

## Étalonnage en régime dynamique des capteurs de pression

Les mesures de pression dans les cylindres d'un moteur thermique pour étudier les phénomènes de combustion, dans une presse d'injection pour étudier un processus de moulage, dans un tube de Pitot pour déterminer la vitesse d'un avion, dans un cathéter pour déterminer la tension artérielle, sont quelques exemples d'applications qui nécessitent de mesurer la pression, hors de conditions d'équilibre. Dans ces applications, la grandeur « pression » est dite en régime dynamique, i.e. le mesurande évolue au cours du temps, et en particulier pendant la mesure. En régime statique, un capteur est caractérisé par sa sensibilité – pour un mesurande donné – qui est définie comme le quotient de la variation de la grandeur de sortie sur la variation correspondante du mesurande. Le même calcul effectué en régime dynamique révèle des valeurs de sensibilité différentes. La détermination de la sensibilité, utilisée en régime statique, ne suffit donc plus en régime dynamique, ce qui implique un étalonnage spécifique. La conception de cet étalonnage nécessite dans un premier temps de définir les caractéristiques du capteur à étudier. La mise en œuvre de cet étalonnage requiert ensuite des références spécifiques. De plus, la prise en compte des spécificités des montages (ligne de mesure, chambre de dégagement, changement de fluide...) pour effectuer des mesures nécessitent des étalonnages et des études spécifiques.

### **1. Principe de l'étalonnage en régime dynamique d'un capteur au meilleur niveau d'incertitudes**

Dans le domaine de l'étalonnage des capteurs de pression en régime statique, le raccordement à l'unité de pression est bien maîtrisé. En régime dynamique, il n'existe pas d'étalon de « pression dynamique », par exemple un « échelon de pression étalon » ou une sinusoïde de pression étalon » de fréquence et d'amplitude données. Par les méthodes classiques, il n'est pas possible de « raccorder » métrologiquement un « étalon pression dynamique » aux grandeurs fondamentales ou dérivées « statiques ». Dans cette situation, un calcul d'incertitude sur la grandeur d'entrée du capteur est difficilement envisageable. Pour cette raison, le LMD (Laboratoire de métrologie dynamique de Arts et Métiers ParisTech) propose une méthode adaptée à l'étalonnage dynamique d'un capteur de référence.

La méthode proposée repose sur la détermination de la fonction de transfert (gain et phase en fonction de la fréquence) qui permet de décrire le fonctionnement d'un capteur de pression aussi bien en utilisation statique que dynamique. Pour accéder à cette fonction de transfert, deux approches sont possibles :

- l'approche harmonique ;
- l'approche transitoire.

La première approche nécessite des générateurs de pression périodiques qui fournissent un signal sinusoïdal de pression, la seconde nécessite des générateurs de pression apériodiques qui délivrent un échelon ou une impulsion de pression. Le LMD a retenu la seconde approche

qui est moins contraignante concernant la quantité de générateurs à développer : les générateurs périodiques (pitonphones, chambres de compression à membrane, convertisseur électropneumatique, sirène...) ont un domaine d'utilisation en pression et en fréquence limité.

Dans les essais transitoires réalisés par le LMD, le capteur à étalonner est soumis à un échelon de pression, et la réponse délivrée par le capteur est enregistrée. La fonction de transfert  $H(f)$  est ensuite calculée point par point et est définie comme le rapport de la transformée de Fourier de la sortie  $S(f)$  du capteur sur la transformée de Fourier de l'entrée  $E(f)$  :

$$H(f) = \frac{S(f)}{E(f)} = \frac{\int_0^{\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt}{\int_0^{\infty} e(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt} .$$

Un capteur de pression est choisi, parmi les capteurs du commerce, en fonction de ses caractéristiques métrologiques. Les linéarités statique et dynamique sont essentielles. L'influence des grandeurs extérieures doit être aussi faible que possible, en particulier pour l'accélération et, dans une moindre mesure, pour la température. La bande passante annoncée et la fréquence propre sont naturellement compatibles avec le domaine de fréquence envisagé.

Après étalonnage quasi-statique, le capteur est soumis à des échelons de pression de même amplitude  $P_0$ , à l'aide de moyens dont les domaines de fréquence se recoupent sur une zone significative. La sortie  $s(t)$  est enregistrée et exploitée pour en déterminer la fonction de transfert  $H(f)$ . On suppose dans ce cas que l'entrée  $e(t)$  est un échelon parfait. Pour un même moyen, les essais sont réalisés plusieurs fois afin d'évaluer la répétabilité.

Dans le cas de l'étalonnage quasi-statique, l'échelon d'entrée en tension ou en pression est mesuré grâce à des instruments étalonnés et raccordés. Pour l'étalonnage dynamique, l'entrée n'étant pas connue 'métrologiquement', le calcul de la fonction de transfert n'est pas réalisable.

Cependant, il est possible d'estimer une fonction de transfert entre une entrée idéale (échelon parfait) et la sortie mesurée qui est la réponse à un échelon certainement imparfait mais proche du modèle théorique. La fonction de transfert ainsi estimée (figure 1) fait apparaître l'écart entre la fonction de transfert idéale et celle mesurée. Celle-ci est d'autant plus proche de l'unité que les éléments de la chaîne sont eux même performants. Cette fonction de transfert est globale et représentative des imperfections du générateur d'échelon, du capteur de pression et de son électronique associée, du système d'acquisition et de traitement. La fonction de transfert ne permet pas de donner des renseignements sur l'origine des défauts rencontrés dans la réponse du capteur.

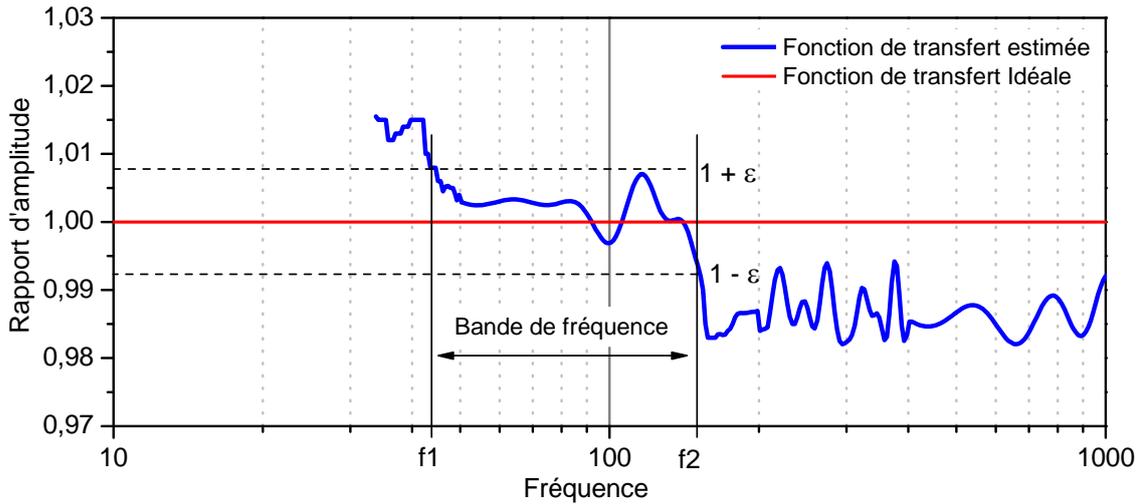


Fig. 1 – Principe de l'étalonnage en régime dynamique avec une fonction de transfert.

Dans une bande de fréquence donnée  $[f_1, f_2]$  par exemple, l'écart maximum est  $\varepsilon$ . On considère que cet écart  $\varepsilon$  est l'erreur maximale dans la bande  $[f_1, f_2]$ . Cette erreur dépend en majeure partie du générateur d'échelon et ne peut pas être corrigée. Ceci est pris en compte sous la forme d'une incertitude type en faisant l'hypothèse d'une distribution rectangulaire.

Dans la pratique, un seul moyen d'étalonnage ne couvre pas une plage en fréquence suffisante pour répondre aux besoins. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs moyens d'étalonnage pour augmenter la bande de fréquence. Ces moyens doivent avoir une plage de fonctionnement commune en amplitude et en fréquence afin de pouvoir comparer les fonctions de transfert. Cette comparaison permet de définir une incertitude commune sur la plage de fréquence.

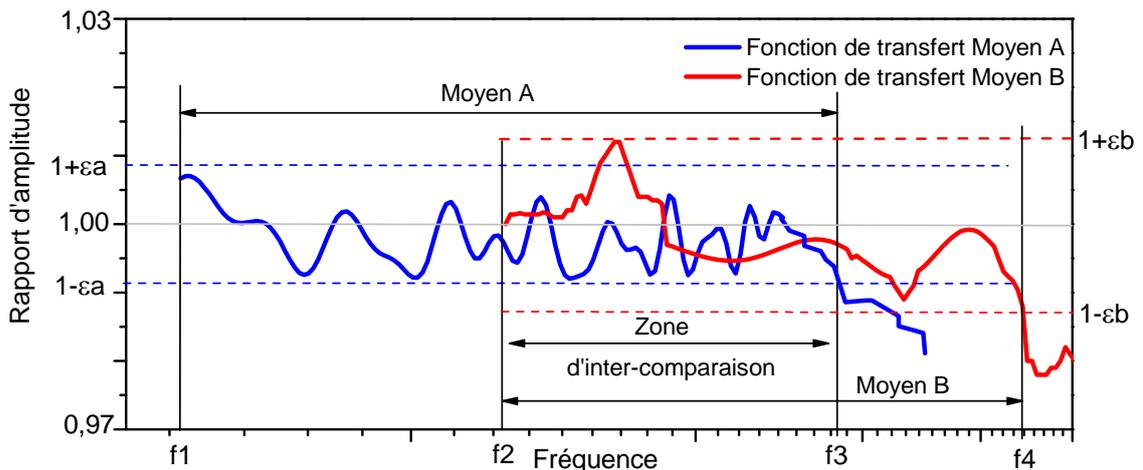


Fig. 2 – Principe de la comparaison entre deux moyens d'étalonnage A et B.

La figure 2 donne par exemple le résultat de l'étalonnage dynamique à l'aide de deux moyens d'étalonnage. Avec le moyen A, en terme de bande passante, le capteur en essai a une fonction de transfert constante à  $1 \pm \varepsilon_a$  dans la bande de fréquence  $[f_1, f_3]$ . Considérant le

moyen B, sa réponse est constante à  $1 \pm \varepsilon_b$  dans la bande de fréquence  $[f_2, f_4]$ . Dans la zone de comparaison  $[f_2, f_3]$ , la réponse du capteur est prise égale à  $1 \pm \varepsilon_b$  quelque soit le moyen. Par extension, la fonction de transfert en amplitude du capteur est constante à  $1 \pm \varepsilon_b$  dans la bande de fréquence  $[f_2, f_4]$ . Ainsi, sans faire aucune hypothèse sur le comportement dynamique des moyens et sur celui du capteur, il est possible de déterminer une bande de fréquence dans laquelle le capteur a une réponse en amplitude et une incertitude associée connue.

Afin de compléter la fonction de transfert par la courbe de phase, la réponse d'un deuxième capteur est enregistrée lors des étalonnages sur les différents moyens. Les caractéristiques dynamiques du second capteur doivent être sensiblement identiques à celles du premier. Le temps initial est arbitrairement imposé peu avant la transition de l'échelon pour les deux capteurs. Le calcul du déphasage entre la sortie  $s(t)$  (réponse du premier capteur) et l'entrée  $e(t)$  (réponse du deuxième capteur) est ensuite analysé comme précédemment, mais en terme de bande passante en phase.

Ce principe est comparable à la notion de bande passante et est à la fois applicable à l'estimation de la fonction de transfert associée au capteur de référence mais aussi à la chaîne d'acquisition et de traitement.

Si on applique à l'entrée de la chaîne d'acquisition un échelon de tension, on détermine la fonction de transfert de la partie acquisition. Le modèle obtenu est représenté sur la figure 3.

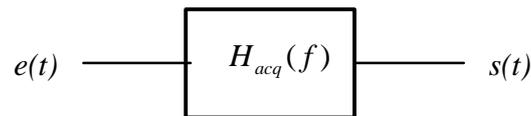


Fig. 3 – Modèle de la fonction de transfert de l'acquisition.

Si on soumet l'entrée du capteur de référence à un échelon de pression, on détermine la fonction de transfert globale. Le modèle obtenu est représenté sur la figure 4. Il est très important de noter qu'on estime ici la fonction de transfert de l'acquisition et du capteur  $H_r(f)$  : la composante  $H_{\text{capteur}}(f)$  n'est pas mesurable directement.

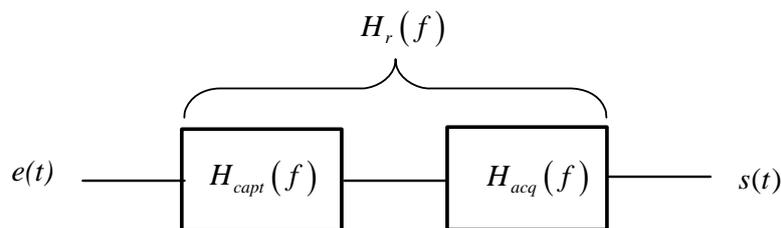


Fig. 4 – Modèle du capteur de référence.

Dans la pratique, le processus d'étalonnage d'un capteur de référence comporte cinq étapes :

- 1) l'étalonnage quasi statique en tension du système d'acquisition ;
- 2) l'étalonnage quasi statique en pression du capteur à étalonner ;
- 3) l'évaluation (caractérisation) du logiciel de calcul de la fonction de transfert ;
- 4) l'étalonnage en régime dynamique en tension du système d'acquisition ;

## 5) l'étalonnage en régime dynamique en pression du capteur à étalonner.

L'étalonnage quasi statique en tension est effectué en mesurant un signal délivré par un générateur de tension qui est mesuré en parallèle par un multimètre qui apporte la traçabilité. L'étalonnage quasi statique en pression est effectué en mesurant la pression délivrée par un générateur de pression qui est mesuré en parallèle par un manomètre qui apporte la traçabilité. L'évaluation du logiciel de calcul de la fonction de transfert est effectuée en injectant dans le logiciel les valeurs d'un signal correspondant à une fonction de transfert de référence. La fonction de transfert calculée par le logiciel est alors comparée à la fonction de transfert de référence. Cette étape permet de déduire l'incertitude introduite par le logiciel. Les fonctions de transferts sont ensuite déterminées au moyen d'un générateur d'échelon de tension pour l'étalonnage en régime dynamique en tension du système d'acquisition, et au moyen de générateurs d'échelon de pression pour l'étalonnage en régime dynamique en pression du capteur à étalonner. L'incertitude globale en fonction de la fréquence est enfin calculée à partir des différentes composantes en appliquant le GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*).

## 2. Générateurs de pression apériodiques

Il existe plusieurs types de générateurs apériodiques selon la forme du signal à générer :

- dispositif à ouverture rapide (générateur d'échelons) ;
- tube à choc (générateur d'échelons) ;
- bombe close (générateur d'échelons ou d'impulsions) ;
- générateur d'impulsion à pendule ;
- générateur d'impulsions à chute libre.

Les générateurs employés au LMD sont le tube à choc et le dispositif à ouverture rapide.

### 2.1. Tube à choc

Un tube à choc est un cylindre fermé aux deux extrémités composé de deux chambres séparées par une membrane. A l'état initial, la chambre haute pression (HP) contient le gaz moteur et la chambre basse pression (BP) contient le gaz de travail. Lorsque la membrane éclate une onde de pression se propage dans la chambre basse pression. Le capteur à étalonner est positionné soit en fond de tube ou sur la paroi de la chambre basse pression. L'échelon de pression a une forme différente selon le positionnement du capteur (cf. fig. 5).

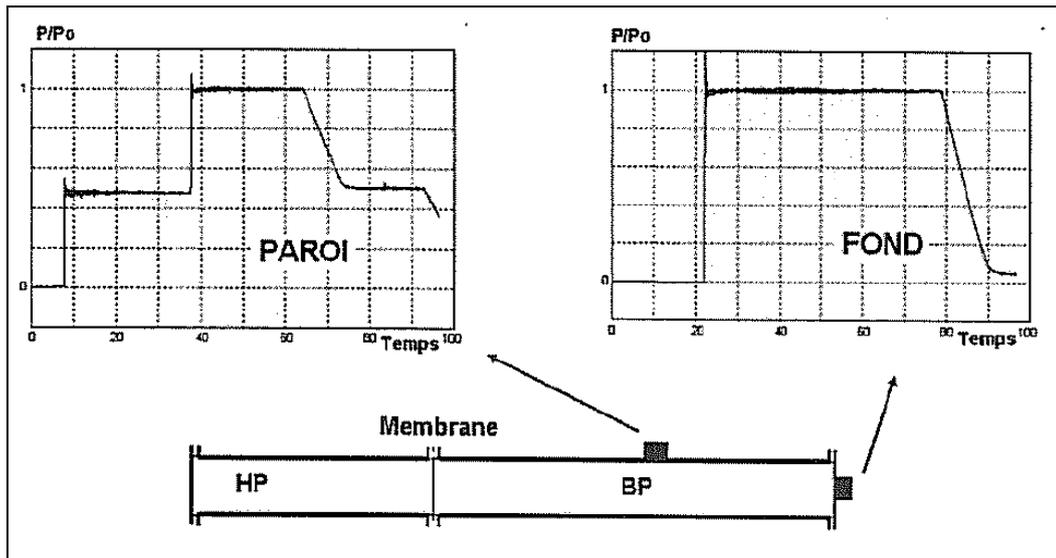


Fig. 5 – Echelons de pressions observés avec un tube à choc.

En raison d'un temps de montée de l'échelon de pression très rapide, le domaine d'utilisation du tube à choc se situe vers les hautes fréquences mais, le processus de rupture de la membrane limite le domaine. En revanche, l'échelon ayant une durée finie, ce moyen est limité dans le domaine des basses fréquences. Le tube à choc est adapté pour les hautes et basses pressions.

## 2.2. Dispositif à ouverture rapide

Le dispositif à ouverture rapide est un générateur d'échelons de pression. Celui-ci est composé de deux chambres de volumes différents, appelées petite chambre et grande chambre, et séparées par un système d'isolement et de mise en communication rapide. Le capteur à étalonner est monté sur la petite chambre. A l'état initial, on génère deux pressions différentes dans chacune des chambres. Lorsque les deux chambres sont mises en communication un échelon de pression d'amplitude relative égale à la différence des pressions est généré (cf. fig. 6).

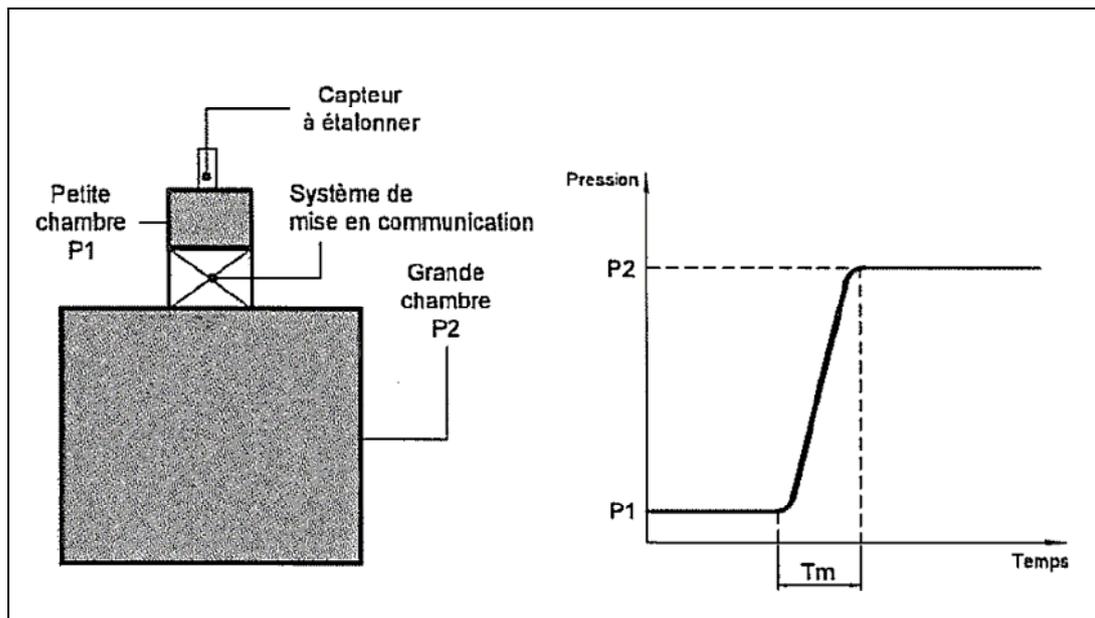


Fig. 6 – Dispositif à ouverture rapide.

En raison de la durée de l'échelon de pression, ce type de générateur est adapté aux basses fréquences, en revanche il est limité vers les hautes fréquences en raison du temps de montée de l'échelon de pression.

### 3. Possibilités de mesure

Le LMD a développé un ensemble de générateurs afin de couvrir une plage d'amplitudes et de fréquences correspondant aux demandes d'étalonnages. Ces moyens constitués de tubes à chocs et de dispositifs à ouverture rapides sont représentés sur la figure 7. Le recouvrement entre les tubes à choc et le dispositif à ouverture rapide est effectué au moyen d'un tube à choc (appelé tube à choc de référence, TCR) de grandes dimension pouvant descendre dans les basses fréquences.

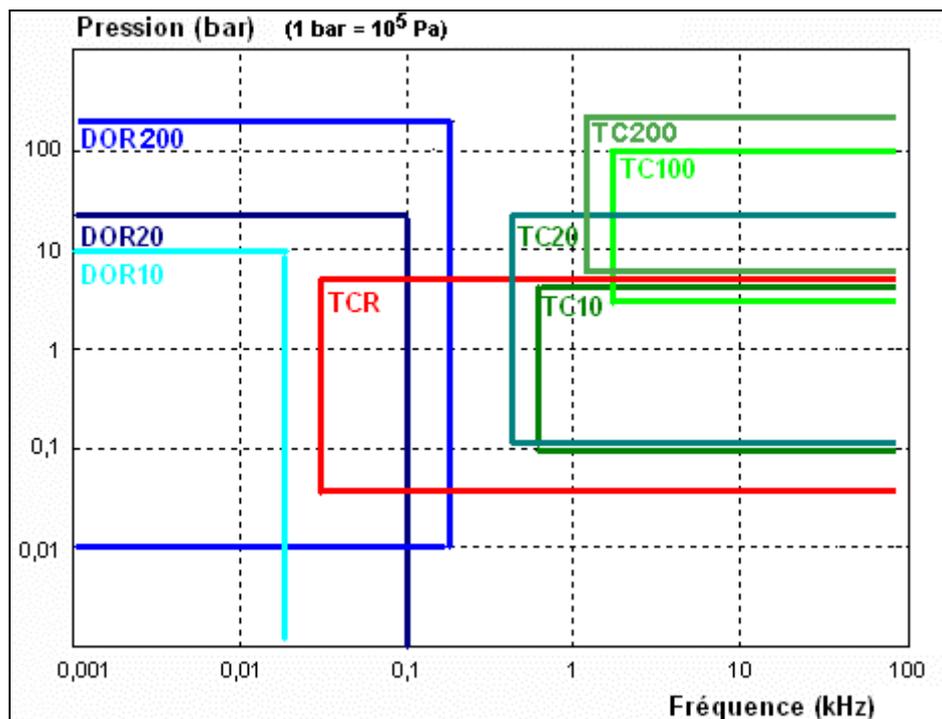


Fig. 7 – Domaine d'utilisation des générateurs d'échelons du LMD  
(DORXXX : dispositif à ouverture rapide XXX bar ;  
TCXXX : tube à choc XXX bar)

#### 4. Perspectives

Ce dossier présente les méthodes mises en œuvre pour assurer la traçabilité des mesures de pression en régime dynamique avec un capteur de référence. Actuellement les travaux portent sur l'extension de la plage de pression, pour atteindre 100 bar (10 MPa). Ces travaux passent notamment par le développement d'un tube à choc de grandes dimensions (15 mètre de longueur) en relation avec l'Université de Brasilla.

#### 5. Pour approfondir le sujet...

Site internet du Laboratoire de métrologie dynamique de Arts et métiers ParisTech :  
[www.paris.ensam.fr/lmd](http://www.paris.ensam.fr/lmd)

Damion J.-P. et Oliveira A.B.S., « Incertitude de mesure dans la détermination de la sensibilité en quasi-statique d'un capteur de pression », Congrès international de métrologie, Toulon, France, 20-23 octobre 2003.

Oliveira A.B.S. et Damion J.-P., « Détermination de l'incertitude de la fonction de transfert d'un capteur de pression en basse fréquence », Congrès international de métrologie, Lyon, France, 20-23 juin 2005.

Barcelos Jr. M.N., De Souza Vianna J.N., De Sousa Oliveira A.B. et Damion J.-P., "Valuation of the influence of gas composition in dynamic calibration in a shock tube", Congrès international de métrologie, Saint-Louis, France, 22-25 octobre 2001.

Léodido L.M., Sarraf Ch. et Damion J.-P., « Caractéristiques dynamiques des capteurs de pression en milieu hydraulique », Congrès international de métrologie, Paris, France, 22-25 juin 2009.

Diniz A.C.G.C., Oliveira A.B.S., De Souza Vianna J.N. et Neves F.J.R., “Dynamic calibration methods for pressure sensors and development of standard devices for dynamic pressure”, XVIII Imeko World Congress, Rio de Janeiro, Brésil, 17-22 septembre 2006.

Damion J.-P., « Moyens d'étalonnage dynamique des capteurs de pression », *Bulletin du Bureau National de Métrologie*, **vol. 8**, n° 30, 1977.