

Caractérisation expérimentale et modélisation de la fragmentation des céramiques

J.-L. ZINSZNER / CEA – Gramat

P. FORQUIN / Laboratoire Sols, solides, structures, risques (S3R), Unité mixte de recherche 5521 CNRS – Université Grenoble-Alpes – Grenoble INP

G. ROSSIQUET / Laboratoire de synthèse et fonctionnalisation des céramiques, Unité mixte de recherche 3080 CNRS – Saint-Gobain Recherche, Cavaillon

Les céramiques sont souvent employées dans les systèmes de protection passifs en dépit d'une nature qui les expose à une fragmentation intense au cours d'un impact balistique. Une caractérisation fine de leur fragmentation dynamique est nécessaire dans le but à la fois de comprendre le rôle de la microstructure du matériau sur la performance finale du blindage, mais également de pouvoir prédire au mieux par simulation numérique chaque étape des phénomènes d'impact. Dans cette étude, des essais de fragmentation sous impact ont été réalisés sur un carbure de silicium. Des simulations numériques de ces essais ont été faites en utilisant un modèle d'endommagement décrivant les mécanismes élémentaires activés lors du processus de fragmentation des matériaux fragiles. Enfin, un essai innovant d'impact sur céramique préalablement fragmentée a été réalisé, permettant de remonter au comportement résiduel d'une cible endommagée.

Les céramiques sont utilisées depuis la fin des années 1960 comme matériaux de blindage. Cette famille de matériaux offre des avantages indéniables pour une telle utilisation, à savoir une résistance en compression et une dureté très élevées permettant d'endommager le projectile dès les premiers instants après l'impact. Les céramiques présentent également une faible densité permettant des gains de masse importants en comparaison des blindages métalliques. Néanmoins, leur caractère fragile (c'est-à-dire non ductile) ainsi que leur faible résistance en traction se traduisent au cours d'un impact par une fragmentation intense du matériau, influençant ainsi sa capacité à arrêter le projectile, ou les débris de projectile formés.

Le carbure de silicium est une céramique couramment utilisée dans les systèmes de protection. Dans le but de caractériser sa fragmentation dynamique, deux types d'essais d'impact (impact normal et impact sur la tranche) ont été mis au point et réalisés [1]. Chaque essai peut, au choix, être réalisé en configuration dite ouverte, permettant l'utilisation d'une caméra ultrarapide (ayant des fréquences d'acquisition de l'ordre du million d'images par seconde) et donc une visualisation du processus de fragmentation dynamique, ou en configuration dite fermée où le matériau est confiné dans un sarcophage métallique permettant de récupérer la céramique fragmentée [2]. Il est alors possible de déterminer avec précision la densité de fissuration après impact

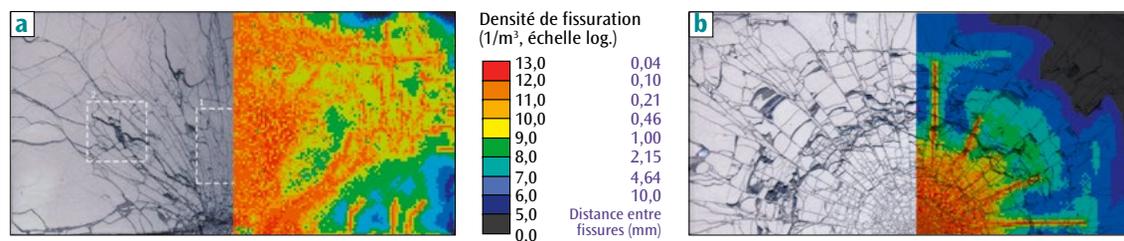


Figure 1. Comparaison entre les faciès d'endommagement de la céramique obtenus expérimentalement par impact sur la tranche (a) et impact normal (b) et les densités de fissuration (et les distances moyennes entre fissures correspondantes) prévues numériquement par le modèle de Denoual, Forquin et Hild [3,4]. Les différentes zones remarquables observées expérimentalement sont bien reproduites par la simulation.

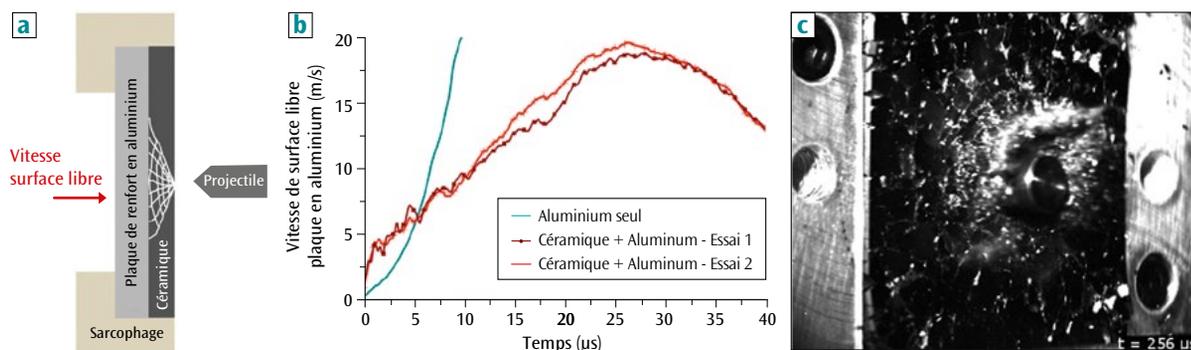


Figure 2.

Essais d'impact sur céramique préalablement fragmentée : schéma de principe de l'essai (a), vitesse en surface libre de la plaque de renfort d'aluminium lorsque celle-ci est recouverte ou non d'une céramique fragmentée (b) et visualisation de l'interaction entre le projectile et la cible par caméra ultrarapide (c). Malgré sa fissuration intense, la céramique endommagée conserve une cohésion importante et une capacité à freiner le projectile.

en différents endroits de la cible dans le but de valider les simulations numériques (figure 1).

Pour simuler la fragmentation dynamique des carreaux de carbure de silicium, le modèle de fragmentation développé par Denoual, Forquin et Hild [3,4] a été implémenté à l'aide d'un sous-programme dans le code de calcul par éléments finis Abaqus™. Ce modèle s'appuie sur une description des mécanismes élémentaires de la fragmentation des matériaux fragiles. De nature micromécanique, il prévoit une sensibilité de la réponse du matériau à la vitesse de déformation, des régimes quasi statiques aux régimes fortement dynamiques. De plus, les paramètres clés du modèle, caractéristiques de la population de défauts dans le matériau, sont déterminés à l'aide d'essais de flexion quasi statiques. Les essais dynamiques réalisés *a posteriori* conduisent à un raffinement des prévisions numériques. Une comparaison entre les faciès d'endommagement obtenus par impact sur la tranche et par impact normal avec les densités de fissuration prévues par le modèle est présentée sur les figures 1a et 1b. Les différentes zones remarquables observées expérimentalement (zones de fissuration intense, brusques changements de densités de fissure, fissures d'écaillages, etc.) sont bien reproduites par la simulation. Un calcul de la distance moyenne entre fissures a également permis de valider les densités de fissuration prévues par le modèle.

Le carreau de céramique fragmenté par impact normal a ensuite été soumis à un second impact. Cet essai innovant d'impact sur céramique préalablement fragmentée permet d'identifier le comportement résiduel du matériau endommagé, paramètre clé dans la performance d'un blindage en céramique [1]. Un laser pointant la surface libre de la plaque de renfort en aluminium permet de mesurer la vitesse à cet endroit (figure 2a). Cette information, après comparaison avec les vitesses obtenues lors d'essais de référence, permet de remonter au comportement de la céramique endommagée (figure 2b). Une caméra ultrarapide est également utilisée dans le

but de visualiser l'interaction entre le projectile et la céramique (figure 2c). Ces essais ont montré que la céramique endommagée, malgré sa fissuration intense, conservait une cohésion importante et une capacité à freiner le projectile.

Conclusion

Une approche combinant essais de fragmentation dynamique d'une céramique sous différentes configurations et simulation numérique en utilisant un modèle d'endommagement des matériaux fragiles a été mise en œuvre. Cette approche a permis de montrer une très bonne capacité du modèle à prévoir les faciès d'endommagement ainsi que les densités de fissurations obtenues après impact. Un essai innovant d'impact sur une céramique préalablement fragmentée a également été réalisé. Il a permis d'évaluer la capacité de résistance d'une céramique intensément fragmentée, cette capacité étant liée à la mobilité des fragments confinés devant le projectile. Les résultats ainsi obtenus seront utilisés par la suite dans le but de valider un modèle de comportement d'une céramique fragmentée.

Références

- [1] J.-L. ZINSZNER, P. FORQUIN, G. ROSSIQUET, "Experimental and numerical analysis of the dynamic fragmentation in a SiC ceramic under impact", *Int. J. Impact Eng.*, **76**, p. 9-19 (2015).
- [2] J.-L. ZINSZNER, P. FORQUIN, G. ROSSIQUET, "Design of an experimental configuration for studying the dynamic fragmentation of ceramics under impact", *Eur. Phys. J. Special Topics*, **206**, p. 107-115 (2012).
- [3] C. DENOUAL, F. HILD, "A damage model for the dynamic fragmentation of brittle solids", *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, **183**, p. 247-258 (2000).
- [4] P. FORQUIN, F. HILD, "A probabilistic damage model of the dynamic fragmentation process in brittle materials", *Adv. Appl. Mech.*, **44**, p. 1-72 (2010).