

Observation et identification des dommages et des fragments d'une protection double dureté face à une munition perforante de calibre 7,62mm.

Tristan CAMALET^{a, b, c}, Nadia BAHLOULI^b, Yaël DEMARTY^a, Christine ESPINOSA^c

a. Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis, 5 Rue du Général Cassagnou, BP 70034, 68330 Saint-Louis CEDEX – France ; Tristan.CAMALET@isl.eu

b. ICube UMR 7357 - Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie, 300 bd Sébastien Brant - CS 10413 - F-67412 Illkirch Cedex – France

c. Institut Clément Ader ICA, Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, IMT MINES ALBI, UTIII, INSA, CNRS, 3 Rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France

Mots clés : Impact balistique ; blindage double dureté ; alumine ; composite stratifié ; endommagement ; fragmentation

Résumé

Dans un contexte de réduction massive et d'augmentation des performances des structures pour la protection balistique, les céramiques ont pris une place importante. Nous nous intéressons ici à un système de protection double dureté composé d'une face avant en céramique et d'une couche support en composite appelée « backing ». Les mécanismes prépondérants d'arrêt d'une munition de petit calibre et des ondes de choc induites dans cette structure sont examinés en réalisant et analysant des essais balistiques. Les différents mécanismes de rupture et dommages provoqués par l'impact d'une munition perforante de calibre 7,62mm sont étudiés.

1. Introduction

Les céramiques ont pris une place importante dans les applications de protections balistiques depuis plusieurs décennies du fait de leur grande résistance en compression et leur faible densité [1,2]. Toujours à la recherche de solutions plus performantes, les protections balistiques personnelles s'intègrent dans cette dynamique d'amélioration tant en termes d'efficacité que de mobilité. Nous nous intéressons aux mécanismes d'arrêt par fragmentation d'une structure de protection balistique double dureté face à un projectile de type 7,62 x 51mm AP P80 (Armor Piercing). La structure à laquelle nous nous intéressons se compose d'une alumine en face avant et d'un composite stratifié en face arrière que l'on appellera "backing", les deux matériaux étant collés à l'aide d'une résine époxy.

Ce concept bicouche est particulièrement adapté à des menaces de type projectiles de faible calibre (éclats, balles perforantes de 7,62mm, 12,7 mm, ..)[3]. L'idée est d'associer un matériau dur en face avant à un matériau en face arrière susceptible d'emmagasiner de l'énergie et des déformations irréversibles. La plus grande difficulté dans la compréhension des performances des protections balistiques composées de céramique est due à la superposition de différents matériaux ayant des comportements dynamiques différents selon les régimes de vitesses de déformation, et des capacités à dissiper l'énergie initiale. Dans un blindage double dureté (BDD) les différents composants ont chacun un rôle propre et se complètent pour obtenir un pouvoir d'arrêt supérieur comparativement à un blindage monocouche de même dimension ou de même masse.

Grâce à son comportement fragile, la couche de céramique permet de fracturer et d'éroder le projectile [4,5,6] diminuant ainsi fortement son pouvoir perforant. Cette fragilité facilite en effet la nucléation, la propagation et la coalescence des microfissures et peut conduire à un matériau fortement endommagé et fragmenté après impact. L'épaisseur de la couche de céramique dans un blindage double dureté est un paramètre primordial des performances [3]. En revanche, la fragmentation elle-même consomme peu d'énergie et ne confère pas à la céramique endommagée un comportement amortissant nécessaire à l'arrêt des ondes de choc et des éclats de projectile qui caractérisent la performance du système. Lors d'un impact il a été estimé que seulement 0.2% de l'énergie cinétique initiale du projectile est dissipée via la fissuration du carreau de céramique et 45-70% de l'énergie est transmise lors de la mise en mouvement des débris de céramique [7]. Le backing a pour rôle d'absorber les fragments et l'énergie résiduelle du projectile [8]. Un backing composite dissipe l'énergie par délaminage et par déformations des fibres [9]. Le choix approprié de cette couche est capital pour la performance du blindage. Il permet notamment d'optimiser, l'intégrité de la céramique soumise à plusieurs impacts. Un des principaux paramètres est la rigidité du backing qui augmente la durée de vie de la céramique intacte et donc augmente la performance balistique [8]. L'emploi d'une couche arrière ayant un comportement plus ductile macroscopiquement est privilégié pour absorber quant à elle les ondes de choc. Rigidité et capacité à emmagasiner de la déformation irréversible sans rupture d'impédance sont les paramètres qui ont guidé notre choix vers un composite à base de fibres longues en polyéthylène à haute masse moléculaire (UHMWPE) pour cette étude. Nous présentons ici des essais balistiques menés sur des structures de protection balistique double dureté composées d'une alumine en face avant et d'un composite stratifié tissé en face arrière. Différents essais ont été réalisés en faisant varier l'épaisseur de la plaque de céramique. Par la suite les fragments de céramique ont été récupérés et étudiés. Un lien est établi entre les observations des fragments et les profils de déplacements mesurés en face arrière, utilisés pour quantifier la performance du système.

2. Description des essais

2.1 Description des matériaux

Les cibles sont composées d'une plaque d'alumine de dimension 100x100mm et de différentes épaisseurs collées à une plaque de composite de 200mm de cotés et d'épaisseur 6mm. La couche avant est composée d'une alumine technique (Al_2O_3) frittée pure à 99.5%. Le composite est un stratifié [0°/90°] fabriqué par pressage à chaud de fibres UHMWPE chacune de diamètre 17 μm , dans une matrice polyuréthane (17 %m de résine). Chaque pli a une épaisseur moyenne de 60 μm . Les deux couches sont assemblée grâce à une résine époxy d'épaisseur moyenne de 100 μm [10]. Les configurations d'assemblage des couches sont définies dans la Table 1.

	Épaisseur Céramique [mm]	Épaisseur composite [mm]	Masse surfacique [kg/m ²]
Configuration A	10	6	44.6
Configuration B	15	6	63.8

Table 1. Configurations des cibles bicouches impactées

2.2 Configurations des tirs

Le projectile utilisé lors des essais balistiques est une munition de type 7,62 x 51mm AP P80. La balle est composée d'une enveloppe, d'un bouchon arrière et d'un noyau en acier 102Cr6. Cet acier à une dureté mesurée de 750 HV (dureté HV30), cohérente avec les données du fabricant qui indique une dureté de 62 à 63 HRC, ce qui équivaut à une dureté Vickers de 746 à 772HV (normes ASTM E 140-

07). L'enveloppe en laiton présente une micro dureté moyenne de 165 HV2. Cet alliage en laiton est composé de 90% de cuivre et 10% de Zinc. La masse totale du projectile est de 9.8 g répartie entre le noyau (3.9g), l'enveloppe (4.25g) et le bouchon arrière en plomb (1.65g). L'ensemble est propulsé à une vitesse de $810 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \pm 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en sortie de canon. Le point d'impact est ajusté par visée laser (Fig. 2) [11].



Figure 1. Décomposition d'une munition .62x51 mm AP P80 [12]

Le carreau de céramique est confiné latéralement lors des essais par un bâti en aluminium qui maintient également le backing composite en appui sur le bâti (Fig. 2).

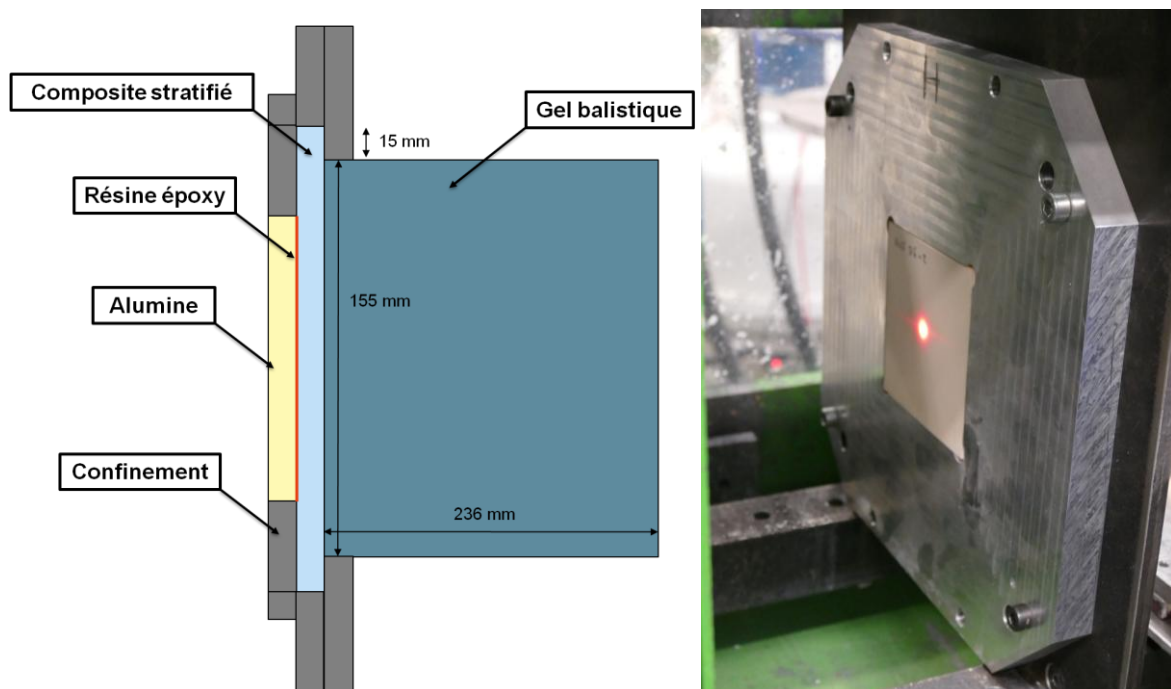


Figure 2. Configuration d'essai pour impact balistique sur Blindage Double Dureté (BDD)

Un bloc de gel balistique est placé en contact sur toute la face arrière de la structure, dans un double objectif. D'une part les conditions d'essai se rapprochent des conditions réelles d'utilisation d'un gilet par balle, l'épaisseur de 236mm correspondant à l'épaisseur du thorax du 50e percentile de la population [13]. D'autre part, il permet de restreindre la flexion libre de l'ensemble, donc de la plaque de céramique, ce qui diminue la fragmentation par flexion et évite une perte de confinement. Le pouvoir d'arrêt de la protection balistique s'en retrouve donc amélioré.

4. Observation des dommages et mécanismes

4.1 Dégâts subis par la structure

Tous les cas s'avèrent non perforants. Les études post mortem des structures impactées nous ont permis de définir différentes zones d'endommagement dans la céramique selon la distance au point d'impact, en fonction de l'épaisseur du carreau d'alumine. Les dommages majeurs observés sont :

- formation d'un réseau de fissures radiales attribuées à une rupture en traction
- existence d'un cône de fissuration caractéristique d'une rupture dominée par le cisaillement
- fragmentation et écrasement) d'un amas de fragments coniques de petites dimensions en zone proche du point d'impact.

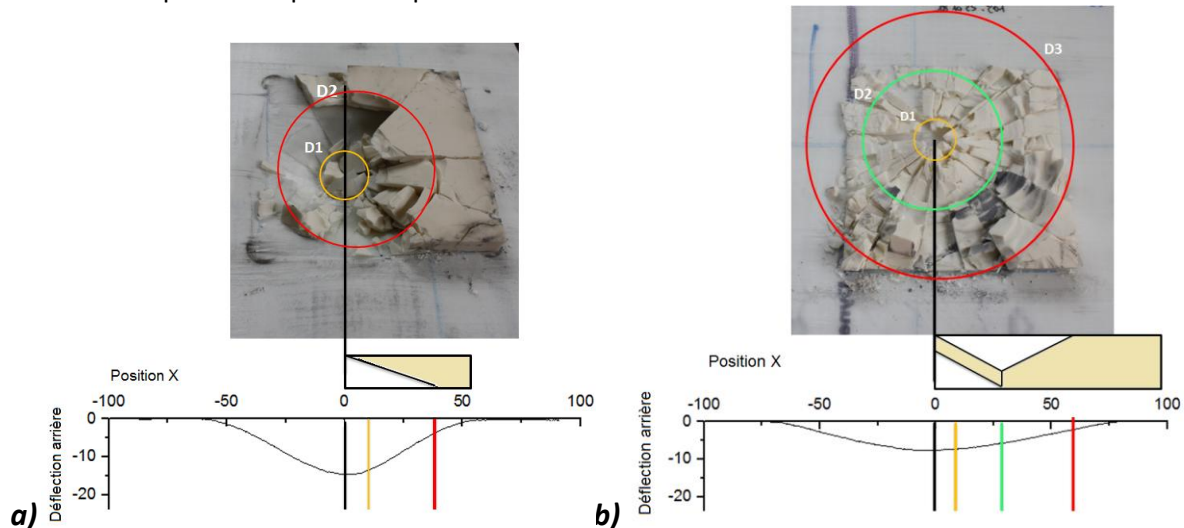


Figure 3. Profil d'endommagement de la céramique après un impact sur (a) la configuration a. et (b) sur la configuration b (voir (Table 1))

Target Plate [mm]		Planeity defect [μm]	v0 [m/s]	D1 [mm]	D2 [mm]	D3 [mm]	Residual backing deformation [mm]	Remarks
configuration b								
Ceramics	15	114,56	810	19,0	65,8	126,7	7,64	No perforation
Composite	6							
configuration a								
Ceramics	10	64,32	800	20,0	65,0		13,25	No perforation
Composite	6							

Table 2. Caractéristiques et mesures pour les différents essais balistiques

La formation d'une fissure conique dans la céramique et la dissipation de l'énergie du projectile par la déformation de la plaque composite constituent les mécanismes principaux d'absorption de l'énergie cinétique du projectile par la structure [8]. La rupture de la plaque en céramique provient de l'interface céramique / composite ou plus précisément céramique / adhésif à l'extrémité arrière du carreau de céramique [14]. En effet, les ondes de compression générées par le contact du projectile sur la surface de la céramique traversent l'épaisseur du carreau de céramique et une grande partie de celle-ci est renvoyée par le matériau de support qui a généralement une impédance inférieure à celle de la céramique. Le caractère divergent des ondes provoque la génération d'une

fissure conique à partir du point d'impact et progresse vers l'interface céramique / backing où la base du conoïde est formée [8]. Comme nous pouvons le voir fig. 3, l'endommagement de la céramique est dépendant de l'épaisseur du carreau d'alumine. L'étude post mortem de la structure (a) nous permet de visualiser post-mortem les frontières d'un seul de cône de fragmentation., proche de l'interface céramique/backing. Le matériau se trouvant dans ce cône a été fragmenté intensément résultant en des fragments d'une taille millimétrique voire micrométriques.

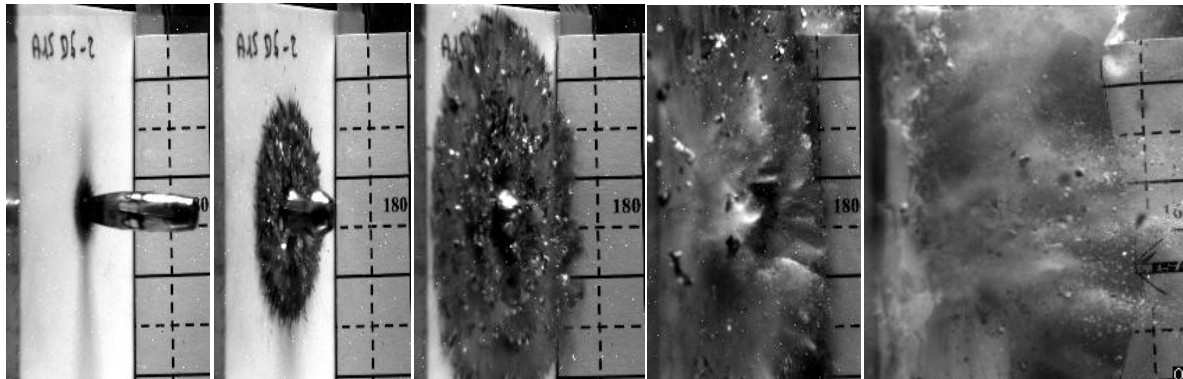


Figure 4. Images de caméra haute vitesse d'un impact d'une munition de 7,62x51mm AP sur une cible composé de 10mm de céramique et 6mm de composite.

Pour la configuration (b) les dommages subis par la céramique sont tout autres. Nous pouvons observer la formation de plusieurs cônes de fragmentation, ce qui est dû au nombre d'allers retours des ondes dans la couche supérieure de céramique rendus possibles par l'épaisseur plus grande. Du fait de l'absence de plaque de recouvrement, les couches supérieures de céramique qui se sont écaillées dans les premiers instants ont été éjectées de la structure. Cependant comme pour la première configuration, le matériau situé dans ce cône de fragmentation a également subi une fragmentation intense, que nous attribuons à une compression confinée par le bouchon arrière de plomb du projectile. Les vidéos fig. 4 nous permettent de voir l'effet de l'impact du bouchon arrière de plomb qui provoque l'éjection des gros fragments latéraux dans ce cas de plus forte épaisseur de céramique. La surfaces des fragments en contact avec le cône de fragmentation sont recouvert de plomb, ce qui suppose que le matériau s'est immiscé dans les fractures provoquées par le cœur en acier (voir fig. 5). Pour les deux configurations nous pouvoir observer que la zone sous jacente à l'impact (zone orange) est, comme nous pouvions nous y attendre la plus détériorée, c'est dans ce diamètre que le backing présente une pente quasi plane. Pour les deux configurations, le diamètre le plus grand qui se place au niveau de la base du plus grand cône de fragmentation se trouve au niveau où la déflexion du backing redevient nulle.

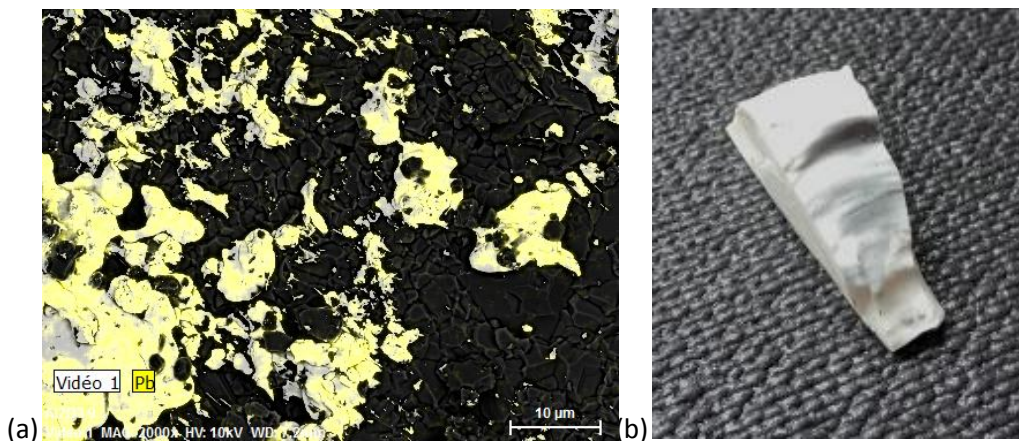


Figure 5. a) Microscopie électronique à balayage avec sonde EDS et **b)** photographie d'une surface d'un fragment de céramique périphérique au cône de fragmentation .

4.3 Fragmentation de la céramique

Pour étudier la morphologie des fragments produit lors des impacts, l'ensemble des débris de céramique ont été collecté, leurs surfaces ont ensuite été étudiées. Les fragments ont également été passés dans divers tamis pendant des séries de 10 minutes. Les débris n'ayant pas une forme sphérique, nous observons que des débris allongés sont passés à travers des grilles fines et donc, pour une taille de tamis, une grande variabilité des tailles (donc des masses) de fragments. Afin de tenir compte de la forme des fragments sur la classification de ceux-ci, nous avons déposé les fragments sur une table rétro éclairée et utilisé un logiciel libre d'analyse d'image afin de mesurer la distribution de surfaces (Fig. 6).

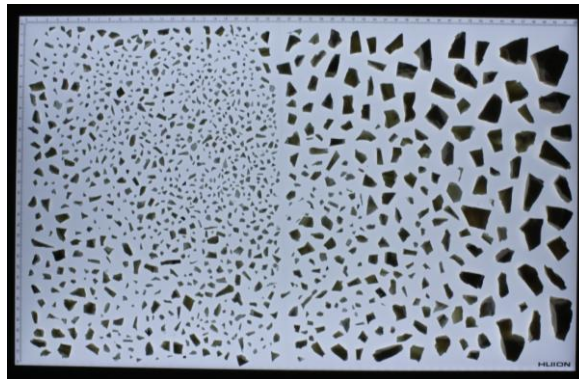


Figure 6. Fragments produits lors d'un impact d'une munition de 7,62x51mm AP sur une cible composée de 10mm de céramique et 6mm de composite (configuration (a)).

La surface de tous les refus de tamis supérieurs à 1.7mm a été mesurée. La surface d'un fragment est une variable aléatoire. Par conséquent, elle peut être décrite par une distribution de probabilité $n(S)$. Cette fonction représente la probabilité que la surface du fragment soit égale à S (pas la probabilité qu'il existe un fragment avec la surface S et l'unité est normalisée :

$$\int_0^{\infty} n(S) dS = 1 \quad (1)$$

Chaque tir n'ayant été effectué que deux fois avec une certaine variabilité des configurations d'impact, nous constatons une dispersion sur les quantités de dommages subis pour une même structure de protection balistique, donc sur la distribution des tailles de fragments. Néanmoins, nous observons que la densité de probabilité des distributions de surface donnée par les équations (1) et (2) suit une distribution de Mott généralisé [15] Eq. (3) (Fig. 6).

$$n(S) = \frac{N_T(x1 < s < x2)}{N_0} \quad (2)$$

$$f(S) = e^{-\left(\frac{n}{\mu}\right)^\lambda} \quad (3)$$

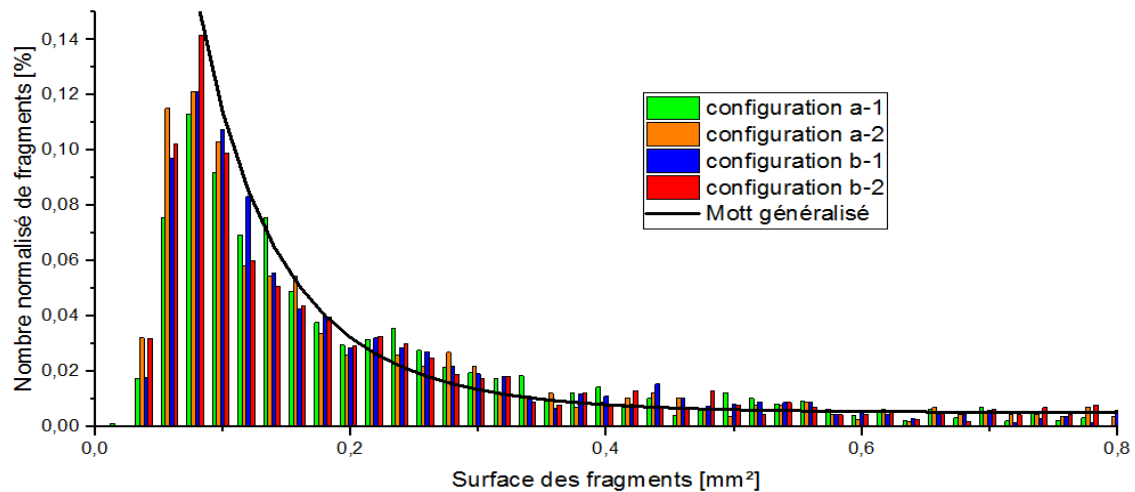


Figure 7. Fonction de distribution en pourcentage de la surface des fragments produits lors de l'impact pour différentes configurations

La fonction de distribution cumulative en effectifs est la fonction qui à chaque modalité associe son effectif cumulé. Nous avons reporté la valeur adimensionnée sur la fig. 8 Nous pouvons observer que cette distribution atteint rapidement la valeur 1 et que les plus petits fragments d'une taille de $0,5\text{mm}^2$ constituent 80% des fragments générés. 5% de ces fragments restant ont une surface de plus de 2mm^2 . Cette distribution indique que deux mécanismes apparaissent essentiellement dans les tirs effectués : la compression confinée qui provoque de très petits fragments, et les gros fragments prismatiques des zones latérales soumises à la traction et au cisaillement.

$$F(S) = \int_0^{\infty} n(S)dS \quad (1)$$

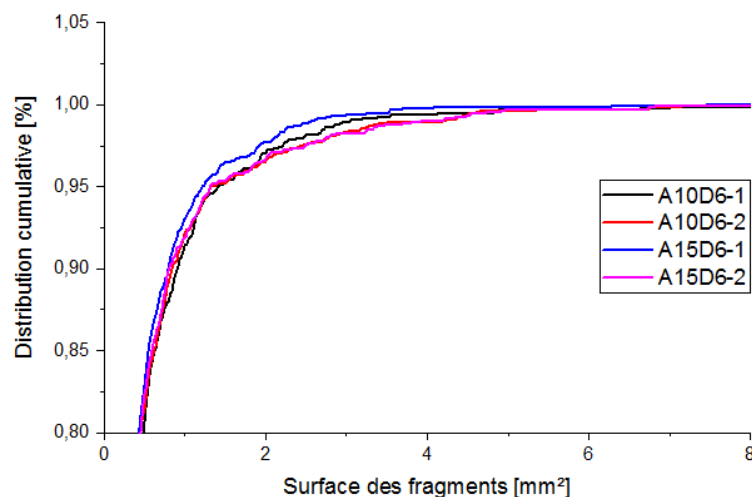


Figure 8. Fonction de distribution cumulative en fréquences

L'inconvénient majeur des protections balistiques en céramique est le comportement fragile de ces matériaux, qui est dû à son incapacité à accommoder les déformations plastiques. La plasticité ne pouvant pas se développer, ce type de matériaux n'emmagasine que très peu d'énergie, et a donc une faible résilience : ceci conduit à un comportement fragile responsable des grosses écailles latérales. La fragilité du matériau facilite la nucléation, la propagation et la coalescence de micro-cracks. Ces mécanismes conduisent à un fort endommagement et à une pulvérisation du matériau dû à l'impact et à la pénétration du projectile [16]. Ceci explique la taille très petite des fragments dans la zone confinée sous le projectile, en particulier pour l'épaisseur la plus faible pour laquelle le bouchon de plomb réussit à traverser entièrement la couche céramique.

Conclusion

L'ensemble des essais réalisés nous ont permis de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement impliqués lors de l'impact d'un projectile perforant sur une structure de blindage double dureté. Comme nous l'avons vu, l'épaisseur de la plaque de céramique influe fortement sur la performance de la structure au détriment de sa masse surfacique. Les mécanismes sont donc différents mais induisent une fragmentation similaire. L'épaisseur du carreau de céramique à également un impact sur la sollicitation du backing ainsi que sur les interactions entre le composite et la céramique voir avec le projectile. L'étude de la résistance de ce type de structure bien qu'intéressante est donc sensible à de nombreux paramètres qu'il sera intéressant d'investiguer dans de futures études.

Remerciements

Nous remercions la DGA-MRIS pour le soutien de ces travaux de thèse ainsi que les services de l'ISL ayant collaboré à la conception et à la mise en œuvre des essais et analyses.

Références

- [1] Wilkins, M. L., R. L. Landingham and C. A. Honodel (1971). Light-armor program. Fifth progress report. Lawrence Livermore Laboratory: 64.
- [2] O'Donnell, R. G. and R. L. Woodward (1990). Fragmentation of Alumina in Ballistic Impact as a Function of Grade and Confinement. 12th International Symposium on Ballistics, San Antonio, Texas.
- [3] Hazell, P. J., C. J. Roberson and M. Moutinho (2008). "The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance." *Materials & Design* 29(8): 1497-1503.
- [4] Forquin, P. (2003). Endommagement et fissuration de matériaux fragiles sous impact balistique, rôle de la microstructure, LMT (Cachan).
- [5] Medvedovski, E. (2010). "Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1." *Ceramics International* 36(7): 2103-2115.
- [6] Rosenberg, Z. and E. Dekel (2012). *Terminal Ballistics*, Springer.
- [7] Woodward, R. L., W. A. Gooch, et al (1994). "A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics." *International Journal of Impact Engineering* 15(5): 605-618.
- [8] Wilkins, M. L., C. F. Cline and C. A. Honodel (1969). Fourth progress report of light armor program. Lawrence Livermore National Laboratory 62.
- [9] LURSAT, D. (1973). Etude du pouvoir protecteur des blindages à couche de céramique: Premiers résultats concernant le comportement dynamique local des divers constituants. Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis
- [10] Nguyen, L.H, (2015). The Ballistic Performance of Thick Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite, School of Engineering College of Science Engineering and Health RMIT University
- [11] Colard, L. (2015). Etude du comportement sous impact balistique d'un blindage multicouche à composants carbure de bore et aluminium., Université de Lorraine.
- [12] Schutzwesten Normen und Prüfmunition, Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (2018)
- [13] Mertz, H.J.(1984). A Procedure for Normalizing Impact Response Data. Dans : SAE Technical Paper. SAE International
- [14] Wilkins ML. (1978). Mechanics of penetration and perforation. *Int J Eng Sci*, 16(11):793–807.
- [15] Mott, N.F. and Linfoot, E.H.(1943). A theory of fragmentation, British Ministry of Supply Report, AC 3348.
- [16] Shockey, D. A., A. H. Marchand et al (1990). "Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods." *International Journal of Impact Engineering* 9(3): 263-275.