
RÉSUMÉ –

TITRE : *Caractérisation expérimentale et modélisation des propriétés de rupture et de fragmentation dynamiques d'un noyau de munition et de céramiques à blindage*

Yannick DUPLAN

*Laboratoire 3SR (Sols, Solides, Structures, Risques), Univ. Grenoble Alpes
yannick.duplan@3sr-grenoble.fr*

Certaines nuances de céramiques, comme les carbures de silicium (SiC) ou les alumines (Al₂O₃), sont utilisées comme matériaux balistiques en raison de leurs excellentes performances mécaniques, notamment leur dureté, tout en étant légères, là où le gain de masse est un enjeu majeur pour la conception d'équipements militaires de protection individuelle ou de véhicule. Depuis la guerre du Viêt Nam, les céramiques ont été largement utilisées et intégrées comme face avant de blindage bicouche pour stopper la menace des projectiles de type AP (*Armour-Piercing*) durant un impact balistique. Néanmoins, le projectile provoque un endommagement intense dans la céramique en raison, notamment, d'un chargement de traction dynamique qui se manifeste par une fissuration multiple, appelée fragmentation, particulièrement défavorable à l'intégrité de la protection balistique et à sa capacité à faire face à un second impact. Afin de développer un matériau de blindage plus performant, il est essentiel de comprendre le lien entre la microstructure des céramiques, l'endommagement généré sous impact et leurs performances balistiques.

Cette thèse cherche à mieux comprendre le phénomène de fragmentation dynamique généré à hautes vitesses de déformation dans des céramiques à forte ténacité, incluant un matériau aluminé bio-inspiré de la nacre. Cette nacre artificielle est, *a priori*, plus réfractaire aux fissures que les céramiques conventionnelles car elle se caractérise par une haute ténacité statique en raison d'une microstructure spécifique de type « Brique-Mortier » (ou BM) reproduite dans le matériau appelé ici MAINa.

Le premier objectif de la thèse a été de comprendre et de caractériser les modes de déformation et d'endommagement dans un noyau d'une balle d'API-BZ, menace majeure pour les blindages bicouches sous impact balistique. Pour ce faire, trois géométries d'échantillons ont été dimensionnées et analysées par simulation numérique. Des essais de compression ont été réalisés en conditions quasi-statique, dynamique (900 à 5000 s⁻¹) et à haute température (250 °C). Ces essais ont permis de caractériser le comportement de l'acier, sa sensibilité à la vitesse de chargement et à la température, et finalement d'identifier les paramètres du modèle constitutif de Johnson-Cook. Les résultats ont conduit à l'identification d'une limite élastique particulièrement élevée (~ 3,3 GPa) et à des paramètres fonction de la géométrie d'essai.

Le deuxième objectif a été de procéder à une simulation numérique par éléments finis en considérant une céramique SiC (Hexoloy SA®) avec un *backing* (aluminium). L'objectif était de pouvoir prédire la vitesse limite de perforation, obtenue expérimentalement, par simulation numérique avec l'aide des paramètres du noyau d'API-BZ caractérisé précédemment ; les paramètres de la céramique, modélisée par un modèle de Johnson-Holmquist, étant issus de la littérature. Faite sur ABAQUS, la simulation a permis de retrouver la valeur expérimentale attendue et de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement générés durant la phase de pénétration d'un blindage par un projectile.

Le troisième objectif a concerné les propriétés de propagation dynamique de fissure dans les céramiques étudiées. La vitesse de fissure est un paramètre clé pilotant la résistance dynamique en traction comme illustré dans le modèle Denoual-Forquin-Hild. L'influence de la microstructure sur la vitesse limite de propagation d'une fissure a besoin d'être évaluée. Des essais expérimentaux ont été développés pour permettre la propagation d'une seule fissure sous chargement dynamique. L'essai « Rockspall » repose sur des échantillons doublement entaillés. Grâce à l'imagerie ultra-rapide et à l'outil de corrélation d'images, la vitesse asymptotique de la fissure est caractérisée. Par ailleurs, la microstructure MAINa présente un trajet de fissuration original. Lorsque les plaquettes sont orientées perpendiculairement par rapport à la propagation de la fissure, le lieu

d'initiation de la fissure ainsi que la propagation de la fissure sont perturbés par un mécanisme de déviation (comme cela peut être observé en quasi-statique).

Le quatrième objectif a concerné les propriétés de fragmentation multiple des céramiques sous haute vitesse de chargement en fonction de la microstructure. Il s'agissait d'évaluer et de comparer la densité de fissuration et la taille des fragments du MAINa par rapport à l' Al_2O_3 grâce à des essais d'impact sur la tranche et des essais tandem (impact normal sur céramique intacte puis impact normal pénétrant sur céramique fragmentée). Les densités de fissuration observées dans le MAINa sont plus faibles que dans son homologue non nacré. La micro-tomographie aux rayons X et l'analyse microscopique des carreaux fragmentés montrent que les fragments eux-mêmes contribuent à la résistance de la céramique endommagée selon leur taille, leur orientation ou leur forme. En outre, l'essai tandem montre que la céramique MAINa, à l'état fragmenté, manifeste une plus grande résistance que l' Al_2O_3 , ce qui est un avantage pour le multi-impact. Par la suite, le comportement à l'état fragmenté des deux céramiques est simulé numériquement avec le modèle de Drucker-Prager pour identifier les paramètres des céramiques endommagées.

Au final, les travaux de cette thèse apportent des éléments de compréhension et de modélisation concernant le comportement de noyau du projectile d'API-BZ et des céramiques Al_2O_3 et SiC sous chargement dynamique. D'autre part, les propriétés de fissuration et de fragmentation du matériau nacré (MAINa) sont analysées en dynamique afin d'étudier l'intérêt de la microstructure BM pour la conception de blindages plus performants et plus résilients.

Mots-clés :

Céramique ; Carbure de silicium ; Alumine ; Nacre ; API-BZ ; Acier ; Blindage ; Impact ; Endommagement ; Fissure ; Fragmentation dynamique ; Paramètre de Lode ; Géométrie Cisaillement-Compression ; Barres d'Hopkinson ; Vitesse balistique ; Érosion ; Fragmentation simple ; Fragmentation multiple ; Rockspall ; Vitesse de fissure ; Impact sur tranche ; Impact tandem ; Fragments ; Tomographie ; Modèle de Johnson-Cook ; Modèle de Johnson-Holmquist ; Modèle de Denoual-Forquin-Hild ; Modèle de Drucker-Prager.

Résumé pour DYMAT

ABSTRACT –

TITLE: *Experimental characterisation and modelling of the dynamic fracture and fragmentation properties of a projectile ammunition and armour ceramics (Yannick DUPLAN)*

Yannick DUPLAN

*3SR laboratory (Soils, Solids, Structures, Risks), Univ. Grenoble Alpes
yannick.duplan@3sr-grenoble.fr*

Some ceramic grades, such as silicon carbide (SiC) or alumina (Al₂O₃), are used as ballistic materials thanks to their excellent mechanical performances, such as their hardness, while being light, where weight gain is a major issue for the design of military equipment for personal and vehicle protection. Since the Vietnam War, ceramics have been largely used and integrated as front face in bilayer shielding to stop the threat of AP (Armour Piercing)-type projectiles during a ballistic impact. Nevertheless, the projectile leads to an intense damage in the ceramic due to, amongst other phenomena, a dynamic tensile loading that manifests by multiple cracking, called fragmentation, particularly unfavourable for the integrity of the ballistic protection and its capacity to deal with a second impact. In order to develop a more performing shielding material, it is essential to understand the link between the microstructure of ceramics, the damage generated under impact and their ballistic performances.

This thesis seeks to better understand the dynamic fragmentation phenomenon generated at high strain rates in high fracture-toughness ceramics, including a bio-inspired alumina material mimicking nacre microstructure. This artificial nacre is, *a priori*, more crack resistant than conventional ceramics as it is characterised by a high static fracture-toughness due to its specific “Brick-and-Mortar” (or BM) microstructure reproduced in the material called here MAINa.

The first objective of the thesis was to understand and to characterise the different deformation and damage modes in a core of an API-BZ bullet, major threat for bilayer shieldings under ballistic impact. To this end, three sample geometries were designed and analysed by numerical simulation. Compression tests were performed in quasi-static, dynamic (900 à 5000 s⁻¹) and high temperature (250 °C) conditions. These tests allowed to characterise the steel behaviour, its sensibility to loading speed and to temperature, and finally to identify the parameters of the Johnson-Cook constitutive model. The results led to the identification of a particularly high elastic limit (~ 3,3 GPa) and to parameters function of the test geometry.

The second objective was to proceed to a numerical simulation by finite elements considering a SiC (Hexoloy SA®) ceramic with a backing (aluminium). The objective was to be able to predict the limit velocity of perforation, obtained experimentally, by numerical simulation with the help of parameters from the API-BZ core previously characterised; ceramic parameters, modelled by a Johnson-Holmquist model, stemming from the literature. Performed in ABAQUS, the simulation allowed to find the expected experimental value and to better understand the damage mechanisms generated during the penetration phase of an armour by a projectile.

The third objective concerned the properties of dynamic crack propagation in the studied ceramics. The crack velocity is a key parameter driving the dynamic resistance in tension as illustrated by the Denoual-Forquin-Hild model. The influence of the microstructure on the limit velocity of crack propagation needs to be evaluated. Experimental tests were developed to allow the propagation of a single crack under dynamic loading. The “Rockspall” test is based on double-notched specimens. Thanks to both ultra-high-speed imaging and digital image correlation tool, the asymptotic crack velocity is characterised. Furthermore, the MAINa microstructure presents an original cracking trajectory. When platelets are perpendicularly oriented with respect to the crack propagation, the initiation location of the crack as well as the crack propagation are disrupted by a deviation mechanism (as it can be observed in quasi-static).

The fourth objective concerned the multiple fragmentation properties of ceramics under high stress rate in function of the microstructure. It was about evaluating and comparing cracking density and fragments

size of MAINa compared with Al_2O_3 thanks to edge-on-impact tests and tandem tests (normal impact on the intact ceramic then penetrating impact on the fragmented ceramic). The cracking densities observed for MAINa are lower than its non-nacre-like counterpart. X-ray micro-tomography and microscopic analysis of the fragmented tiles show that the fragments themselves contribute to the resistance of the damaged ceramic according to their size, their orientation and their shape. Besides, the tandem test shows that the MAINa ceramic, in fragmented state, demonstrates a higher resistance than Al_2O_3 , what is an advantage for multi-impact. Thereafter, the behaviour in fragmented state of the two ceramics is numerically simulated with the Drucker-Prager model to identify the parameter of damaged ceramics.

In the end, the works of this thesis bring elements of both comprehension and modelling concerning the behaviour of API-BZ projectile core and Al_2O_3 and SiC ceramics under dynamic loading. On the other hand, the cracking and fragmentation properties of the nacre-like material (MAINa) are analysed in dynamic in order to study the interest of the BM microstructure for the design of more performing and more resilient armours.

Keywords:

Ceramic; Silicon carbide; Alumina; Nacre; API-BZ; Steel; Armour; Impact; Damage; Crack; Dynamic fragmentation; Lode parameter; Shear-Compression Specimen; Hopkinson bars; Ballistic velocity; Erosion; Simple fragmentation; Multiple fragmentation; Rockspall; Cracking velocity; Edge-on-impact; Tandem impact; Tomography; Johnson-Cook model; Johnson-Holmquist model; Denoual-Forquin-Hild model; Drucker-Prager model.

Abstract for DYMAT