroule dans un laboratoire, dédié à la thématique infrason, climatisé à 23 °C ± 2°C.

Métrologie statique

Le mesurande qui caractérise la grandeur suivie sur le microbaromètre à cette étape est sa sensibilité dite statique (sur une bande de fréquence DC – 40 Hz) exprimée en mV/Pa. Cette grandeur est associée au signal de sortie non filtré. La valeur nominale de sensibilité statique est de 1 mV/Pa au regard d'un écart maximal toléré (EMT) de 0,025 mV/Pa.

Méthodologie

Une variation de pression d'une amplitude de 200 mbar répartie entre -100 mbar et + 100 mbar autour de la pression atmosphérique est appliquée par palier au moyen de deux pompes (pression et dépression) à l'entrée de la chambre de mesure du capteur. Le processus utilise un manomètre étalon pour la mesure de la pression appliquée au capteur et un voltmètre étalon pour la mesure de la tension au niveau de la sortie non filtrée. Le modèle mathématique d'ordre 1 est du type :

$$P = x_0 + s.L$$

où L correspond à la tension mesurée (V) sur la sortie non filtrée du MB
P correspond à la pression appliquée à l'entrée du microbaromètre (Pa).
s correspond à la sensibilité du capteur (Pa/V)
x_0 correspond à l'offset résiduel (Pa)

Les corrections appliquées sont :
- La correction de justesse du voltmètre
- La correction de justesse du baromètre

La courbe d'étalonnage pression – tension de sortie est optimisée par une droite des moindres carrés dont la pente correspond à la sensibilité statique du capteur.

L'incertitude de mesure élargie (k=2) pour cette grandeur est estimée à 0,003 mV/Pa.

Métrologie dynamique

Les mesurandes qui caractérisent les grandeurs suivies sur le microbaromètre à cette étape sont d'une part sa sensibilité dynamique à 1 Hz exprimée en mV/Pa. Cette grandeur est associée au signal de la sortie filtrée. La valeur nominale de sensibilité dynamique à 1 Hz est de 20 mV Pa au regard d'un EMT de 1 mV/Pa. De plus, la fonction de transfert du capteur dans la bande [0,01 Hz – 27 Hz] est associée à des tolérances de 5% en amplitude et de 5° en phase.

Contrairement à l'étalonnage statique qui s'appuie sur la mise en œuvre d'équipements de mesure et une méthodologie reconnue et documentée dans le domaine de la métrologie des pressions statiques, l'étalonnage dynamique de capteur infrason est un domaine où les bonnes pratiques, les moyens de mesure, les étalons ne sont pas ou que partiellement disponibles au niveau des organismes nationaux spécialisés en métrologie des pressions ou en métrologie acoustique.

Présentation du banc de mesure dynamique

Du fait de l'absence de moyen de mesure dynamique associé à un générateur de signal de pression de référence basse fréquence (0,01 Hz – 100 Hz), de méthodologie imposée et de la spécificité des capteurs microbarométrique, le CEA a développé un dispositif capable de répondre à son besoin.

Au sein du laboratoire de métrologie infrason, la vérification dynamique d'un MB2005 repose sur l'utilisation de trois dispositifs.

Le premier est l'IS Calibrator (IS pour infrason), qui génère le signal de pression dynamique, le second est le Calibrac qui constitue la partie contrôle/commande de l'IS Calibrator et enfin, un microphone étalon qui mesure le champ de pression généré dans la cavité acoustique de mesure de l'IS Calibrator.

Ces trois équipements constituent un dispositif qui est fonctionnellement un calibreur de pression dynamique paramétrable permettant de générer un signal de pression acoustique de 1 à 50 Pa, en basse fréquence, maîtrisé, stable et répétable dans le temps. Le banc de métrologie infrason et ce dispositif en particulier font l'objet d'un processus de surveillance qui sera présenté par la suite.

La description du banc de métrologie infrason ne serait complète sans la description du poste informatique de contrôle et l'interface qui y sont associés. L'opérateur dispose d'un logiciel développé par le CEA pour opérer toutes les opérations de mise à jour des paramètres du Calibrac et de programmation des séquences d'excitation (consigne de pression, fréquence, durée, forme du signal). De plus, le PC est également interfacé avec la chaîne d'acquisition CEA qui acquiert et numérise le signal de mesure du capteur sur 24 bits.

L'IS Calibrator

L'IS Calibrator se présente sous la forme d'une enceinte cylindrique de 50 cm de diamètre constituée de l'assemblage de deux cavités étanches et d'un piston (Fig. 6 et 7). Elle matérialise un volume clos déformable. La pression statique qui règne à l'intérieur avant l'opération de vérification est celle de la pression atmosphérique.
Le principe de fonctionnement consiste à faire varier le volume d'une des deux cavités au moyen d'un piston indéformable en mouvement, pour obtenir une variation de pression proportionnelle à la variation de volume à l'ordre 1, pour des faibles variations de pression.
Le piston indéformable est matérialisé par un haut-parleur du commerce dont la surface de la membrane mobile est aplanie et rigidifiée par une structure en nid d'abeille afin de permettre des variations de pression linéaires du continu jusqu'à 100 Hz.

La membrane est mise en mouvement en appliquant une tension de commande variable à l'étage électrodynamique du haut-parleur.
Le haut-parleur côté étage électrodynamique est intégré dans la cavité dite arrière, la cavité dite avant recevant le capteur à étalonner, la membrane assurant alors la séparation entre les deux volumes. Cette cavité arrière permet de maximiser la raideur de l'ensemble. Les volumes des deux cavités sont de 5 litres pour la cavité arrière et de 30 litres pour la cavité avant.

L'enceinte est dimensionnée de telle sorte que le champ de pression soit uniforme dans toute la cavité lors du mouvement du piston et que la fréquence de résonance de l'ensemble piston – capteur soit supérieure à la fréquence maximale à générer (environ 50 Hz). Le volume de la cavité avant est nettement plus important que celui de la cavité du capteur à vérifier de sorte que la charge acoustique de ce dernier ait un effet négligeable sur le calibreur. La réponse acoustique du calibreur est de type passe bas avec une fréquence de coupure qui se situe vers 80 Hz. Elle est plate en amplitude et en phase dans la bande [DC - 30 Hz].

Sur la partie basse de la cavité avant, deux interfaces étanches sont présentes. La première permet une connexion simple, directe et de longueur minimale avec le capteur à étalonner. Dans cette configuration, la chambre de mesure de pression du capteur reçoit la pression de référence générée par le calibreur. La seconde, en vis-à-vis de la première, permet d'introduire le microphone étalon destiné à la mesure de la pression dans la cavité.

Le Calibrac et la chaîne microphone étalon

Le coffret électronique Calibrac est utilisé pour contrôler la tension appliquée au haut-parleur, pour mesurer et ajuster la pression dans la cavité avant avec le microphone étalon de type 4193-L-004 de Bruel & Kjaer (sensibilité : 2 mV/Pa et limite fréquence basse 0,1 Hz) et pour réaliser la synthèse des signaux d'excitation selon les paramètres définis par l'opérateur (pression appliquée, fréquence, durée séquence...), tout en prenant en compte la pression atmosphérique au moment de la mesure.

Fig. 6 : Capteur MB interfacé avec l'IS Calibrator
MB sensor connected to the IS Calibrator

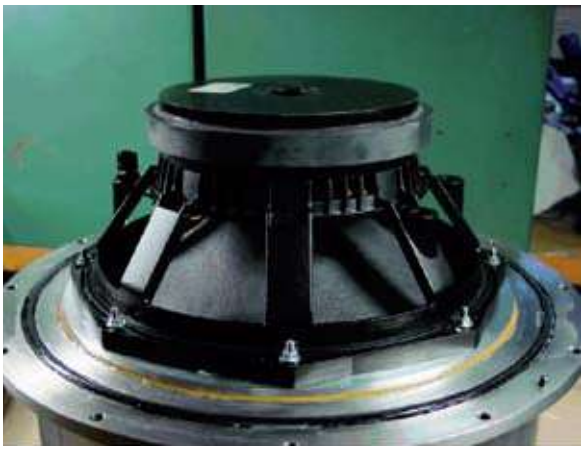

Fig. 7 : Haut-parleur connecté sur la cavité avant
Loud speaker connected to the rear cavity

En effet, pour une même tension appliquée au haut-parleur, la pression appliquée au capteur sous test varie avec la pression atmosphérique. Par conséquent, pour disposer d'un équipement dont les performances soient invariantes vis-à-vis des fluctuations de ce paramètre, il est nécessaire de les prendre en compte et de les compenser au niveau de la mesure de pression réalisée avec la chaîne microphone, avant l'étalonnage dynamique du MB.
Le paramètre température est un facteur contrôlé du fait de l'environnement climatisé du laboratoire, du filtrage thermique que l'enceinte crée naturellement sur le microphone et des précautions prises vis-à-vis des éventuelles perturbations thermiques. Cependant, la température est mesurée et surveillée en permanence au niveau de l'enceinte et du microphone.
La prise en compte de la variation de pression statique est intégrée et automatisée dans le Calibrac. Dans les conditions ambiantes de pression et de température, les paramètres du microcontrôleur relatif à la chaîne de mesure du microphone 4193-L-004 sont ajustés via un étalonnage à 10 Pa avec un calibreur de pression 4231 étalon de Bruel et Kjaer (sensibilité à la pression statique 8.10-4 dB/hPa). Celui-ci génère un signal sinusoïdal à 1 kHz et une pression de référence de 10 Pa (Fig. 8).

Une fois la chaîne microphone étalonnée à 10 Pa, dans les conditions ambiantes, une opération d'ajustage de la tension de référence appliquée au haut-parleur est nécessaire avant l'opération d'étalonnage dynamique d'un MB. Cette opération est automatique et se déroule de la façon suivante. Le Calibrac calcule la tension de référence de manière itérative à partir de la tension résultante de l'étalonnage de la chaîne microphone à 10 Pa et d'une valeur initiale de 10 Pa/V du facteur de conversion du calibreur. À partir de ces valeurs, il génère un signal sinusoïdal à 20 Hz avec une amplitude correspondant à la tension de référence initiale. La réponse du 4193 est identique à 1 kHz et à 20 Hz, ce qui justifie, entre autres, le choix de ce microphone. Le facteur de conversion réel du calibreur est à nouveau calculé. Un processus d'itération et d'optimisation qui agit sur la tension appliquée au haut-parleur, permet de faire converger la pression mesurée et la pression de consigne. Lorsque le critère de convergence est atteint, la tension appliquée au haut-parleur est prise comme tension de référence pour la suite de la vérification dynamique du microbaromètre.

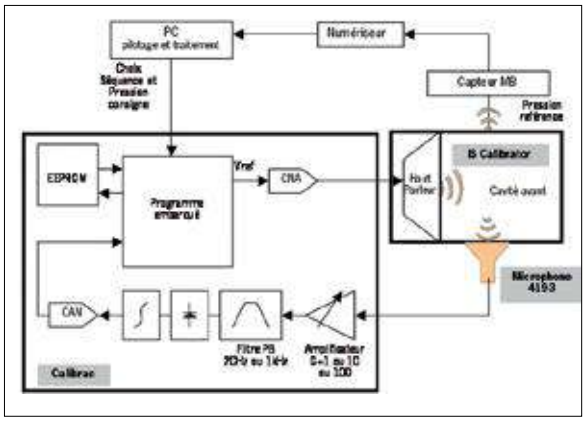

Fig. 8: Schéma de principe du banc de métrologie infrason
Schematic of the IS Calibrator

Étalonnage dynamique d'un MB2005

Les mesurandes qui caractérisent le capteur MB à cette étape sont d'une part sa fonction de transfert dans la bande [0,01 Hz – 27 Hz] associée à des tolérances de 5% en amplitude et de 5° en phase et d'autre part sa sensibilité dynamique à 1 Hz. Cette dernière est calculée simplement en moyennant les valeurs de la réponse du capteur autour de 1 Hz.

La mesure de la fonction de transfert du capteur mise en œuvre sur le banc infrason utilise un signal d'excitation particulier sous forme d'une séquence pseudo aléatoire de type MLS (Maximum Lenght Sequence). Il s'agit d'une séquence périodique construite sur la base d'une modélisation par un polynôme dont l'ordre (ou la longueur) est paramétrable (de 12 à 15 généralement), matérialisant deux états binaires qui se traduit au niveau du signal électrique d'excitation par une tension «haute» égale à la tension de référence précisée précédemment et une tension «basse» égale à l'opposée de la tension de référence (± tension ref).

La valeur RMS du signal est égale à la valeur maximale et le rapport signal à bruit est maximisé ce qui est intéressant en environnement bruité.

Par construction, cette séquence est toujours générée de la même façon, ainsi l'identité du signal d'excitation au cours du temps est connue. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'enregistrer le signal d'excitation pour calculer la fonction de transfert. Le calcul de la réponse fréquentielle en amplitude et en phase du capteur à ce type d'excitation s'obtient en deux étapes. Tout d'abord en appliquant une fonction de cross-correlation entre le signal théorique d'entrée et la réponse du capteur pour obtenir la réponse impulsionnelle du capteur, puis ensuite en appliquant une FFT de cette réponse.

La réponse en fréquence du capteur microbaromètre MB2005 est visible figure 9.

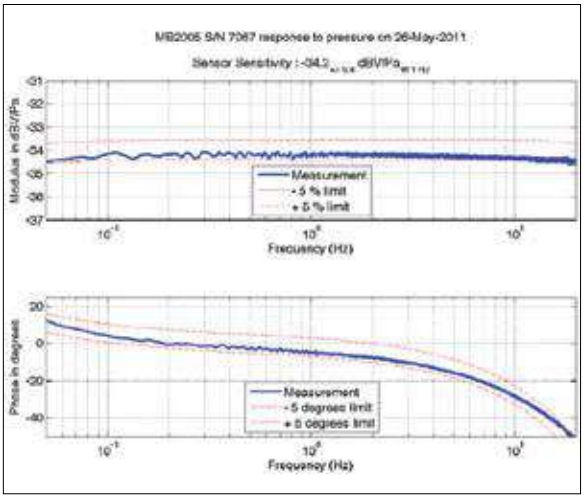

Fig. 9 : Réponse en fréquence et en phase d'un capteur MB2005 mesurée avec l'IS Calibrator
MB2005 amplitude and phase response measured with the IS Calibrator

En tenant compte des différents facteurs qui interviennent dans ce processus à savoir l'étalonnage du Calibreur 4231, l'étalonnage de la chaîne microphone à 10 Pa, la mesure de la pression de référence, la tension de référence appliquée au haut-parleur, et la répétabilité de mesure, l'incertitude élargie de la mesure de la sensibilité du capteur MB est estimée à 4 %.

Suivi du banc et évaluation de sa robustesse

Contexte

La capabilité métrologique du banc de métrologie Infrason tel que présenté précédemment est établie au travers d'un processus de surveillance basé sur l'utilisation de plusieurs microbaromètres dits de référence, assortie d'un critère de conformité par l'établissement d'un EMT (Ecart Maximum Toléré) sur la valeur de la sensibilité moyenne à 1 Hz. L'EMT est fixé à ± 1 mV. Ce mesurande fait l'objet d'une analyse statistique de la variabilité par carte de contrôle des mesures individuelles et des écarts normalisés pour suivre la stabilité du banc et ainsi garantir au quotidien sa performance. Cette seconde carte présente l'intérêt de standardiser les données pour mieux faire apparaître très vite des valeurs «atypiques».

Cette démarche est inscrite par ailleurs dans l'exigence «8.2.3 Surveillance du système de management de la mesure» du référentiel ISO 10012 – 2003 «Système de management de la mesure – Exigences pour les processus et les équipements de mesure».
Le principe du processus de surveillance mis en œuvre est celui de la mesure quotidienne de mêmes objets stables de référence, et redondant dans les conditions habituelles de déroulement du processus à surveiller.

Ce principe peut se détailler ainsi :
- Mesure du même objet : Nous utilisons un objet clairement identifié dont une grandeur caractéristique mesurable est reconnue comme étant stable dans le temps. Cette grandeur est mesurée quotidiennement par le processus qui fait l'objet de la surveillance. Si une dérive de la mesure de la grandeur caractéristique de l'objet est détectée, l'hypothèse de stabilité de l'objet implique que la cause de cette dérive soit imputée au banc de mesure. Cependant l'hypothèse de stabilité de l'objet peut ne pas toujours être garantie, et un seul objet ne permet pas de lever toujours facilement l'ambiguïté sur la source du problème détecté.
- Redondance de mesure ou contrôle croisé : L'hypothèse de stabilité d'un processus de mesure peut être améliorée en exploitant non pas une mais plusieurs mesures au travers de plusieurs objets différents supposés stables. Si une dérive est détectée avec un objet, et si une dérive cohérente avec la première est également détectée par les autres objets, alors la probabilité que des objets différents détectent une dérive en même temps est quasi nulle sauf à ce que celle-ci soit due au processus.

Mise en œuvre

Dans le cas présent, les objets de référence dont il est question sont des capteurs infrason microbaromètrique de type MB2005 et MB2000.

Ils sont au nombre de quatre ce qui est un compromis entre le juste nombre de mesures utiles et le temps nécessaire pour la mise en œuvre de ce processus pendant lequel les conditions environnementales restent stables pour être considérées comme non influentes. L'environnement thermique du laboratoire et les précautions de minimisation des sources de chaleur permet de limiter la variation de température locale à moins de 0,5°C sur la durée complète du processus qui est de 25 mn.

Chaque microbaromètre a été prélevé de façon aléatoire dans des lots correspondant à différentes séries de fabrication espacées dans le temps. Cet échantillonnage permet de limiter un effet lié à un biais éventuel de fabrication localisé dans le temps.

Dès lors, ces capteurs sont dédiés au processus de surveillance du banc de métrologie IS, sont conservés en permanence dans le laboratoire de métrologie sans autre utilisation possible, et sont regroupés à proximité du calibreur IS afin de satisfaire à la contrainte de mesure dans les mêmes conditions de température.

Chaque jour une séquence de 4 mesures de la sensibilité dynamique des capteurs est opérée sans respecter un ordre de passage des capteurs.

Fig. 10 : Carte de contrôle des valeurs individuelles de sensibilité à 1 Hz (courbe de tendance en vert et limites admissibles en rouge)
Control shart of the sensitivity at 1 Hz for each measurement

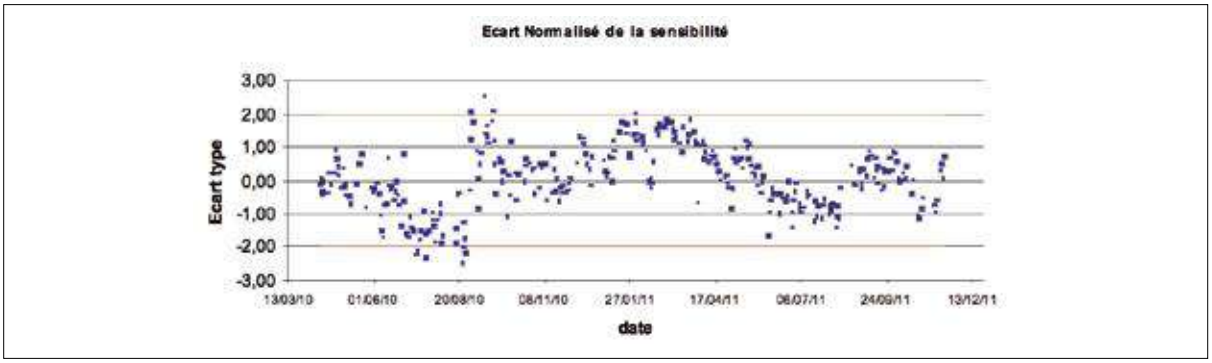

Fig. 11 : Carte de contrôle des écarts normalisés de la sensibilité à 1 Hz
Control shart of the normalized sensitivity at 1 Hz for each measurement

Les différents résultats individuels sont enregistrés. Une moyenne et un écart normalisé qui prend en compte l'historique des valeurs moyennes sont calculés et représentés sous la forme des graphiques ci-dessous.

La première carte de contrôle (Fig. 10) fait apparaître les valeurs moyennes des sensibilités à 1 Hz de manière individuelle, les limites de surveillances admissibles (courbes rouges) et une courbe de tendance de type droite des moindres carrés. La seconde carte de contrôle des écarts normalisés (Fig. 11) fait apparaître les données standardisées avec une échelle graduée en écart type. En positionnant des seuils de détection à ± 2 écarts types, nous pouvons détecter immédiatement une valeur qui a une probabilité d'occurrence d'au plus 5%.

Les cartes de contrôle ci-dessus montrent que le banc de métrologie infrason du CEA est extrêmement stable sur une longue période de 18 mois et très bien calé sur la valeur de référence de 20 mV/Pa.

Conclusion

La mesure infrason revêt un grand intérêt au sein de la communauté géophysique et ce essentiellement depuis la mise en place du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires à la fin des années 90. La métrologie dans le domaine infrason est par contre peu répandue et le CEA possède actuellement un processus maîtrisé respectant la norme ISO 10012 qui bénéficie de presque dix ans de pratique et plusieurs milliers d'opérations. À ce jour, les paramètres d'influence sont connus et les incertitudes atteintes sur la fonction de transfert situent le calibreur infrason au meilleur niveau mondial.

Références bibliographiques

[1] Le Pichon A. et al. Infrasound monitoring for atmospheric studies, Springer, 2009, pp 122-131.