

# Mesure de la pression d'impact générée par un projectile mou (balle en caoutchouc)

M. Arrigoni<sup>a</sup>, R. Mircioaga<sup>b</sup>, J.-Ch. Walrick<sup>c</sup>, G. Jago<sup>d</sup>,

a. ENSTA Bretagne, IRDL, UMR CNRS6027, F-29200, France, [michel.arrigoni@ensta-bretagne.fr](mailto:michel.arrigoni@ensta-bretagne.fr)

b. Military Technical Academy

c. ESTACA

d. HUTCHINSON, centre de recherche,

## Résumé :

*La balistique terminale a fait l'objet de nombreuses études approfondies notamment à propos des projectiles métalliques (balles, fragments) sur des cibles solides. Elle symbolise le combat entre l'épée et le bouclier. Cependant, on accorde de plus en plus d'attention aux cibles et aux projectiles mous. D'une part, la médecine militaire s'est concentrée sur les blessures et les effets mortels des projectiles métalliques sur les cibles molles. D'autre part, les forces anti-émeutes ont exprimé le besoin de projectiles non létaux, mous. D'un point de vue mécanique, les projectiles non létaux en élastomères ressemblent à un impact d'oiseau sur une plaque : ils peuvent être considérés comme des corps mous frappant des surfaces semi rigides. Ce problème se pose encore lorsque des modèles prédictifs sont nécessaires. La prédiction du comportement mécanique des corps mous à haute vitesse de déformation reste de nos jours un défi dans la construction mécanique. C'est pourquoi, afin d'évaluer les effets mécaniques lors d'impacts mou, des expériences ont été menées à l'ENSTA Bretagne, à l'aide d'un projectile en élastomère, lesté d'acier afin d'augmenter son énergie cinétique. Le projectile a été accéléré par un canon à gaz et projeté sur une cible rigide en acier, instrumentée par un polymère piézoélectrique en PolyVinylidèneFluorure (PVDF) pour mesurer la pression à l'impact. Le processus de l'impact a été enregistré avec une caméra rapide. Les résultats sont présentés et ont fait l'objet d'une modélisation par éléments fins en schéma explicite. Ils montrent certains progrès dans la pratique de la modélisation et de l'expérimentation de l'impact mou.*

## Abstract :

Impact engineering has been extensively investigated through numerous studies about terminal ballistic of metallic projectiles (bullets, fragments) on solid targets. It iconizes the fight between the sword and the shield. However, more and more attention is given to soft targets and soft projectiles. On the one hand, military medicine has been focused on the wounds and lethal effects of metallic projectiles on soft targets. On the other hand, anti-riot forces have expressed the need for non-lethal projectiles. Under mechanical considerations, non-lethal projectiles made of elastomers are similar to a bird strike on a plate: they can be considered as soft bodies impacting semi rigid surfaces. This problem still meets some issues when predictive models are required. The prediction of the mechanical behavior of soft bodies at high strain rate remains indeed a challenge in mechanical engineering. Therefore, in order to evaluate the mechanical effects during soft impacts, experiments have been carried out at ENSTA Bretagne, using a soft-nosed kinetic impact projectile, ballasted with steel in order to increase its kinetic energy. The projectile was accelerated by a gas gun and thrown

onto a rigid steel target instrumented by a piezoelectric polymer made of PolyVyniliDinediFluoride (PVDF) to measure the impact pressure. The impact process was recorded with a rapid camera. Results are presented and have been the object of a fine element modelling in explicit scheme. They show some advances in the practice of soft impact modelling and experiments.

**Mots clefs : Impact, PVDF, pression dynamique, choc.**

## 1 Introduction

Les munitions à létalité réduite de type balle en caoutchouc sont utilisées par les forces de l'ordre lors d'interventions dans les manifestations qui dégénèrent en trouble de l'ordre public (fig. 1). L'usage de ces projectiles est régulièrement remis en cause du fait des blessures occasionnées sur les manifestants. Jusqu'à très récemment, aucune norme n'encadrait la définition de ces projectiles. L'OTAN vient de publier un STANAG AEP 99 [1] principalement issu des travaux de Bir [2] et Nsiampa [3]. La norme porte sur les blessures thoraciques et intègre le critère lésionnel (VC)<sub>max</sub> (maximum du produit de C la compression à l'impact par la vitesse du point de contact V). La zone d'impact définie comme critique est « le centre du sternum, lequel est directement antérieur à la 8<sup>ème</sup> vertèbre thoracique ». La norme ne couvre pas les cas de multi impact et reste optimisée pour des projectiles rigides de diamètre 37 mm dont la vitesse est comprise entre 20 et 60 m/s. Enfin, il est à noter que ce document n'a pas été ratifié par la France dans sa version actuelle car elle émet principalement 4 réserves :

- Le critère (VC)<sub>max</sub> n'a pas été démontré pertinent pour les projectiles déformables et pour des vitesses supérieures à 60 m/s.
- S'il y a lieu, évaluer le risque de blessures induit par un projectile de 40 mm à pointe en mousse et par un projectile de calibre 12.
- Le présent document ne couvre ni les risques sur l'ensemble du thorax, ni les dommages osseux.
- Le simulant 3RBID mentionné dans la norme doit faire ses preuves pour des vitesses d'impacts supérieures à 60 m/s.

Ces réserves pointent un besoin de recherche et de développement sur l'évaluation des effets induits par un impact de projectile non létale sur la zone thoracique, pour des vitesses supérieures à 60 m/s. Dans cette optique, la société ALSETEX souhaite caractériser la pression induite lors de l'impact d'un projectile à létalité réduite afin de limiter les dommages induits sur les personnes. Une campagne expérimentale de mesure de la pression d'impact a donc été menée à l'ENSTA Bretagne en septembre 2017. Trois technologies de projectiles mous de type « balle anti-émeute », de diamètre 40 mm, ont été lancés par un canon de Taylor sur une cible rigide, plane, en acier, instrumentée avec des capteurs de pression dynamique de type PVDF [4].

Le présent rapport détaille le dispositif expérimental mis en place avec la méthodologie utilisée pour la mesure de pression d'impact de balles en caoutchouc sur des cibles « rigides ». Les résultats après exploitation sont donnés dans le paragraphe 3, avec pour soucis de s'intéresser à leur reproductibilité, aux ordres de grandeur et aux différentes techniques de montage. Ces résultats sont discutés dans le chapitre 4, puis une conclusion avec entrevue de perspectives clôturent le rapport.

## 2 Montage expérimental

### 2.1 Le canon à gaz

Le montage expérimental repose sur l'utilisation du canon de Taylor de l'ENSTA Bretagne, de diamètre 50 mm pouvant délivrer une énergie cinétique d'impact allant jusqu'à 3 kJ. Ce dispositif à air

comprimé comporte un réservoir de gaz de 5L pouvant être rempli d'air comprimé dont la pression peut atteindre jusqu'à 20 Bar. L'ensemble projectile et sabot (décrit dans le paragraphe 2.2) est introduit par la bouche du canon et conduit au fond à l'aide d'une canne de bourrage. L'ordre de tir est commandé par une vanne à ouverture rapide.

La cible a été montée en sortie du fût et se constitue d'une plaque d'acier de 40 cm\*11,5 cm et de 1 cm d'épaisseur maintenue verticalement, offrant sa plus grande surface normale à l'axe du canon (fig. 3). Une bride anti-rebond est fixée en bouche de canon, protégeant son orifice d'éventuels éclats qui pourraient rebondir sur la cible. Une barrière constituée de deux photodiodes détecte le passage de l'ensemble projectile + sabot à la sortie du canon. Ces photodiodes sont espacées de 73 mm et sont reliées à un oscilloscope qui mesure la différence de temps entre les deux fronts de montée générés lors du passage du projectile. Ce dispositif permet d'obtenir la vitesse de l'ensemble projectile + sabot en sortie de canon. Les mesures de vitesses d'impact ont été corrélées avec des écarts inférieurs à 3 % par des enregistrements de vitesse matérielle par interférométrie laser doppler et par caméra rapide.

La phase de vol libre, de 30 cm environ, est raccourcie au maximum, permettant tout de même d'intégrer des parois de protection contre d'éventuels éclats ou rebonds vers l'expérimentateur. Cette partie a été modifiée pour l'expérience. Un carter à protection augmentée a été conçu.

La réponse de la jauge est très sensible à l'étirement dans son plan. Lorsque cela se produit, la jauge répond de manière non calibrée et le signal est difficilement exploitable. Pour observer l'influence des frottements de la tête sur la jauge à l'impact, deux configurations de positionnement de la jauge ont été proposées : 1- la jauge est directement collée sur le point d'impact (fig. 3, fig. 4a), 2- la jauge est prise en sandwich entre la cible d'acier impactée et le support d'acier vertical qui sert à arrêter les projectiles (fig.4b).

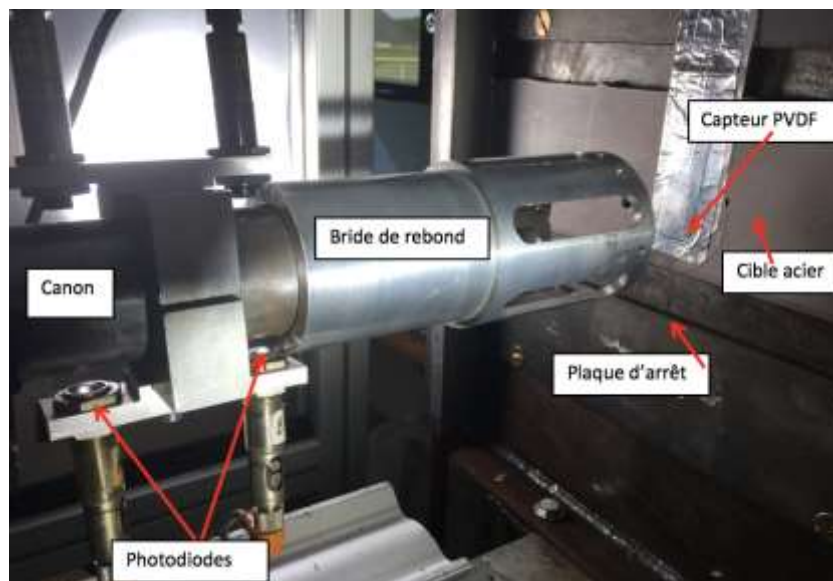


Figure 3: Montage expérimental d'impact sur cible « dure ».

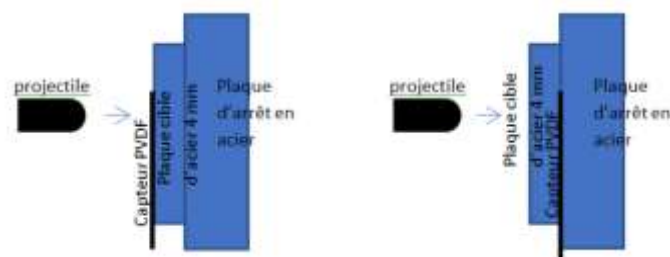


Figure 4 : Capteur PVDF a) en mesure direct à l'impact, b) en sandwich entre deux plaques d'acier.

## 2.2 Ensemble projectile + sabot

La balle en caoutchouc de 40 mm fournie par ALSETEX, est montée sur un sabot. Pour les essais préliminaires, un sabot en acétal (POMC) de diamètre intérieur de 35.5 mm et de diamètre extérieur de 49,8 mm (fig. 5) a été utilisé. La masse sabot + projectile EPDM s'élève à 67g. Cette configuration a été utilisée pour réaliser les essais préliminaires de reproductibilité et de montage du capteur PVDF. Elle offre l'avantage de pouvoir réutiliser les sabots. Pour les essais sur les têtes Alsetex, l'ensemble Mousse PU + Sabot + projectile, de masse totale 72 g a été utilisé.



Figure 5: Gauche : sabot + projectile avec mousse au diamètre de 49.8 mm, masse totale 72 g environ.  
Droite : Sabot en POMC + projectile, masse totale 67 g environ.

## 2.3 La jauge PVDF

La jauge PVDF (fig. 6) est montée en sandwich dans un assemblage comportant un revêtement d'aluminium destiné à offrir un blindage contre les parasites électromagnétiques. Cette bande d'aluminium est reliée à la terre.

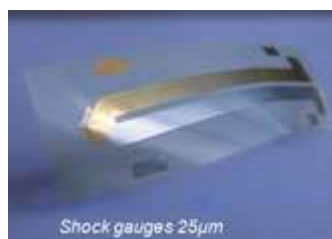


Figure 6: Jauge PVDF nue, de surface active 9 mm<sup>2</sup> et d'épaisseur 25 µm.

Une bande adhésive double face permet le positionnement et le maintien en position de la jauge blindée face au canon. La partie active est repérée lors de l'assemblage. La jauge est collée sur une plaque d'acier (fig. 3) de telle sorte à ce que la partie active de celle-ci (de 9mm<sup>2</sup>), soit centrée par rapport à la bouche du canon, cette étape est d'importance cruciale pour la validité des résultats.

La jauge PVDF est connectée à une chaîne d'acquisition comportant un oscilloscope Tektronix 350 MHz de bande passante. Ce capteur peut être électriquement monté de différentes façons : en mode « courant », « tension » et « ampli de charge ». Un des intérêts de cette étude est d'évaluer la réponse de la jauge pour chacune de ces configurations.

Pour le mode « tension », chaque électrode est connectée via une sonde de tension 10 MOhm à une voie de l'oscilloscope (mesure différentielle) en haute impédance (1MOhm). La fréquence d'échantillonnage est de 25 à 100 MS/s selon les configurations, l'échelle de temps de 400  $\mu$ s/div et l'échelle verticale de 2V/div avec une résolution de 8 bits.

Pour le mode « courant », les électrodes sont connectées sur les entrées 50 Ohm avec un câble BNC de type RG174. La fréquence d'acquisition est de 50 MS/s, l'échelle de temps de 200  $\mu$ s/div et l'échelle verticale de 100 mV/div.

Pour le mode « ampli de charge », un coefficient piézoélectrique de 15.7 pC/N est entré dans l'amplificateur de charge [5]. La sensibilité de l'amplificateur est de 1000N/V et la fréquence d'échantillonnage est de 25 MS/s. La résolution verticale est de 1 V/div et la base de temps de 400 $\mu$ s/div. La jauge est connectée sur une voie de l'amplificateur de charge, lui-même connecté à une voie en haute impédance (1MOhm) de l'oscilloscope.

La chaîne d'acquisition est déclenchée sur le front montant du signal délivré par le capteur PVDF situé en face avant ou par un signal de déclenche externe de la caméra. Les barrières de photodiodes déclenchent également une caméra rapide cadencée à 10000 images/s permettant d'apprécier la déformation du projectile lors de l'impact.

### 3 Résultats

La figure 7 montre les mesures adimensionnelles de pression en fonction du temps pour trois intégrations possibles du capteur PVDF dans la chaîne de mesure : « tension », « courant » et « amplificateur de charge ».

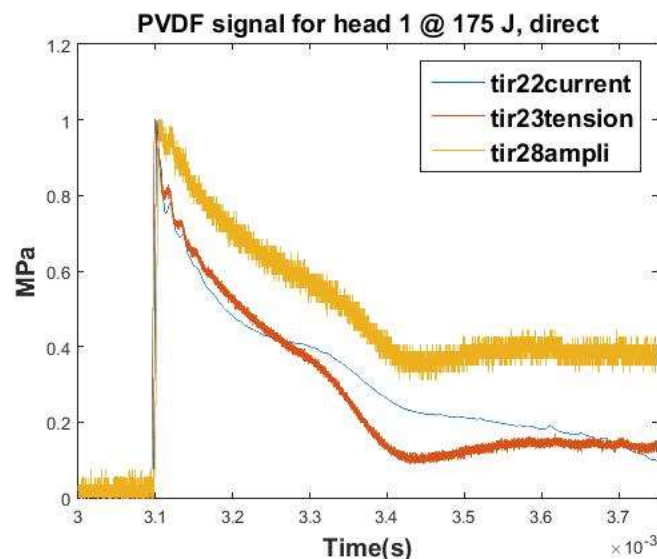


Figure 7 : comparaison entre les diverses méthodes de montage du capteur PVDF pour des tirs à vitesses d'impact voisines de 70 m/s en tir direct. Amplitudes adimensionnalisées par leur maxima.

De cette figure 7, nous pouvons dire que le capteur est capable de répondre de manière reproductible, même après avoir subi plusieurs tirs. L'implémentation du capteur avec amplificateur de charge semble augmenter le signal délivré par le capteur. La chronologie reste la même : un front de montée très raide marque l'instant de l'impact. Puis une première détente témoigne de l'étalement

du projectile qui continue d'appuyer sur la cible. Arrive ensuite les effets conjugués des détente latérales et de la partie arrière, la chute de pression s'accroît. Les légères oscillations après le premier pic sont identifiées comme étant des rebonds des ondes mécaniques dans la plaque sur laquelle est collé le capteur PVDF.

## 4 Conclusion

L'objectif de cette étude était d'obtenir les pressions résolues en temps, générées à l'impact, sur une surface rigide afin de déterminer quelle tête provoque le moins de traumatisme. Pour cela, une méthode expérimentale a été mise au point, impliquant l'utilisation d'un canon de Taylor, d'un capteur PVDF et de la caméra rapide. Les valeurs de pression de chargement du canon pour obtenir un impact équivalent de celui procuré par un lanceur à balle (70 m/s et 180 J) ont été déterminées. Les outils numériques de traitement ont été développés sous Matlab®. Le capteur PVDF a été utilisé d'abord en tir direct puis en sandwich entre deux plaques. Son branchement a été réalisé selon trois modes possibles : « tension », « courant » et « ampli de charge ». En tir direct, les trois modes ont donné la même information temporelle, avec des divergences prononcées quant à la mesure de la pression maximale. Le montage en amplificateur de charge donnait les résultats les plus proches de l'approche théorique effectuée avec du caoutchouc comme élastomère. Ces différences sont imputées en partie à l'étirement du capteur lors de l'étalement de la tête en élastomère, à l'impact sur la surface rigide.

## 5 Remerciements

Les auteurs remercient Brice Pommier, élève ingénieur alternant chez Hutchinson et Antoine Le Gac élève alternant chez Alsetex pour leurs participations respectives aux expériences.

## Références

- [1] OTAN, "Norme AEP-99 ÉVALUATION DU RISQUE DE BLESSURES THORACIQUES INDUIT PAR LES PROJECTILES NON LÉTAUX », Edition A, version 1, FÉVRIER 2017
- [2] C. Bir, « The evaluation of blunt ballistic impacts of thorax », thèse de doctorat, Wayne State University, 2000.
- [3] N. Nsiampa, C. Robbe et A. Papy, « Numerical investigation of impact of non lethal kinetic projectiles onto human thorax », in 6th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2011 proceedings, 2011.
- [4] F. Bauer, "PVDF Shock Sensors: Applications to polar Materials and High Explosives", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 47, pp. 1448-1458, 2000.
- [5] Bauer, F. (1995). Properties of ferroelectric polymers under high pressure and shock loading. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 105(1), 212-216.