

Décélération de projectiles par une mousse liquide

J. Le Clanche^a, M. Monloubou^a, S. Kerampran^a, A. Fougne^a, V. Pouliquen^a

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

Résumé :

La détonation d'engins explosifs improvisés (EEI) peut générer des périmètres de létalité conséquents. Afin de réduire ces zones à risques, une stratégie consiste à surmonter l'engin explosif d'un volume de mousse liquide. En dépit d'effets atténuateurs certains et d'une apparente simplicité de mise en œuvre, les mécanismes de dissipation d'une onde de souffle et la décélération d'un projectile par une mousse liquide sont encore mal compris.

Dans le but d'évaluer le ralentissement d'un projectile par une mousse liquide, des sphères en néodyme de diamètre égal à 1 cm sont propulsées grâce à un canon de Taylor et peuvent atteindre des vitesses de l'ordre de 200 m/s. Les fragments évoluent ensuite dans une conduite en pmma (50cm de long et section carrée de 8cm de côté) remplie de mousse liquide. Des bobines de 15cm de diamètre sont réparties tous les 10cm, le long de cette conduite. Par induction magnétique, une tension fonction de la vitesse du projectile est mesurée aux bornes des bobines. Ce dispositif permet ainsi d'évaluer la vitesse du projectile, malgré l'opacité de la mousse.

Deux campagnes expérimentales sont présentées. Premièrement, des tirs sont effectués sans mousse. Le suivi du projectile avec une caméra rapide permet de statuer sur la pertinence des signaux obtenus aux bornes des bobines puis d'évaluer la précision et la robustesse de ce dispositif expérimental. Dans un second temps, la conduite est remplie avec une mousse liquide dont les propriétés physiques sont maîtrisées. La vitesse du projectile est mesurée en amont et en aval de la conduite par une caméra rapide. Les bobines mesurent la vitesse du projectile dans le volume de mousse. La décélération du projectile est ainsi évaluée en fonction de la fraction liquide de la mousse.

Abstract :

The detonation of improvised explosive devices (IEDs) generates significant lethality perimeters. In order to reduce these risk areas, the explosive device is isolate with a volume of aqueous foam. Despite attenuating effects and apparent simplicity of use, the mechanisms for dissipating a blast wave and the deceleration of a projectile by aqueous foam are still poorly understood.

In order to exhibit the deceleration of a projectile by aqueous foam, neodymium spheres 1 cm wide are propelled by a Taylor gun and can reach 200 m/s. Then, the fragments evolve in a PMMA pipe (50cm long and 8cm square section) filled with aqueous foam. Round coils, 15cm wide are distributed every 10cm along the pipe. Using magnetic induction, a voltage function of the velocity of the projectile is measured at the coil terminals. Thereby, this device provides the velocity of the projectile, despite the opacity of the medium.

Two test programs are presented. The first one does not requires aqueous foam. The projectile is tracked using a high speed camera. Then the location of the projectile is correlated with signals

obtained at the coil terminals in order to evaluate the precision and robustness of this experimental device. For the second test program, the pipe is filled with liquid foam whose physical properties are controlled. The velocity of the projectile is measured upstream and downstream of the pipe with high speed camera. The coils measure the velocity of the projectile in the volume of foam. Thus, the deceleration of the projectile is evaluated according to the liquid fraction of the foam.

Mots clefs : Mousse liquide, Projectile, Induction magnétique,

1 Introduction (16 gras)

La détonation d'un engin explosif provoque notamment la propagation d'onde de souffle et la projection de fragments sur des distances importantes. Grâce à leur capacité à dissiper de l'énergie, des mousses liquides peuvent être employées pour confiner les effets de l'onde de souffle et ralentir les fragments. Les mécanismes et propriétés d'atténuation d'onde de souffle par des mousses liquides ont été largement étudiées à partir des années 1970 [1], jusqu'à des contributions plus récentes [2, 3, 4, 5]. En revanche, les études portant sur l'évolution de projectiles dans de tels milieux sont rares [4, 6]. Pour répondre à cette question, la propulsion du projectile doit être maîtrisée et la mesure de la trajectoire d'un projectile évoluant dans la mousse liquide doit être non-intrusive, tout en s'affranchissant de l'opacité de la mousse.

Une orientation expérimentale simple et non-intrusive peut être l'emploi de barrières magnétiques de vitesse [7]. Le mouvement d'un projectile magnétique, propulsé grâce à un canon de Taylor à travers une bobine, induit une tension aux bornes de cette dernière. Cette tension est directement fonction de la vitesse du projectile.

Cette étude présente le développement d'une barrière magnétique de vitesses et son application à la mesure de décélération de projectile évoluant dans une mousse liquide. A partir de considérations théoriques développées en partie 2, le banc d'essais et les méthodes expérimentales seront présentés en partie 3. Les résultats présentés en partie 4 fourniront des éléments sur les performances de cette approche et donneront une première estimation de la décélération d'un projectile magnétique par une mousse aqueuse.

2 Théorie

Considérons un projectile magnétique de moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ (Am^2), animé d'une vitesse v (m/s), ayant une trajectoire suivant l'axe de symétrie d'une bobine de rayon R et constituée de N spires (fig. 1). L'évolution du projectile provoque des variations du champ magnétique au sein de la bobine et l'apparition par induction d'une force électromotrice $e(V)$ dont l'expression générale au cours du temps est :

$$e(t) = -\frac{3}{2} \mu_0 N R^2 \vec{\mathcal{M}} \cdot \vec{e}_x \frac{(x_b - \int v dt) v}{(R^2 + (x_b - \int v dt)^2)^{5/2}} \quad (1)$$

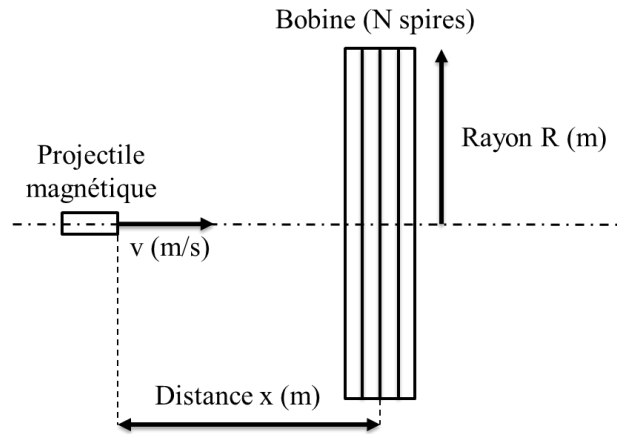


Figure 1 : Configuration théorique

Si le projectile est animé d'une vitesse constante et d'un moment magnétique colinéaire à sa trajectoire, alors la position du projectile au cours du temps s'écrit $x(t) = \int v dt$ et l'expression (1) devient :

$$e(t) = -\frac{3}{2} \mu_0 N R^2 \mathcal{M} \frac{(x_b - x(t)) \cdot v}{(R^2 + (x_b - x(t))^2)^{5/2}} \quad (2)$$

L'expression de la tension mesurée $e(t)$ présente des extrema pour $t = \pm \frac{R}{2v}$ (fig. 2). En d'autres termes, la tension mesurée présente des extrema pour $x = \pm \frac{R}{2}$. De plus l'expression (2) s'annule quand le projectile est au centre de la bobine. En outre, la détermination de ces points caractéristiques donne accès à la position et à la vitesse du projectile traversant la bobine.

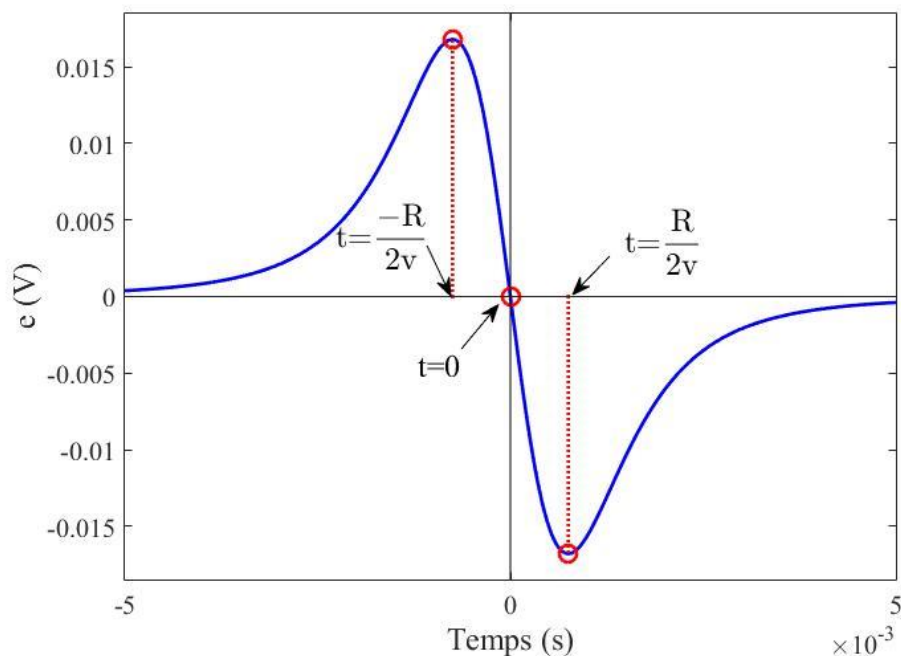


Figure 2 : Profil théorique de tension induite par un projectile magnétique ($\mathcal{M} = 0,7 \text{Am}^2$) de vitesse $v = 100 \text{ m/s}$, aux bornes d'une bobine ($N = 10, R = 5 \cdot 10^{-2} \text{m}$).

3 Méthodes expérimentales

3.1 Moyens d'essais

Les projectiles utilisés sont des aimants sphériques en néodyme de 1cm de diamètre ayant un moment magnétique égal à $0,7Am^2$.

Le canon de Taylor est en acier. Il mesure 3m de long et à un diamètre intérieur de 6cm. Le réservoir d'air comprimé peut atteindre 20 bars et le tir se fait à l'aide d'une électrovanne. Les projectiles sont montés sur des sabots cylindriques d'un diamètre légèrement inférieur au diamètre du canon et insérés en fond de tube. Lors du tir, une cloche vissée à la bouche du canon permet de stopper le sabot pour n'éjecter que le projectile. Les vitesses atteintes par ce dispositif peuvent dépasser les 200m/s.

Une fois éjecté, le projectile traverse une conduite droite en plexiglass de section carrée de 8cm de côté, longue de 50cm. Trois bobines circulaires de 10 spires de cuivre de 15cm de diamètre chacune constituent autant de barrières magnétiques qui sont traversées par le projectile. Ces barrières sont disposées le long de la conduite tous les $d=10cm$. La première bobine se situe à une distance $L=40cm$ de la bouche du canon. Cette conduite peut être remplie avec de la mousse. L'évolution du projectile à travers ce dispositif est filmée en caméra rapide

La solution moussante employée pour ces essais est composée de Dodécyl Sulfate de Sodium (SDS) à 7g/l et de 10% en volume de glycérol. Elle est ensuite complétée par de l'eau déminéralisée. Cette solution constitue la phase liquide de la mousse. La phase gazeuse est de l'air, injectée à la solution moussante au par le biais d'une pompe doseuse. La fraction liquide de la mousse est régit par les débits imposés par la pompe. En sortie de la pompe, le mélange air+liquide traverse un mélangeur statique. Cet élément détermine la distribution de la taille de bulles dans la mousse. Par ailleurs, l'évolution temporelle de la distribution de tailles de bulles est maitrisée [3].

3.2 Acquisition des données

L'oscilloscope n°1 collecte les tensions de deux photodiodes P1 et P2, espacées de 7.3cm et placées à la bouche du canon. L'acquisition se déclenche sur la photodiode la plus proche (P2) de la bouche du canon. L'écart temporel entre les deux signaux donne accès à la vitesse du projectile. Le signal de la photodiode P2 déclenche également l'enregistrement des tensions aux bornes des trois bobines B1 à B3 sur l'oscilloscope n°2. Enfin, la sortie trigger-out de l'oscilloscope n°2 synchronise le déclenchement de la caméra rapide avec l'acquisition des tensions aux bornes des bobines (Fig. 3).

L'oscilloscope n°1 acquière les tensions des photodiodes en impédance $1M\Omega$. Connaissant la distance entre les deux photodiodes, le délai entre les créneaux de tension permet de remonter à la vitesse du système sabot+projectile juste avant l'éjection du projectile.

L'oscilloscope n°2 acquière les tensions aux bornes des trois bobines en impédance de 50Ω . La détermination des points caractéristiques définis dans la partie 2 requiert l'utilisation d'un filtre. Les phénomènes physiques étant « lents » par rapport au bruit des signaux, une moyenne glissante centrée est appliqué aux signaux bruts. La détection des points caractéristiques s'en trouve facilitée.

La caméra rapide étant le juge de paix de cette étude, un soin particulier est apporté au traitement des vidéos. La caméra enregistre 90000 images par seconde avec une résolution de 1024×128 pixels et un temps d'obturation de $1/2700000$ s. La longueur du champ caméra nécessite de prendre en compte les effets de distorsion d'image liés notamment à l'objectif employé. Cette correction effectuée, un suivi du projectile donne l'évolution de la vitesse du projectile au cours du temps.

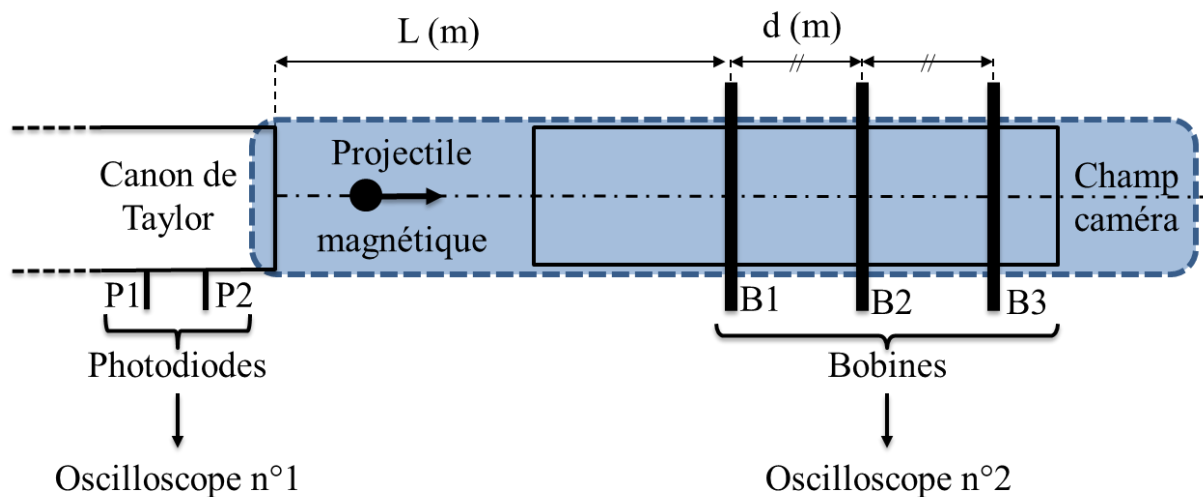


Figure 3 : Schéma de la configuration expérimentale

4 Résultats et discussion

4.1 Tirs sans mousse

La première campagne d'essais a pour objectif d'évaluer la fiabilité des signaux collectés aux bornes des bobines. Huit tirs sont effectués et les signaux sont confrontés aux mesures de vitesses évaluées avec la caméra rapide.

L'évolution du projectile est estimée par traitement d'images. Le champ utile est présenté sur la figure 4.a. Les variations temporelles de luminosité sont mises en évidence en soustrayant la première image à toutes les autres. L'ensemble des images est rassemblé dans un diagramme x-t et l'application d'un seuillage donne accès à la trajectoire du projectile au cours du temps (fig.4.b). Ce traitement d'images montre que la trajectoire du projectile est rectiligne uniforme au cours du temps. La vitesse calculée pour chaque tir sert de référence et l'incertitude de cette méthode est évaluée à $\pm 5\%$.

A partir du modèle présenté en partie 2, les signaux relevés aux bornes des bobines donnent accès à la vitesse locale du projectile au cours du temps. Chaque bobine fournit deux vitesses de projectile, à $x = \pm \frac{R}{2}$. Les trois bobines fournissent donc six valeurs de vitesses, permettant de calculer une incertitude expérimentale propre à ces trois bobines. Pour les huit tirs, cette l'incertitude expérimentale reste inférieure à 8%.

Enfin, les vitesses déduites du traitement des signaux sont comparées aux vitesses calculées par analyse d'images. L'écart entre ces deux méthodes est inférieur à 10% (Tab.1). Ce résultat permet de conclure quant à la pertinence du dispositif expérimental et sa capacité à évaluer la vitesse d'un projectile.

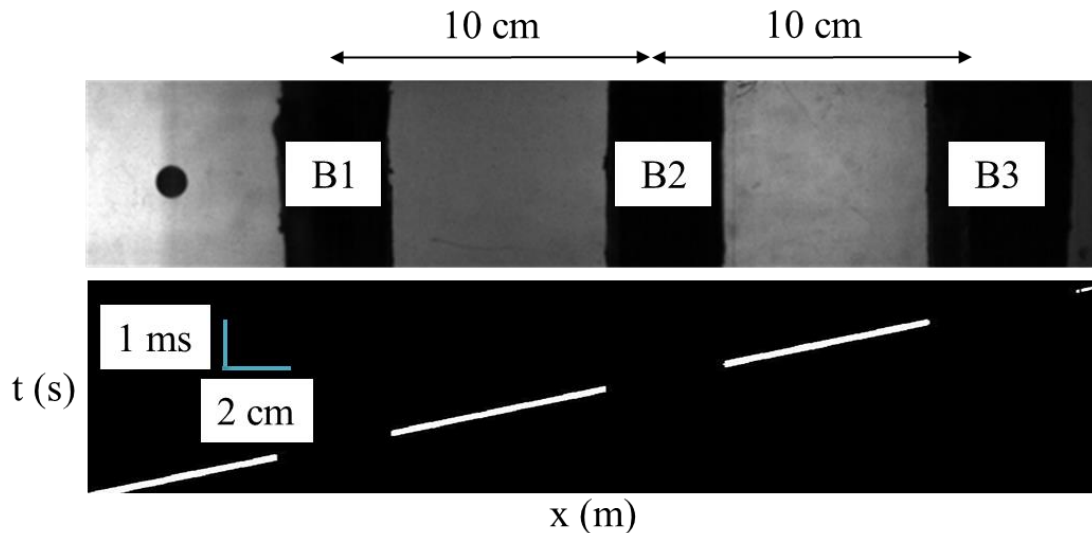


Figure 4 : (a) Champ caméra utilisé pour le traitement d'images. (b) Diagramme x-t issu du traitement d'images

Tir n°	Vitesse analyse d'images (m/s)	Vitesse traitement des signaux (m/s)	Ecart relatif (%)
1	106,82	99,84	6,5
2	108,52	101,50	6,4
3	114,39	103,97	9,1
4	147,60	135,05	8,5
5	141,00	131,73	6,6
6	145,14	132,41	8,8
7	107,81	105,15	2,5
8	104,93	105,76	0,8

Tableau 1 : Vitesse du projectile calculée par analyse d'images, par traitement des signaux des bobines et comparaison des méthodes.

4.2 Tirs avec mousse

La seconde campagne d'essais présente les résultats de cinq tirs effectués avec la veine d'essais remplie de mousse. La trajectoire et la décélération du projectile magnétique sont évaluées pour deux fractions liquides différentes (2,7% et 7,5%).

La décélération du projectile est évaluée par traitement d'images. Le champ caméra est suffisamment important pour pouvoir évaluer la vitesse du projectile en amont et en aval de la veine. Ces résultats, rassemblés dans le tableau 2, mettent en évidence le rôle de la fraction liquide dans la décélération plus importante du projectile. De plus, ce résultat est en accord avec la littérature [4].

Les vitesses déduites des signaux des bobines présentent une incertitude de l'ordre de 10%. Cette incertitude laisse entrevoir une décélération du projectile. En revanche, la précision n'est pas suffisante pour évaluer finement la décélération du projectile traversant le bloc de mousse. A titre d'exemple, le tir n°13 est présenté en figure 5.

Tir n°	Fraction liquide (%)	Vitesse amont, analyse d'images (m/s)	Vitesse aval, analyse d'images (m/s)	Atténuation (%)
9	2,9	104,1	93,6	10,1
10	2,7	102,3	91,8	10,2
11	2,5	96,2	88,1	8,5
12	7	97,3	80,6	17,2
13	8,1	99,3	81,6	17,8

Tableau 2 : Vitesse du projectile calculé par analyse d'images

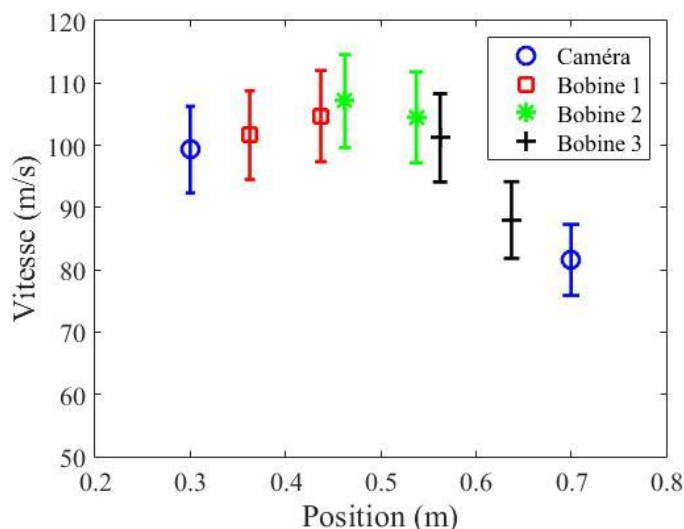


Figure 5 : Evolution de la vitesse du projectile de long de la veine d'essais. La mousse est présente entre 25 et 65 cm.

5 Conclusions et perspectives

Les travaux présentés dans cette étude ont posé les bases d'un dispositif expérimental visant à évaluer la décélération d'un projectile magnétique par une mousse aqueuse. Un premier modèle théorique, basé sur des considérations magnétiques, a fourni des éléments pour dimensionner ces barrières magnétiques. Une première campagne d'essais comparant ces signaux à l'évolution du projectile obtenue par analyse d'images suggèrent un écart entre les deux méthodes inférieur à 10%, pour des projectiles ayant des vitesses de l'ordre de 100 m/s. En revanche, même si cette première campagne d'essais a montré la faisabilité de cette technique, les performances de ce dispositif ne permettent pas pour l'instant d'évaluer finement la trajectoire d'un projectile magnétique évoluant dans un volume de mousse aqueuse. Ces verrous pourront être levés grâce à une meilleure conception des barrières magnétiques et une analyse poussée des signaux.

Références

- [1] J.S., Krasinski, A., Khosla, Shock wave propagation and attenuation in foams. 5th Australasian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics, Université de Canterbury, December 1974.
- [2] W. F., Hartman, B. A., Boughton, M. E., Larsen, Blast mitigation capabilities of aqueous foams, SANDIA Rept., SAND2006-0533, 2006
- [3] M. Monloubou, Interaction d'une onde de souffle avec une mousse liquide : atténuation et rupture. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 2015.
- [4] C. Bréda, Confinement à l'aide de mousse aqueuse des effets combinés de souffle et de projection de fragments générés par la détonation d'un engin explosif. Thèse de Doctorat, 2015.
- [5] F. Ballanger, Confinement de la détonation d'un objet explosif par mousse aqueuse sèche – Étude expérimentale et numérique. Thèse de Doctorat, 2016.
- [6] M. L., Adams, Experimental determination of drag coefficients in low-density polyurethane foam. No. UCRL-TR-220737. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 2006.
- [7] R. S. Hawke, A. R. Susioeff, D. W. Greenwood, Design considerations for a passive magnetic induction signal generator for sensing hypervelocity projectile passage. IEEE Transactions On Magnetics VOL. 31. NO. 1. January 1995, 725-728.