

Caractérisation de l'impact d'un jet d'eau propulsé par une charge pyrotechnique sur une cible rigide

M. Arrigoni^a, S. Kerampran^a, J. Le Clanche^a, M. Monloubou^a,
M. Grenier^b

a. ENSTA Bretagne, IRDL, UMR CNRS6027, F-29200, France, michel.arrigoni@ensta-bretagne.fr

b. Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises

Résumé :

La protection des populations civiles devient une préoccupation grandissante. Une des menaces actuelles est l'utilisation d'explosifs dans les attaques terroristes dans des lieux publics tels que les aéroports ou les gares. Ces sites permettent d'y dissimuler des valises et colis dits suspects. Lorsqu'une telle menace est repérée, il convient de la neutraliser en faisant appel aux démineurs. Lors de leurs interventions, les démineurs sont amenés à utiliser un robot transportant un canon pyrotechnique propulsant une charge d'eau destinée à impacter le colis suspect pour le « disrupter ». Actuellement, ces canons sont fabriqués en très petites séries avec une technologie et des connaissances du siècle dernier et les fabricants français ont disparu du marché. De ce fait, il n'existe plus vraiment de méthodes permettant de mesurer la vitesse du jet d'eau et de la pression exercée sur la cible lors de l'impact. La présente étude suggère l'utilisation de capteurs de pression plats et minces de type polymère piézoélectrique PVDF (PolyVinylidene Fluoride) pour mesurer la pression exercée par le jet d'eau à l'impact sur une cible rigide. Le canon est monté sur un rail en laboratoire pour permettre une meilleure instrumentation avec la caméra rapide et le capteur. Les enregistrements obtenus montrent des ordres de grandeurs comparables à ceux déduits des simulations numériques et d'une approche analytique simplifiée. Cette méthode pourra servir de référence pour la caractérisation et la calibration des canons à eau dit « disrupteurs ».

Abstract :

The protection of civilian populations is becoming a growing concern. One of the current threats is the use of explosives in terrorist attacks in public places such as airports or railway stations. These sites are used to hide so-called suspicious suitcases and parcels. When such a threat is identified, it should be neutralized by Explosive Ordnance Disposal (EOD) squad. During their interventions, EOD are required to use a robot carrying a pyrotechnic gun propelling a charge of water intended to impact the suspect package in order to "disrupt it". Currently, these guns are manufactured in very small series with technology and knowledge from the last century and French manufacturers have disappeared from this so small market. As a result, there are no longer any real methods to measure the velocity of the water jet and the pressure exerted on the target at impact. This study suggests the use of flat and thin piezoelectric polymer PVDF (PolyVinylidene Fluoride) pressure sensors to measure the pressure exerted by the water jet during impact on a rigid target. The barrel is mounted on a rail in the laboratory to allow better instrumentation with the fast camera and pressure sensor. The records obtained show orders of magnitude comparable to those derived from numerical

simulations and a simplified analytical approach. This method can be used as a reference for the characterization and calibration of water cannons known as "disruptors".

Mots clefs : Explosif, impact, interaction fluide-structure, PVDF, pression dynamique, choc.

1 Introduction

Lors des interventions pour la neutralisation de colis suspects, les équipes de déminage utilisent un canon à eau aussi appelé « disrupteur ». Ce disrupteur est monté sur un robot qui transporte le canon quasiment au contact de l'objet suspect pour le désassembler à partir d'une mise à feu opérée à distance. Ce canon propulse alors une dose d'eau à l'aide d'une munition chargée en poudre balistique. L'artificier en charge de l'opération doit régler la charge d'eau, de poudre et la distance de tir en fonction de la nature du colis approximativement identifié. Ainsi, un tir d'eau bien paramétré peut traverser de part en part une bouteille de gaz ou un véhicule (fig. 1). Lors du tir, le robot subit une onde de souffle, de fortes accélérations et des impacts liés aux éclats générés lors de l'interaction eau-objet. Il arrive régulièrement que ces chargements engendrent des avaries ayant des coûts de maintenance considérables.

Cette technologie robotisée reste d'un certain coût d'autant plus que la concurrence se fait rare car les industriels délaissent ce marché de niche peu juteux mais néanmoins on ne peut plus nécessaire. En outre, il n'existe aucune norme pour accompagner les concepteurs et utilisateurs de disrupteur.

L'objet de ces travaux est l'évaluation d'une méthodologie de caractérisation de la vitesse du jet d'eau en sortie de canon et la mesure de pression à l'impact de l'eau sur la cible. Cette étude est une première approche pour permettre la définition d'essais plus précis. Pour cela, le disrupteur a été monté sur un rail en laboratoire face à une cible artificielle composée d'un assemblage d'une plaque d'acier sur un bloc de teflon® (PTFE) comportant un capteur de pression dynamique de type PVDF [1]. La scène est filmée à l'aide d'une caméra rapide pour en déduire la vitesse du jet d'eau à l'impact. Après une courte introduction servant d'entrée en matière, le paragraphe 2 présentera une approche analytique basée sur la théorie des polaires de choc pour déterminer les ordres de grandeur des pressions et des vitesses attendues. Le paragraphe 3 présentera le montage expérimental et les conditions de tir. Les résultats sont présentés et discutés dans le paragraphe 4, pour ensuite mener à une conclusion et énoncer des perspectives.



Figure 1 : Disrupteur ayant permis de neutraliser un colis suspect situé dans un véhicule.

2 Approche analytique

L'impact d'un jet d'eau sur un corps rigide peut se traiter analytiquement de plusieurs manières. Etant donné la charge en poudre annoncée par l'équipe de déminage (plusieurs grammes), des vitesses d'impact de plusieurs centaines de m/s sont attendues. De ce fait, il a été choisi de prendre en compte la compressibilité des milieux en présence et de considérer le problème 1D plan. Ces hypothèses légitiment l'utilisation de la technique des polaires de choc pour traiter les problèmes d'impacts [2]. Cette approche repose sur l'utilisation des relations de Rankine-Hugoniot (1) à (3) et des équations d'état sous choc (4) de chaque milieu pour construire la courbe caractéristique des états accessible à chaque matériau sous choc, appelée polaire de choc ou encore adiabatique dynamique, dans le plan pression-vitesse matérielle (fig.2a).

$$\rho_0.(D-u_0) = \rho_1.(D-u_1) \quad (1)$$

$$P_1-P_0 = \rho_0.D_{01}.(u_1-u_0) \quad (2)$$

$$E_1-E_0 = 1/2.(P_1+P_0).(v_0-v_1) \text{ avec } v_i=1/\rho_i \quad (3)$$

Où ρ , D , u , P , E sont respectivement la masse volumique, la vitesse du choc, la vitesse matérielle, la pression et l'énergie interne du milieu. Ces grandeurs sont indicées en fonction de l'état sous choc dans lequel se trouve le milieu. Il est pratique de suivre la succession de ces états en faisant appel à la construction d'un diagramme espace-temps (fig. 2b).

L'équation d'état sous choc s'exprime par une relation de fermeture (4) en plus de l'équation d'état de Mie-Grüneisen, non présentée ici, pour la prise en compte des états hors choc :

$$D=C_0+s.u \quad (4)$$

Où C_0 est la vitesse du son hydrodynamique (vitesse de choc à pression nulle) et s un coefficient empirique propre à chaque matériau [3]. La polaire de choc pour un matériau au repos s'obtient en utilisant la relation (4) dans la relation (3) et s'identifie à un polynôme du second degré passant par 0. La détermination d'un état sous choc consécutif à un impact, par l'utilisation des polaires de choc est détaillée dans de multiples ouvrages [2-5]. Les caractéristiques sous choc des matériaux en présence sont rappelées dans le tableau 1, issues de [3]. Dans l'exemple illustrée en figure 2, la détermination de l'état sous choc à l'impact de l'eau sur la couche d'acier donne lieu à un état sous choc noté 1 dont les pressions et vitesses matérielles sont identiques de part et d'autre de la surface de contact. Ainsi l'état 1 doit appartenir aux polaires de l'acier fixe et de l'eau en mouvement. Pour une vitesse d'impact de 275 m/s, justifiée au paragraphe 4, la pression générée dans l'acier atteint 560 MPa. L'onde de choc ainsi générée se propage dans l'acier pour atteindre l'interface acier/teflon où se trouve le capteur PVDF, ici négligé pour deux raisons : sa minceur et le fait qu'il soit quasiment de même nature que le teflon (polymère). L'état 2 ainsi engendré montre une pression de 120 MPa. C'est l'ordre de grandeur que devra mesurer le capteur de pression.

Matériau	ρ_0 (kg/m ³)	C_0 (m/s)	s
Eau	998	1647	1.921
Acier SS304	7896	4569	1.49
PTFE	2153	1.841	1.707

Tableau 1 : Caractéristiques sous choc des milieux considérés [3].

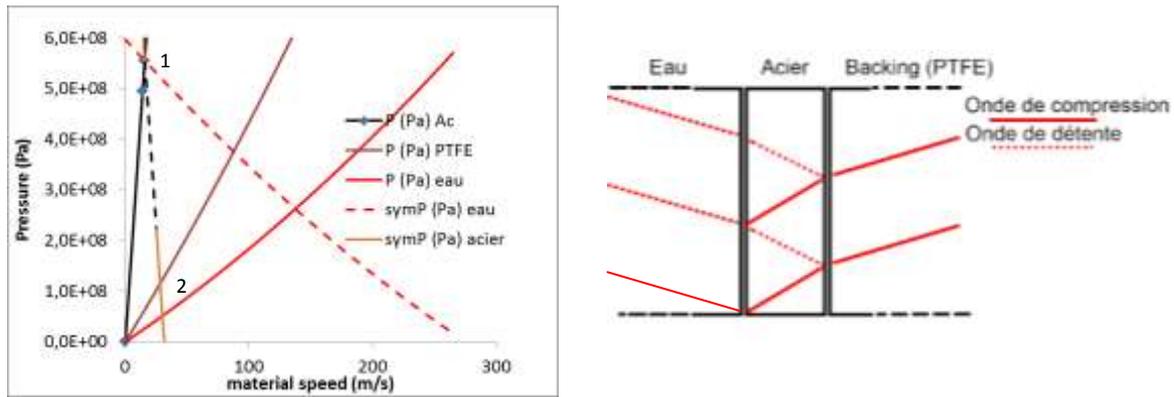


Figure 2 : a) diagramme des polaires de choc pour déterminer les états sous choc dans chaque couches de la cible. b) diagramme espace-temps pour suivre la chronologie de la propagation des ondes dans la cible.

3 Montage expérimental

3.1 Constitution de la cible

Le choix d'une cible en acier de 8 mm d'épaisseur a été retenu pour offrir une certaine rigidité à la pression du jet lors de l'impact. Cette rigidité permet le maintien du capteur de pression lors de la phase de propagation des ondes de choc. Un matériau polymérique suffisamment épais (60 mm) a été adossé à la plaque d'acier pour offrir un milieu de propagation suffisamment long pour éviter le retour des ondes réfléchies en face arrière de la cible. Le choix du matériau s'est arrêté sur le teflon, disponible et d'impédance mécanique et acoustique proche de celle du PVDF (PolyVyniliDene Fluoride), matériau constitutif du capteur de pression. Cette condition limite les réflexions parasites à l'interface PVDF/teflon.

Le capteur de pression PVDF est collé en « sandwich » avec de la colle cyanoacrylate entre la plaque d'acier et le teflon. Ce capteur d'épaisseur 25 μm et de surface active de 9 mm^2 a été conçu par la société AIFP^a détentrice du brevet relatif à sa préparation [6]. Le capteur se présente sous la forme d'une fine feuille de polymère transparent dont les faces comportent des pistes métalliques conductrices (fig. 3). La réponse piézoélectrique du PVDF a été étudiée [7] et est illustrée sur la figure 4. Elle montre une réponse quasi linéaire de 15.7 pC/N pour des pressions inférieures à 1 kBar et une plage de mesure pouvant aller à 350 kBar. Ce coefficient de calibration a été vérifié au tube à choc pour des basses pressions d'impact à l'ENSTA Bretagne [8]. La jauge est intégrée dans la chaîne d'acquisition en mode « voltage », c'est-à-dire que les électrodes sont reliées à la voie de l'oscilloscope en impédance de 1 MOhm. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 2.5 milliards d'échantillons par seconde (2.5 GS/s), autorisant ainsi l'enregistrement de phénomènes ultra rapides tels que le passage des ondes de choc. L'enregistrement est déclenché sur front montant ou descendant du signal délivré par le capteur PVDF. L'oscilloscope déclenche en cascade la caméra rapide, ce qui permet de synchroniser le signal de pression avec les images de la vidéo rapide. Cependant, le déclenchement de la caméra sera réglé en mode centré, ce qui permet d'avoir les images du jet d'eau avant l'impact.

La cible est bridée sur un rail fixe et lourd permettant d'ajuster la distance entre la bouche du canon et la cible. De plus, un soin particulier a été porté à l'alignement de la surface active du capteur avec la bouche du canon, de manière à ce que l'impact ait bien lieu en vis-à-vis du capteur.

^a AIFP : Advices In Ferroelectric Polymers, www.AIFP-Bauer.fr

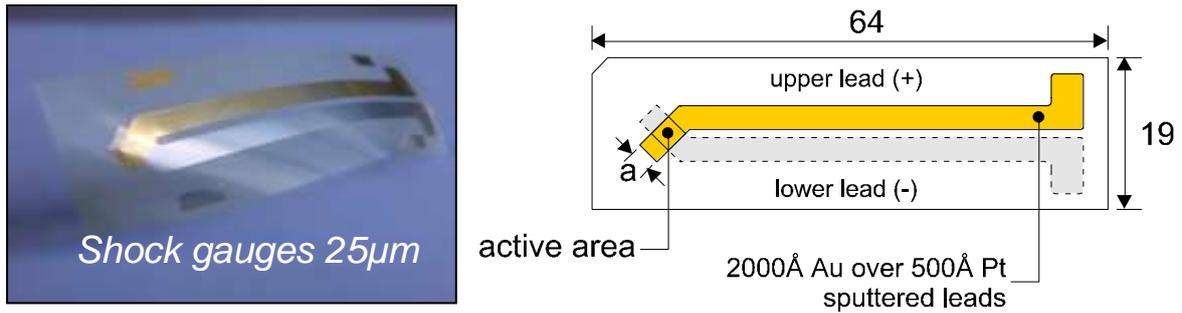


Figure 3 : a) jauge « Bauer » en PVDF, b) schéma et dimensions physiques.

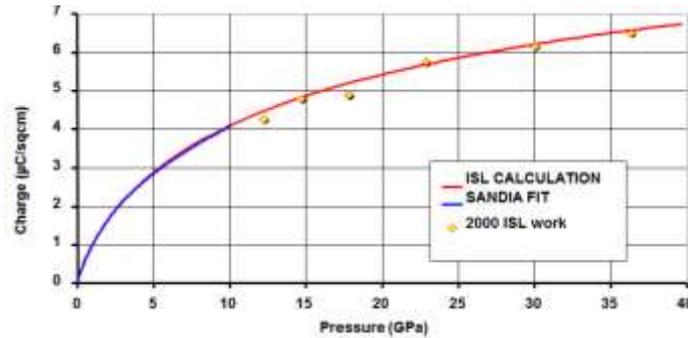


Figure 4 : Réponse piézoélectrique de la jauge PVDF « Bauer » [Bauer].

3.2 Le disrupteur

Le canon du disrupteur, modèle *NEUTREX* de calibre 20 mm, appartenant à la brigade de déminage de la sécurité civile de Brest, fabriqué par la société canadienne *Proparms*, a été désolidarisé du robot pour être bridé sur un rail fixe en laboratoire à l'ENSTA Bretagne (fig. 5).

Le canon à eau est rempli d'un équivalent de 100 mL d'eau, poussé par le déclenchement d'une cartouche de $\varnothing 20\text{mm}$ chargée avec 70 Grain^b de poudre balistique Vectran®. La charge de poudre étant considérable, l'amorçage est réalisé à distance à l'aide d'un allumeur électrique en l'absence de personnels dans la salle d'essai.



Figure 5 : a) disrupteur bridé sur le rail, face au porte cible (équerre), b) assemblage de la cible.

^b 1 Grain = 64.8 milligrammes

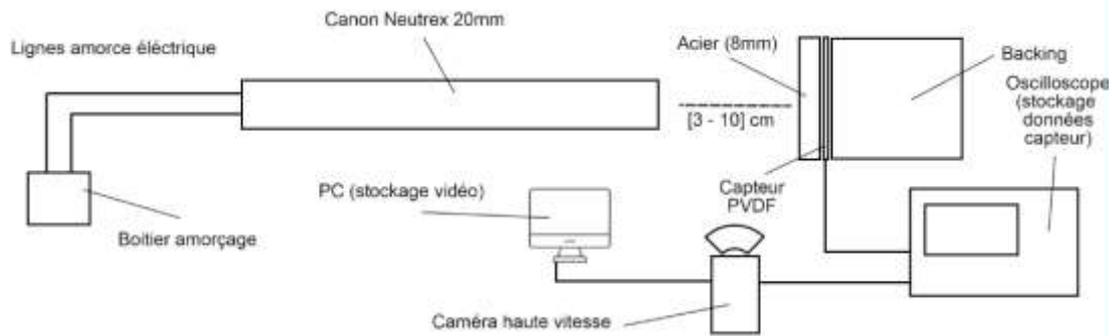


Figure 6 : Vue d'ensemble du montage expérimental.

Trois essais ont été réalisés avec des charges de 100 mL d'eau et de 70 Grain de poudre, présentant des distances de tir différentes, sur la même cible :

- 1 tir à une distance de 6 cm entre la bouche du canon et la cible.
- 2 tirs à distance de 10 cm entre la bouche du canon et la cible.

Une vue d'ensemble du montage expérimental est donnée sur la figure 6.

4 Résultats et discussion

4.1 Caméra rapide

A partir des images enregistrées par la camera rapide, à la cadence de 30 000 images/s, la vitesse instantanée de sortie du jet, au plus proche de la cible est calculée. La figure 7 montre des images espacées de $66.7 \mu\text{s}$

Toutes les cartouches ont été chargées à 70 Grain en poudre. Pour le tir à une distance de 6 cm, la vitesse déduite de l'analyse d'images est de $210 \pm 10 \text{ m/s}$. Pour le premier tir à une distance de 10 cm, la vitesse déduite atteint $275 \pm 15 \text{ m/s}$. Pour le deuxième tir à une distance de 10 cm, la vitesse déduite est de $215 \pm 10 \text{ m/s}$.

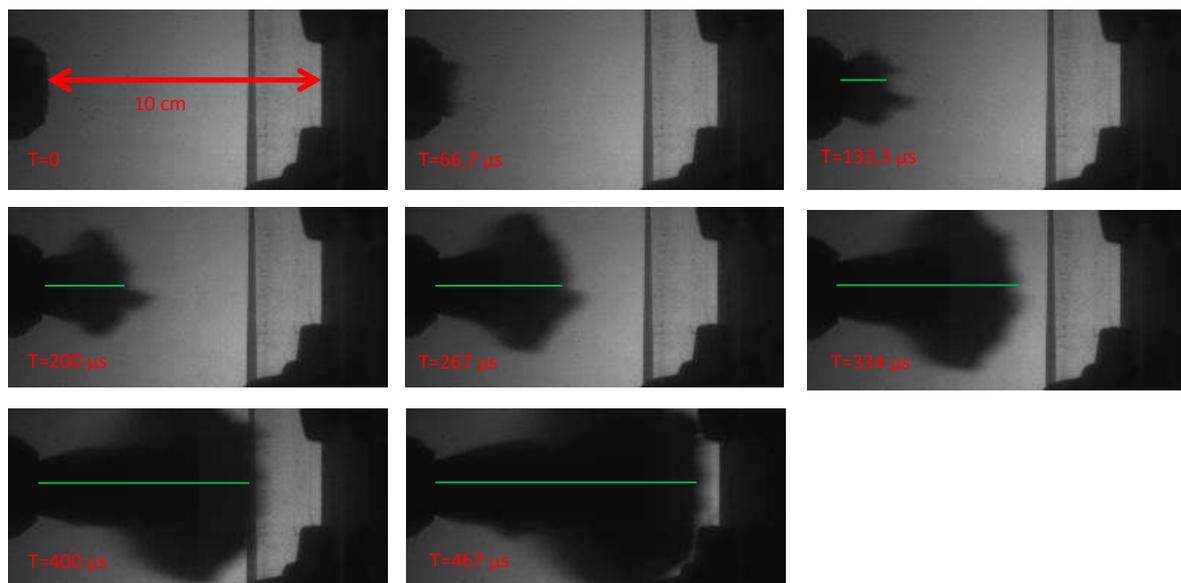


Figure 7 : Séquence d'images enregistrées par la camera rapide à l'instant du premier tir à 70 Grain pour une distance de 10 cm. $66.7 \mu\text{s}$ entre 2 images. Sur cette séquence, l'analyse d'images donne une vitesse instantanée du jet de $275 \text{ m/s} \pm 15$ au voisinage de la cible.



Figure 8 : Signaux bruts enregistrés par le capteur PVDF a) 1^{er} tir à 10 cm, b) 2^{ème} tir à 10 cm.

L'enregistrement de la pression pour le tir à 6 cm s'est déclenché trop tardivement et le signal n'a rien donné de pertinent. Les enregistrements de pression par le capteur PVDF pour les deux tirs à 10 cm sont donnés sur la figure 8. Les signaux enregistrés délivrent des pics de tension négatifs. Cela tiens au fait du branchement des électrodes lorsque le câble coaxial a été connecté au capteur PVDF. Pour ces expériences, il faudra donc admettre qu'une compression sur le capteur délivre une tension négative. Le premier tir à 10 cm génère une vitesse de jet de 275 m/s et un pic de tension d'environ -42 V alors que le deuxième tir à 10 cm donne une vitesse de 210 m/s avec un pic de tension d'environ -31 V. Une cohérence s'observe donc : plus la vitesse d'impact est élevée, plus la valeur absolue de la tension délivrée par le capteur PVDF est importante. En utilisant la relation (5) entre charge électrique $Q(t)$ et la tension $U(t)$ connaissant une valeur approximative de la capacité totale C_{tot} de la ligne d'acquisition, il est possible de déterminer l'évolution de la charge électrique en fonction du temps :

$$Q(t) = C_{tot}.U(t) \quad (5)$$

L'estimation de la capacité totale devient une donnée déterminante. Cette grandeur est le cumul de la capacité du capteur, des câbles, de la voie de l'oscilloscope. Les fabricants de câbles coaxiaux RG58/U annoncent une capacité de 102 pC/m. Le câble utilisé avait une longueur approximative de 3 m, d'où une capacité de 306 pC mais n'a pas été mesurée. La société AIFP annonce une capacité moyenne de 43 pC pour les capteurs PVDF de surface active de 9 mm². La capacité d'entrée sur la voie de l'oscilloscope est indiquée à 16 pC. La capacité totale C_{tot} retenu sera 365 pC, faisant abstraction d'autres éventuelles capacités parasites.

L'étude analytique menée dans le paragraphe 2 prédit une pression à mesurer à l'interface acier/PTFE qui est de l'ordre de 100 MPa (1 kBar), l'hypothèse du comportement linéaire sera adoptée, ce qui ramène la relation entre la charge et la pression à l'expression (6) :

$$P(t) = Q(t) / (K.S) = C_{tot}.U(t)/(K.S) = 2,59.U(t) \quad (6)$$

Avec $K = 15.7$ pC/N et S est la surface active du capteur PVDF, 9 mm² dans le cas présent.

Pour les pics de tension respectifs de -42 V et -31 V, les pressions maximales respectives atteignent 108 et 80 MPa. Les approches analytiques avec les polaires de choc présentées dans le paragraphe 2 donnent respectivement 120 et 83 MPa soit des écarts relatifs respectifs de -10 et -3.6 %. Cette méthode s'avère fournir une précision acceptable. Ainsi, toujours en faisant appel à la technique des polaires de choc présentée sur la figure 2, il est possible de remonter à la pression d'impact du jet d'eau sur la plaque d'acier. Pour des vitesses respectives de 275 et 210 m/s, les pressions à l'impact sur la plaque sont de 550 MPa et 400 MPa. Une vitesse d'impact de 263 m/s aurait donné une mesure de pression de 108 MPa soit une pression d'impact sur la plaque d'acier de 530 MPa. Une vitesse

d'impact de 205 m/s donnerait une pression mesurée de 80 MPa par le capteur PVDF, soit une pression d'impact de 391 MPa. Ces variations sont incluses dans les incertitudes de mesure de la vitesse d'impact du jet. Il est à noter que pour les masses de poudre utilisées lors des tirs, les pressions atteignent la limite supérieure de la plage d'utilisation du capteur PVDF dans son domaine linéaire. Il est également intéressant de signaler que pour les trois tirs, les vitesses observées fluctuent de 210 m/s à 275 m/s avec une précision de mesure de l'ordre de $\pm 5\%$ en fonction de la partie du jet considérée.

5 Conclusion

En conclusion des travaux présentés dans cet article, une réponse technique sur la faisabilité de mesurer la vitesse d'un jet d'eau en sortie de canon et de mesurer la pression induite par l'impact de ce jet sur une cible rigide a été donnée. Il est intéressant de souligner que ces résultats ont été obtenus avec un capteur PVDF d'un coût modéré qui permet, lorsque judicieusement placé dans un assemblage, de mesurer la pression résolue en temps. Des écarts relatifs raisonnables, inférieurs à 10%, ont été obtenus en comparant les valeurs mesurées avec des valeurs théoriques fournies par une approche analytique basée sur l'utilisation de polaires de choc. Les valeurs théoriques sont, dans les deux cas, majorantes. Ces travaux permettront d'évaluer les performances des disrupteurs et d'optimiser leur utilisation. Les méthodes développées fournissent également des données d'entrée relativement fiables pour des modélisations numériques qui pourront être effectuées dans un futur proche.

6 Remerciements

Les auteurs remercient Jean-Charles Dhyser de la sécurité civile de Brest pour avoir accepté la mise à disposition des moyens techniques et humains de la sécurité civile de Brest. Les auteurs remercient également Valentin Rault pour la réalisation de la cible.

Références

- [1] Lee, L., Graham, R. A., Bauer, F., & Reed, R. P. (1988). Standardized Bauer PVDF piezoelectric polymer shock gauge. *Le Journal de Physique Colloques*, 49(C3), C3-651.
- [2] Carlucci, D. E., & Jacobson, S. S. (2018). *Ballistics: theory and design of guns and ammunition*. CRC Press.
- [3] J. R. Asay, M. Shahinpoor, "High Pressure Shock Compression of Solids vol. 1", Editions Springer-Verlag, (1992).
- [4] Impact Dynamics, J. A. Zukas, Edition John Wiley and sons, 1982.
- [5] P. Bailly, Chocs et impacts sur les matériaux et les structures. Lavoisier edition, 2013
- [6] F. Bauer, brevet 822102S, US Patent 4611260 et 4684337
- [7] F. Bauer, (2000). PVDF shock sensors: Applications to polar materials and high explosives. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47(6), 1448-1454.
- [8] Arrigoni, M., Bauer, F., Kerampran, S., Le Clanche, J., & Monloubou, M. (2018). Development of a PVDF Pressure Gauge for Blast Loading Measurement. *Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety*, 2(1), 2.