

Dynamic calibration of piezoelectric sensors for the ballistic high-pressure measurement / Étalonnage dynamique des capteurs piézoélectriques pour la mesure de haute pression balistique

L. Elkarous¹, M. Pirlot², J.C. Golinval³

¹ Académie Militaire, Département Techniques de l'Armement, Nabeul, Tunisie

elkarousslamine@yahoo.fr

² Ecole Royale Militaire, Département de Systèmes d'armes et Balistique (ABAL), Bruxelles, Belgique

³ Université de Liège, LTAS-Structural Dynamics Research Group, Liège, Belgique

Abstract

The safety of use of certain devices such as firearms and closed vessels in the military field is closely related to the accuracy of the pressure measurement of the hot combustion gas. This pressure is considered as one of the most dynamic variables which are not easy to measure. Gas pressure is characterized by a relatively short duration and high amplitude. Today, piezoelectric transducers are the technique most used in ballistic pressure measurements. Calibration of these sensors is therefore very important and is an essential task for a correct determination of the pressure. This operation has not been completely addressed yet and still requires further investigation. In this paper, we present the state of the art in calibration methods of piezoelectric sensors used for measurement of the ballistic pressure. Specific aspects related to the calibration of these sensors are also discussed. In the same context, the different research topics of the ballistics laboratory of the Royal Military Academy aimed at developing a dynamic calibration method are presented.

Keywords: pressure measurement; ballistics; dynamic calibration.

Résumé

La sécurité d'utilisation de certains dispositifs tels que les armes à feu et les bombes manométriques dans le domaine militaire est étroitement liée à la précision de mesure de la pression des gaz chauds issus de la combustion d'une poudre propulsive. Il s'agit de l'une des variables dynamiques les plus difficiles à mesurer. La pression de gaz de combustion est caractérisée par une durée relativement courte et une haute amplitude. De nos jours, la mesure par capteur piézoélectrique est la technique la plus utilisée pour la mesure de pression balistique. L'étalonnage de ce type de capteur importe donc beaucoup et s'impose comme une tâche primordiale pour une mesure correcte de la pression. Cette opération n'est pas encore complètement maîtrisée et requiert davantage d'investigation. Dans ce travail, nous présentons un état de l'art des méthodes d'étalonnage des capteurs piézoélectriques employés pour la mesure de la pression balistique. Les aspects particuliers liés à l'étalonnage de ces capteurs sont aussi discutés. Dans le même contexte, des recherches qui visent à mettre au point une méthode d'étalonnage dynamique au sein du laboratoire de balistique de l'Ecole royale militaire sont présentées.

Mots clés: mesure de pression; balistique; étalonnage dynamique.

1. Introduction

Le départ d'un coup de feu est accompagné par la production des gaz chauds sous haute pression (gaz de combustion). La connaissance de la variation temporelle de cette grandeur, notamment sa valeur de crête est un besoin fondamental de beaucoup d'intervenants dans divers secteurs (armement, production des munitions, sécurité, R&D,...). Il s'agit de l'une des variables dynamiques les plus difficiles à mesurer et elle est caractérisée par une durée relativement courte et une haute amplitude.

La mesure par capteur piézoélectrique est la technique la plus utilisée pour déterminer l'évolution de la pression de gaz de combustion dans une arme à feu (pression balistique). L'étalonnage de ces capteurs est l'un des facteurs essentiels qui influence

la précision de la mesure de pression. Par le passé, ces capteurs étaient étalonnés statiquement avant que des procédures d'étalonnage dynamique ne soient introduites pour prendre en compte leur comportement dynamique.

Cette étude présente un état de l'art de méthodes d'étalonnage des capteurs de pression balistique. Un aperçu sur les recherches dans le sujet de l'étalonnage dynamique au sein du laboratoire de balistique de l'école royale militaire est aussi donné.

2. Capteur de pression piézoélectrique

Les capteurs piézoélectriques génèrent une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à un effort mécanique tel que la pression (effet découvert par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880). La charge

électrique est caractérisée par une haute impédance. Pour cela, l'utilisation de ces capteurs dans la mesure de pression est restée une curiosité jusqu'à ce qu'elle fut mise en pratique par Dr. Gohlke en 1935. L'introduction des tubes électromètres a permis de mettre en pratique la mesure de pression par effet piézoélectrique. Cette utilisation a connu d'énormes succès surtout quand W.P. Kistler développa l'amplificateur de charge en 1950 [1].

Le capteur de pression piézoélectrique est typiquement modélisé par un système mécanique linéaire de second ordre à un seul degré de liberté (x) qui consiste en une masse m (kg), un ressort de constante k (N/m) et un amortisseur de coefficient c (Ns/m) [2,3,4]. Le mouvement de ce système est décrit mathématiquement par une équation différentielle du second ordre:

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

Où, F est la force extérieure appliquée au capteur et t est le temps.

Cette équation est établie en appliquant le principe d'Alembert. Elle est aussi connue sous la forme suivante :

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dx(t)}{dt} + \omega_n^2 x(t) = \frac{F(t)}{m} \quad (2)$$

Où, $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (rad/s) est la pulsation propre du capteur et $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ est le coefficient d'amortissement.

La transformée de Laplace appliquée à l'équation (2) permet de déterminer la fonction de transfert du capteur de pression. Cette fonction est donnée par l'expression suivante :

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

Où, K (pC/bar¹) est la sensibilité statique du capteur et $s = j\omega$ est l'opérateur de Laplace.

Cette expression permet de déterminer la réponse du capteur à tout type de sollicitations (échelon, impulsion ou une fonction linéaire). La transformée de Laplace inverse est appliquée à l'équation (3) pour déterminer la réponse du capteur à une sollicitation caractérisée par la fonction $F(t)$ [2].

De nombreuses organisations telles que l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN), la Commission Internationale Permanente pour l'épreuve des armes à feu portatives (C.I.P.) et la Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute (SAAMI) ont développé leurs activités dans le domaine de la mesure de la pression balistique par capteur piézoélectrique. De nos jours, il n'existe pas

¹La sensibilité est souvent exprimée en pC/bar avec 1 bar = 0.1 MPa (Pa est l'unité SI de pression)

une méthode unique puisque les dites organisations préconisent des techniques différentes de mesure de pression. Il en résulte deux méthodes pour la mesure de la pression balistique : la mesure directe et la mesure indirecte.

Depuis des années, divers types de capteurs de pression piézoélectriques ont été commercialisés. Le laboratoire ABAL s'est doté des différents capteurs afin d'étudier la pression de gaz dans une arme à feu. La figure suivante illustre les trois types de ces capteurs, à savoir HPI type GP6 et Kistler type 6215 employés à la mesure directe de pression ainsi que PCB type 117B104 destiné pour la mesure indirecte.



Figure 1 : Capteurs de pression piézoélectriques

Le capteur de pression piézoélectrique n'est que le premier élément d'une chaîne de mesure constituée d'autres composants dont le rôle est d'acheminer le signal mesuré vers l'unité de traitement. Comme montré sur la figure suivante, une chaîne de mesure de pression se compose essentiellement d'un capteur, d'un amplificateur de charge, d'un système d'acquisition (DAQ) et d'une unité de traitement (ordinateur avec logiciel).

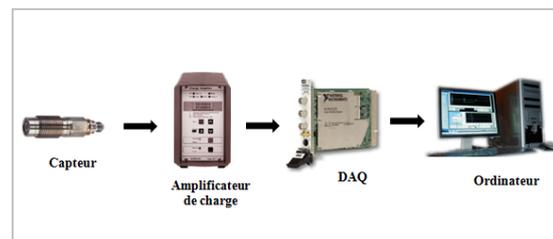


Figure 2 : Chaîne de mesure de la pression balistique

Les essais de mesure de pression sont réalisés à une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz et une période de 10 ms. Les signaux sont filtrés à l'aide d'un filtre passe-bas de type Butterworth d'ordre 2 avec une fréquence de coupure qui dépend en fait de la dynamique du cycle balistique (10 kHz, 20 kHz,...).

3. Mesure de la pression balistique

En métrologie balistique, la mesure de la pression de gaz de combustion est pratiquée dans deux domaines : l'arme à feu et la bombe manométrique. La bombe manométrique est une enceinte à volume clos dans lequel on fait brûler une quantité de poudre propulsive.

La figure 3 illustre le dispositif expérimental de la mesure de pression dans une bombe manométrique

utilisée au laboratoire de matériaux énergétiques de l'Ecole Royale Militaire.

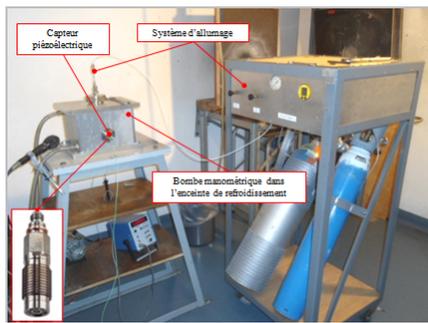


Figure 3 : Mesure de la pression dans une bombe manométrique

La variation typique de la pression en fonction du temps est illustrée à la figure suivante.

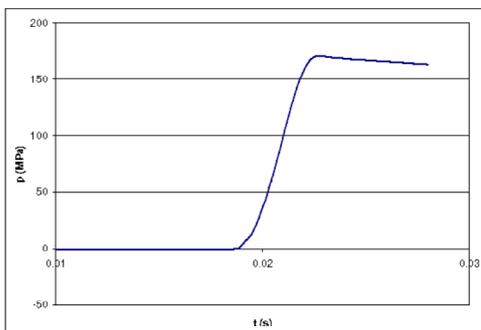


Figure 4 : Evolution temporelle de la pression dans une bombe manométrique

La bombe manométrique est employée pour déterminer les caractéristiques thermodynamiques et la vitesse de combustion des poudres propulsives. Ces poudres seront utilisées dans les munitions de différents calibres pour propulser le projectile dans l'arme à feu en générant la pression adéquate.

Le laboratoire de balistique dispose de canons d'épreuves pour différents calibres (5.56 mm, 7.62 mm, 9 mm, 12.7 mm,...). Ces canons sont montés sur un Bloc Manométrique à Canons Interchangeables (BMCI) permettant ainsi de mesurer les pressions de gaz.

Le dispositif de la figure 5 représente le BMCI .50 inch. Le canon a été modifié pour permettre d'effectuer des mesures comparatives moyennant les trois types de capteurs de la figure 1.

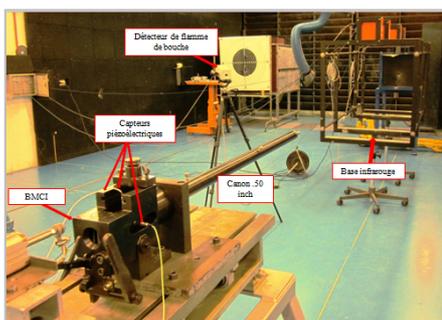


Figure 5 : Dispositif de tir BMCI .50 inch

Le graphique 6 illustre l'évolution temporelle de la pression en fonction du temps mesurée par chaque capteur.

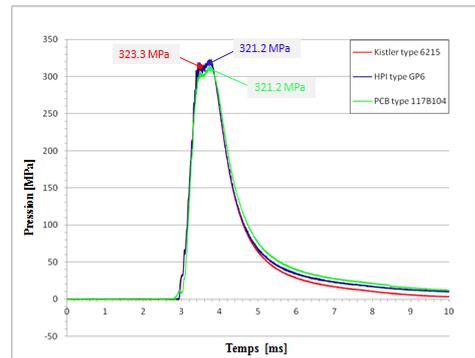


Figure 6 : Evolution temporelle de la pression dans la chambre de combustion d'une arme à feu

Les allures de pression sont similaires. Les différences existent surtout au niveau des valeurs maximales et des phases descendantes des courbes de pression.

4. Etalonnage des capteurs de pression piézoélectriques

L'étalonnage est l'opération qui, dans des conditions bien définies, permet d'établir une relation entre la grandeur d'entrée (mesurande) et la grandeur de sortie (mesure) [5].

Dans la plupart des cas, les capteurs de pression balistique sont étalonnés en régime statique moyennant, par exemple, la balance manométrique (balance de poids mort). Les étalons de pression en régime statique ainsi que les incertitudes associées sont caractérisés d'une manière précise. La balance manométrique est un étalon primaire qui peut fournir des pressions de référence d'une grande précision (erreur relative inférieure à 0.05%). Cette méthode permet de déterminer uniquement la sensibilité d'un capteur de pression piézoélectrique mais elle ne donne aucune information sur son comportement dynamique tel que la réponse en fréquence (amplitude et phase), la fréquence de résonance, le temps de montée, le facteur d'amortissement et le dépassement [6].

La figure 7 montre une balance manométrique type Harwood. Elle génère des pressions d'environ 1400 MPa avec une incertitude relative de $\pm 0.02\%$.



Figure 7 : Balance manométriques type Harwood

Les pressions de référence de l'étalonnage statique ne peuvent pas être comparées directement avec la dynamique de la pression des gaz de combustion dans une arme à feu. Dans ce type de mesure, la connaissance précise du comportement dynamique du capteur de pression importe beaucoup. Une procédure d'étalonnage dynamique doit donc être introduite pour pouvoir caractériser le comportement du capteur de pression piézoélectrique.

Avant ce stade, il convient de mentionner l'étalonnage quasi-statique. Il s'agit d'une procédure qui a été introduite pour étalonner les capteurs de pression d'une manière "plus dynamique" et plus aisée que l'étalonnage statique. Par rapport à l'étalonnage statique par balance manométrique, l'étalonnage quasi-statique n'est qu'un étalonnage comparatif qui requiert un capteur de référence étalonné statiquement. Cette procédure consomme moins de temps et trouve une large utilisation dans divers laboratoires de balistique.

Au laboratoire ABAL, un générateur hydraulique de hautes pressions Kistler type 6906 est employé pour étalonner quasi-statiquement les capteurs de pression balistique.

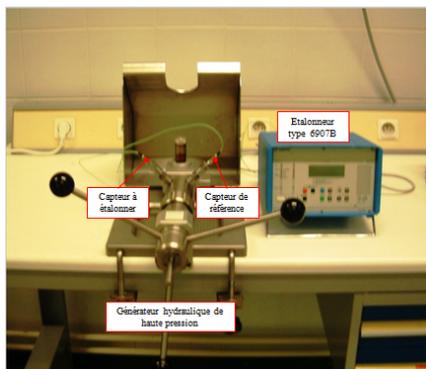


Figure 8 : Etalonnage quasi-statique par le générateur de haute pression Kistler type 6906

La rotation de la broche guide un piston qui comprime l'huile hydraulique et permet de générer une pression pouvant atteindre 1000 MPa. Contrairement à l'étalonnage statique, l'évolution de la pression est continue. La figure 9 illustre la détermination de la sensibilité et la linéarité du capteur à étalonner [7].

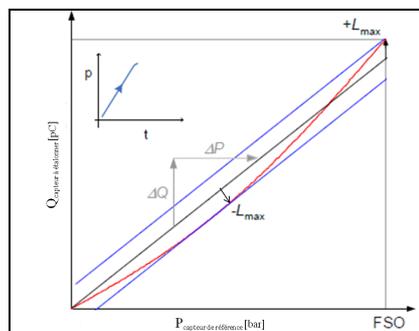


Figure 9 : Détermination de la sensibilité et la linéarité par étalonnage quasi-statique

Sur la figure 9, la courbe en rouge est la pression fournie par le générateur de pression quasi-statique. Les droites bleues indiquent les limites de la variation de pression. FSO (Full Scale Output) est la sortie pleine échelle.

La sensibilité S [pC/bar] et la linéarité L [%FSO] du capteur sont données par les expressions suivantes :

$$S = \frac{\Delta Q}{\Delta P} \quad (4)$$

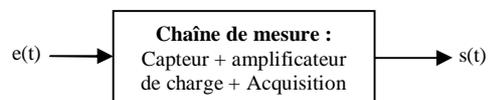
$$L = +L_{\max} = -L_{\min}$$

En régime dynamique, un étalon de « pression dynamique » n'existe pas [4,8]. Un capteur de référence est utilisé pour déterminer la grandeur d'entrée (le mesurande).

Depuis quelques décennies, beaucoup d'efforts ont été consentis dans l'étalonnage dynamique des capteurs de pression. L'œuvre de Scheweppe et al. [2] publiée en 1963 est considérée comme le premier document de référence. En 1972, ASME (American Society of Mechanical Engineers) a publié un guide pour l'étalonnage dynamique des capteurs de pression [3]. Une version de ce guide révisée par ISA (Instrumentation, Systems, and Automation Society) est disponible depuis 2002. Il s'agit d'une version plus élaborée où les propriétés des capteurs de pression ainsi que les méthodes d'étalonnage dynamique ont été abordées d'une manière plus détaillée [4].

Les générateurs de pression dynamique sont subdivisés en deux classes : périodiques et apériodiques [2,4]. Les générateurs apériodiques génèrent des échelons ou des impulsions de pression. Ils regroupent les tubes à choc, les dispositifs à ouverture rapide, les bombes closes et les générateurs d'impulsions à pendule et à poids tombant. Ces générateurs permettent de caractériser la réponse transitoire du capteur de pression [4,8]. Les générateurs périodiques délivrent des signaux sinusoïdaux. Ils regroupent les dispositifs rotatifs, les sirènes, les pistonphones, ... Ces générateurs sont employés pour caractériser la réponse harmonique des capteurs de pression dans un domaine relativement limité en amplitude et en fréquence [4,6].

Comme nous l'avons défini, l'étalonnage dynamique du capteur de pression consiste en la détermination de la relation entre le signal de sortie $s(t)$ et le signal d'entrée $e(t)$, c'est-à-dire la fonction de transfert. Celle-ci existe seulement si le capteur est décrit par un système linéaire [2]. Dans la plupart des cas, les signaux $e(t)$ et $s(t)$ sont issus des réponses des chaînes de mesure complètes (capteur, amplificateur de charge, système acquisition et traitement) respectivement du capteur de référence et du capteur à étalonner.



Pour un étalonnage statique, la fonction de transfert est le rapport entre les valeurs des grandeurs d'entrée et de sortie. Dans le cas de l'étalonnage dynamique, il s'agit d'une fonction complexe $H(\omega)$ définie comme étant le rapport entre la transformée de Fourier du signal de sortie $S(\omega)$ sur la transformée de Fourier du signal d'entrée $E(\omega)$.

$$H(\omega) = \frac{S(\omega)}{E(\omega)} = \frac{\int_0^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt}{\int_0^{\infty} e(t)e^{-j\omega t} dt} \quad (5)$$

En pratique, les signaux de pression sont échantillonnés et non-périodiques. Une Transformée de Fourier Discrète (DFT) implémentée par une Transformée de Fourier Rapide (FFT) est appliquée pour déterminer la réponse fréquentielle.

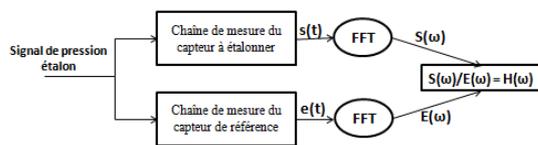


Figure 10 : Principe de l'étalonnage dynamique

Généralement, la fonction de transfert est représentée sous la forme d'un diagramme de Bode comprenant une courbe de gain en dB (ou de rapport d'amplitude) en fonction de la fréquence et d'une courbe de phase en degrés en fonction de la même fréquence [8].

Les signaux fournis par les générateurs apériodiques ne sont pas parfaitement connus en amplitude et en fréquence sauf par l'intermédiaire d'un capteur de référence étalonné d'une façon spécifique [8]. Le tube à choc est une exception car l'amplitude des échelons peut être calculée en se basant sur des modèles thermodynamiques. Ce calcul requiert la connaissance des propriétés des gaz utilisés et la vitesse de l'onde de choc dans le tube. Ceci ne s'avère pas toujours aisé, surtout pour la mesure de la vitesse de l'onde de choc. Pour cela, l'utilisation d'un capteur de référence est souvent retenue malgré que les recherches visent à mettre au point un tube à choc comme étalon primaire [4,8].

Le tube à choc est très utile pour étudier le comportement dynamique des capteurs de pression en hautes fréquences (généralement jusqu'à 100 kHz), mais l'amplitude des échelons de pression générés reste quand même limitée à environ 10 MPa [8]. Donc, le tube à choc n'est pas adéquat pour l'étalonnage des capteurs de pressions balistiques qui demande des pressions plus élevées.

Le dispositif à ouverture rapide permet de générer des échelons positifs ou négatifs. Un dispositif générant des échelons de pression d'amplitude d'environ 1 GPa et un temps de montée inférieur à 1 ms a été mis au point pour étalonner les transducteurs balistiques [6,9].

La figure ci-dessous montre le générateur dynamique de pression type Harwood utilisé à Aberdeen Test Center (ATC) aux USA [10].



Figure 11 : Générateur dynamique de pression type Harwood

La pression de référence est mesurée par une jauge piézorésistive de manganin ou un capteur de pression piézorésistif (étalon secondaire) dont l'étalonnage est traçable au National Institute of Standards and Technology (NIST). L'incertitude de mesure relative associée est de $\pm 0.10\%$.



Figure 12 : Jauge piézorésistive de manganin (gauche) et capteur de pression piézorésistif (droite)

Le générateur dynamique de pression type Harwood (dispositif à ouverture rapide) permet de délivrer des échelons positifs de pression d'amplitude 550 MPa et d'un temps de montée d'environ 2 ms [10]. Cette valeur du temps de montée est assez élevée pour permettre d'effectuer un étalonnage dynamique dans les conditions requises. Pour cela, les dispositifs à ouverture rapide restent limités en basse fréquence.

Le concept de génération d'une pression dynamique par utilisation de la bombe manométrique est connu depuis longtemps. Mickevicz a développé une bombe permettant de générer des pressions d'environ 300 MPa au Naval Ordnance Laboratory [2]. Cette classe de générateurs dynamiques de pression qui exploitent la combustion d'une poudre propulsive a aussi été revue par J.P. Damion [12].

Le manque de précision sur la détermination l'amplitude des échelons de pression, le temps de montée relativement assez élevé, le danger de l'utilisation et la durée en temps assez importante que nécessite la réalisation des essais étaient tous des raisons suffisantes pour arrêter l'exploitation de la bombe manométrique comme générateur dynamique de pression.

En absence des moyens d'étalonnage en haute amplitude et haute fréquence, les générateurs d'impulsions de pression par chute libre d'une masse trouvent une large application en métrologie balistique. Ils permettent de réaliser un contrôle dynamique des capteurs de pression piézoélectrique en générant des impulsions de pression sinusoïdales qui agissent simultanément sur les deux capteurs (capteur à tester et capteur de référence). La masse tombante heurte un piston en contact avec un fluide hydraulique dans un volume de compression. L'impulsion de pression générée est similaire à une demi-période d'une sinusoïde; son amplitude dépend de la compressibilité du fluide, de la masse, de la hauteur de chute et de la section du piston.

La figure 13 montre quelques générateurs d'impulsions de pression en utilisation à l'heure actuelle par des organisations et institutions de métrologie.



Figure 13 : Générateurs d'impulsions de pression

Les intervenants en métrologie balistique ont essayé d'adapter leurs générateurs dynamiques pour obtenir une impulsion de pression qui ressemble au mieux à l'évolution de pression dans l'arme à feu. L'objectif est l'obtention d'un signal de pression dont la dynamique est fortement similaire à l'évolution de la pression de gaz de combustion dans une arme à feu afin d'investiguer le comportement dynamique du capteur à tester.

Ces générateurs permettent de créer des impulsions de pression d'une largeur qui varie de 3 à 7 ms, un temps de montée d'environ 2 ms et de pression maximale jusqu'à 700 MPa. L'emploi de ces systèmes a pour objectif de réaliser un étalonnage par comparaison d'un capteur de pression balistique à tester par rapport à un capteur de référence. Pour ce faire, on suppose que les deux capteurs sont soumis à la même sollicitation de pression.

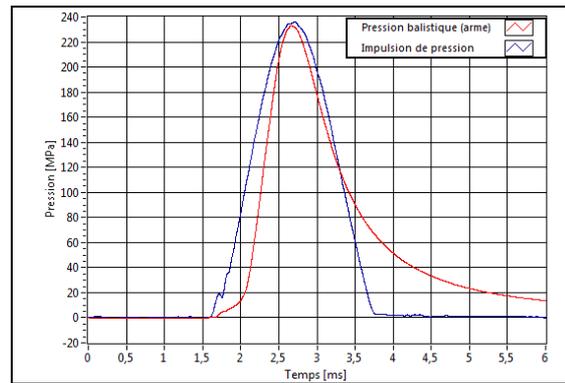


Figure 14 : Comparaison entre l'impulsion de pression dynamique et l'évolution de la pression balistique

Après un étalonnage quasi-statique, le capteur de pression à tester est soumis à un contrôle dynamique. Pour compenser la différence du comportement dynamique du capteur à tester par rapport au capteur de référence, un polynôme est déterminé en exploitant les branches ascendantes des impulsions de pression données par les deux capteurs. Ce polynôme est ensuite utilisé au stade du traitement des mesures afin d'ajuster les mesures de pression de gaz de combustion.

5. Conception d'un système d'étalonnage dynamique

Les recherches menées au sein du laboratoire ABAL ont pour objectif le développement d'un générateur de pression apériodique qui permet de délivrer des impulsions de pression caractérisées par une haute précision et une bonne reproductibilité. Ce système doit couvrir une large gamme d'amplitude et de fréquence. De là, hormis la forme de l'impulsion de pression, d'autres caractéristiques telles que le temps de montée et la durée de l'impulsion doivent être investigués.

La figure ci-dessous illustre le principe de l'expérimentation.

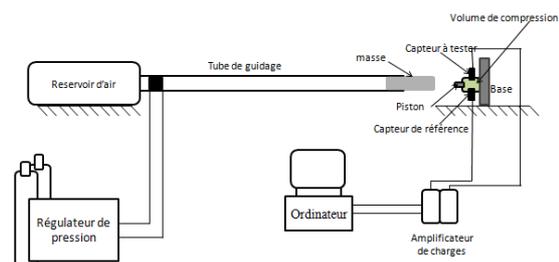


Figure 15 : Schéma du principe du système d'étalonnage dynamique

La pression est générée par l'impact d'une masse sur un piston en contact avec l'huile hydraulique contenue dans le volume de compression. La masse est lancée par un canon à air, comme indiqué sur la figure 15.

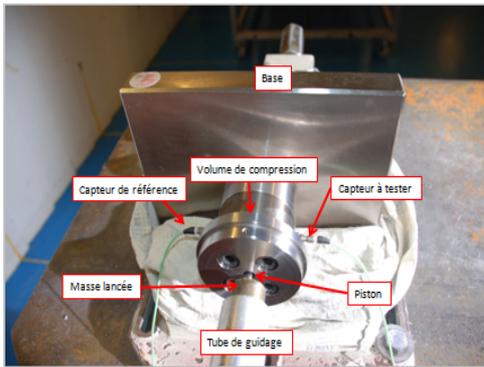


Figure 16 : Fixation des capteurs piézoélectriques

Comme illustré sur la figure 17, la variation de la masse et de la vitesse de l'impacteur permet d'obtenir des impulsions de pression de différentes durées et temps de montée.

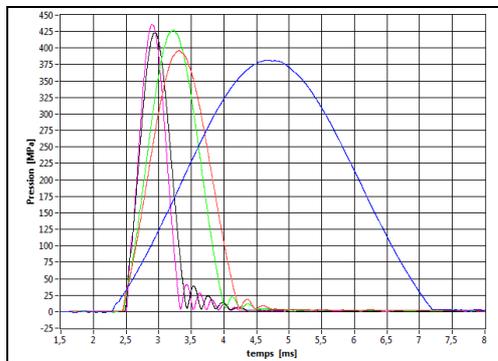


Figure 17 : Impulsions de pression

L'impulsion en rose a un temps de montée d'environ 300 µs. Cette valeur reste assez élevée pour effectuer un étalonnage dynamique. Les études visent à améliorer les différents paramètres du système pour générer une impulsion caractérisée par un temps de montée plus court (quasi-δ).

A l'impact, la masse transmet son énergie cinétique au fluide dans le volume de compression via le piston. La valeur de la pression maximale et la durée de l'impulsion peuvent être estimées en se basant sur le modèle physique masse-ressort [2]. Le fluide est modélisé par un ressort de constante c. Sous l'effet de l'impact de la masse, le piston de masse m et de section A comprime le fluide. Son mouvement est caractérisé par le déplacement x(t). La pression p(t) générée est proportionnelle au déplacement.

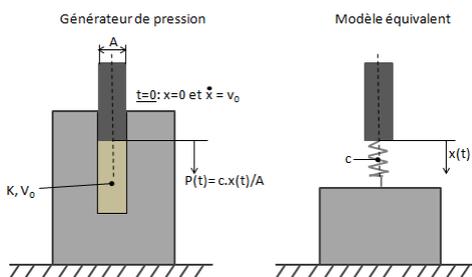


Figure 18 : Modélisation du générateur de pression

La compressibilité k (1/Pa) est donnée par :

$$k = \frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V_0}$$

Où V_0 (m³) est le volume de compression initial.

Dans les applications militaires, l'utilisation de la bombe manométrique pour investiguer le comportement dynamique des capteurs de pression balistique peut se révéler très bénéfique. En effet, l'étude du comportement des capteurs se déroule dans des conditions fortement semblables à celles rencontrées dans une arme à feu. De plus, les mesures de pression sont reproductibles. Pour cela, de nombreuses institutions continuent à utiliser la bombe close pour le contrôle dynamique des capteurs de pression balistique surtout depuis l'introduction du concept de poudre de référence dont la combustion génère des "pressions connues" (pressions mesurées à priori par le fournisseur par un capteur de référence).

Le dispositif illustre une bombe close qui a été développée au sein du laboratoire de matériaux énergétiques.

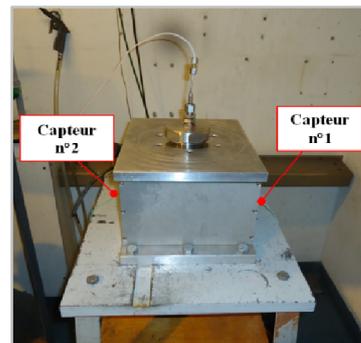


Figure 19: Bombe manométrique à deux capteurs

Ce dispositif a offert la possibilité d'effectuer un étalonnage dynamique par comparaison des capteurs de pression piézoélectriques. Le principe de la méthode consiste à comparer le capteur à tester par rapport à un capteur de référence. Des capteurs de même type peuvent aussi être comparés deux à deux en utilisant une poudre de référence. Les capteurs devront donc être étalonnés statiquement avant d'investiguer leurs comportements dynamiques.

L'étude comparative du comportement dynamique des capteurs de pression a été effectuée avec différents types et masses de poudres afin de couvrir une large bande d'amplitude et de fréquence.

7. Conclusion

Ce travail présente les moyens d'étalonnage dynamique de capteurs piézoélectriques destinés à la mesure de pression. Il a montré que ces générateurs de pression sont soit limités en amplitude (tubes à choc) ou soit limités en fréquence (dispositifs à ouverture rapide) pour réaliser un étalonnage

dynamique des capteurs de pression. Les signaux générés ne couvrent pas tout le domaine amplitude-fréquence requis. De plus, ces moyens nécessitent souvent l'emploi d'un capteur de référence auquel le capteur de pression sera comparé. Cette technique reste la méthode la plus fiable vu le manque de précision sur la détermination de l'amplitude de l'échelon de pression.

Le contrôle dynamique en utilisant des générateurs d'impulsions de pression ou la bombe manométriques restent les moyens les plus utilisés pour effectuer un contrôle dynamique des capteurs de pression balistique. Une étude qui a pour but la conception d'un générateur d'impulsions de pression quasi- δ a été présentée.

L'étude du comportement dynamique des capteurs de pression piézoélectriques requiert donc davantage d'efforts afin de développer une technique fiable qui permettrait d'étalonner dynamiquement un capteur de pression balistique. Des études récentes [14,15] ont montré que l'emploi de la barre de Hopkinson pour générer un signal de pression quasi- δ dans un fluide mis sous haute pression statique. Cette méthode serait peut être une voie prometteuse vers la mise au point d'un moyen d'étalonnage dynamique des capteurs de haute pression balistique.

Références

- [1] Kistler Instrumente AG, "Capteurs de pression", 2006.
- [2] J.L. Schweppe, L.C. Eichenberger, D.F. Muster, E.L. Michaels and G.F. Paskusz, "Methods for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers", NBS Monograph 67, December 12, 1963.
- [3] ASME, "A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers", ANSI B88.1-1972 (R1995), USA, 1995.
- [4] ISA, "A guide for the dynamic calibration of pressure transducers", ISA-37.1601-2002, 2002.
- [5] ISO, "Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie", 2^e édition, 1993.
- [6] V.E. Bean, "Dynamic pressure metrology", Metrologia, vol. 30, pp. 737-741, 1993.
- [7] C. Cater, "Calibration of Piezoelectric Sensors for Combustion Pressure Analysis ", Kistler Instrumente AG.
- [8] J.P. Damion, "Capteur de pression de référence pour l'étalonnage dynamique", 7^e Congrès International de Métrologie, Nîmes, France, 16-19 Octobre 1995.
- [9] A.A. Juhasz, C.D. Bullock and D.H. Newhall, "Calibration of ballistic pressure transducers", Measurement and control Magazine, 146, pp.123-127, April 1991.
- [10] W.S. Walton, "Dynamic Calibration of Piezoelectric Chamber Pressure Transducers", US Army Aberdeen Test Center.
- [11] G. Muhrer and J. Winkler, "Quality improvement in piezoelectric pressure measurements by applying advanced calibration methods", 4^e International AVL Symposium on Ballistic Measurement, Switzerland, September, 25-29, 1989.
- [12] J.P. Damion, "Means of dynamic calibration for pressure transducers", Metrologia, vol. 30, pp. 743-746, 1993.
- [13] M.S. Nawrocka, W. J. Bock, *Fellow, IEEE*, and W. Urbanczyk, "Dynamic High-Pressure Calibration of the Fiber-Optic Sensor Based on Birefringent Side-Hole Fibers", IEEE sensors journal, Vol.5, No.5, October 2005.
- [14] Y. Zhang, J. Zu, H.Y. Zang "The Dynamic Calibration Method of High-Pressure Transducer under High-Static Pressure", School of Information and Communication Engineering, China.
- [15] J. Zu, Anshi chen, Z. Zhang, D. Pei, " New concept dynamic testing and calibration techniques". Proceeding of MSC2006, L.A., USA.