

# Fragmentation de céramiques de blindage

B. ERZAR - J.-L. ZINSZNER - E. BUZAUD - P.-Y. CHANAL / CEA – Gramat

P. FORQUIN / Laboratoire d'étude des microstructures et de mécanique des matériaux, Université de Lorraine, Île du Saulcy, Metz

Les céramiques sont souvent employées dans les systèmes de protection malgré leur nature fragile qui les expose à une fragmentation intense en cas d'impact balistique. Les modèles couramment utilisés décrivent mal cet aspect du comportement. Dans cette étude, la machine GEPI du CEA–Gramat a été utilisée pour caractériser finement le comportement d'une alumine en traction à très haute vitesse de chargement. De plus, des simulations numériques ont été menées avec un modèle d'endommagement décrivant les mécanismes élémentaires activés au cours de la fragmentation des matériaux fragiles.

Les céramiques sont utilisées dans les blindages depuis les années 1960. Cette famille de matériaux offre des avantages indéniables en comparaison de blindages métalliques : gain de masse, dureté élevée qui permet d'endommager le projectile dès les premiers instants de l'impact. Toutefois, les céramiques souffrent d'une résistance en traction environ dix fois inférieure à leur résistance en compression, ainsi que d'une ténacité très faible. Lors d'un impact, ce caractère fragile se traduit par une fragmentation intense que les modèles actuels peinent à décrire.

Un nouvel essai de caractérisation du comportement en traction dynamique a été développé : il permet de valider une approche de modélisation basée sur la description micromécanique des phénomènes gouvernant le processus de fragmentation des matériaux fragiles.

## Étude expérimentale de la fragmentation d'une alumine

Une alumine dense a été soumise à des essais d'écaillage grâce au moyen expérimental GEPI (Générateur électrique de pression intense). Ce dernier repose sur un concept développé par les laboratoires Sandia aux USA, qui met à profit les profils spécifiques du courant électrique pour générer des rampes de pression dans les matériaux. Le principe consiste à faire passer une forte impulsion de courant dans des électrodes plates générant ainsi un champ magnétique intense. Leur association conduit à l'application de forces volumiques de Laplace au sein des électrodes (**figure 1a**). La décharge contrôlée du courant permet de créer une rampe de compression s'étalant sur environ 550 ns [1]. Dans les essais dits « d'écaillage », l'impulsion de compression trans-

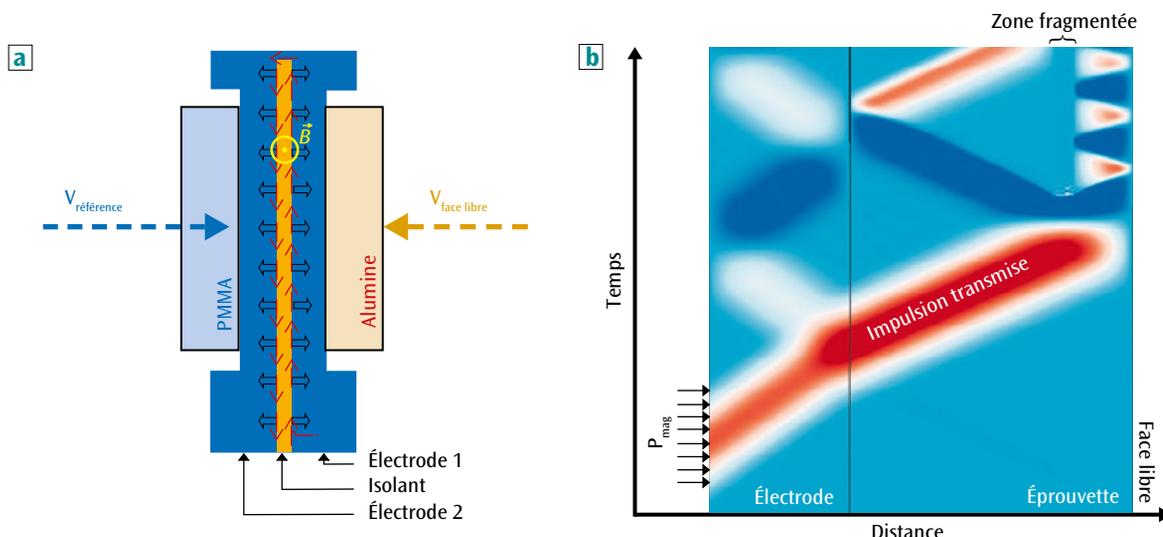
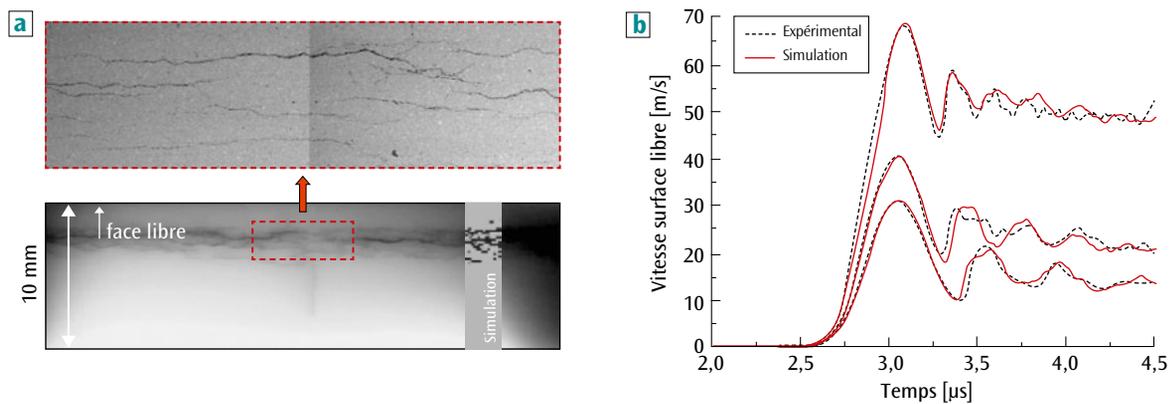


Figure 1. (a) : Schéma en coupe de la partie terminale du GEPI illustrant le principe utilisé pour la génération du chargement dynamique – (b) : Diagramme de marche de l'essai d'écaillage.



**Figure 2.** (a) : Analyse *post mortem* par microscopie optique et électronique à balayage d'une éprouvette d'alumine en limite d'écaillage et comparaison avec le faciès endommagé prévu par simulation – (b) : Comparaison des signaux de vitesse expérimentaux et numériques pour trois essais GEPI.

mise à l'alumine se propage jusqu'à la face arrière, libre de contrainte, où elle se réfléchit. Le croisement d'ondes de détente au cœur de l'éprouvette active le processus de fragmentation (**figure 1b**). Au contraire de l'essai d'écaillage par impact de plaque, l'essai GEPI permet de calculer précisément la vitesse de déformation, en tout point et à tout instant, grâce à l'augmentation progressive du chargement. Une mesure de vitesse est réalisée au niveau de la face libre de l'éprouvette. Ce signal permet de calculer la résistance dynamique du matériau et il renseigne aussi sur la cinétique d'endommagement. Une mesure témoin est généralement réalisée sur l'électrode opposée (**figure 1a**).

Cinq essais ont été conduits à différents niveaux de sollicitation. Les résultats ont montré une sensibilité de la résistance à la vitesse de chargement : une contrainte ultime de 408 MPa a été atteinte à  $4900 \text{ s}^{-1}$ , alors que l'on obtient 520 MPa pour un essai mené à  $21\,500 \text{ s}^{-1}$  [2]. Cette sensibilité n'avait pu être mise en évidence par impact de plaque. La maîtrise des conditions expérimentales a aussi permis de récupérer une éprouvette en limite d'écaillage : le chargement a initié une fissuration multiple au cœur de l'éprouvette, mais il a été suffisamment limité dans le temps pour figer le processus de fragmentation avant la coalescence des fissures (**figure 2**). Ces données expérimentales sont autant d'éléments de validation pour une approche de modélisation.

### Modélisation micromécanique de la fragmentation des céramiques

Le modèle de fragmentation développé par Denoual, Forquin et Hild [3,4] a été utilisé pour simuler la rupture dynamique de l'alumine. Cette approche s'appuie sur une description statistique de la population de défauts répartis dans la microstructure. Le modèle inclut aussi dans sa formulation les notions d'initiation, de propagation des fissures et d'occultation des défauts situés dans leur voisinage. Tous les essais ont été simulés

par éléments finis ; les profils expérimentaux et numériques de la vitesse relevée sur la face libre sont comparés sur la **figure 2b** pour trois d'entre eux. L'augmentation de résistance avec la vitesse de déformation, l'étendue de la zone endommagée ainsi que la cinétique d'endommagement sont bien reproduites par la simulation [5].

### Conclusion

Les essais d'écaillage de céramiques de blindage par impact de plaque ne permettent pas de déterminer avec précision la vitesse de déformation au moment de l'initiation de l'endommagement dynamique. Cette donnée essentielle a pu être obtenue à partir d'essais réalisés sur la machine GEPI. La résistance en traction d'une alumine a ainsi montré une sensibilité importante à la vitesse de chargement. De plus, la récupération d'une éprouvette partiellement endommagée a donné un aperçu unique du processus de rupture dynamique. Ces données ont servi à la validation d'une modélisation micromécanique de la fragmentation dynamique des alumines.

### Références

- [1] P.-L. HEREIL, F. LASSALE, G. AVRILAUD, "GEPI : An ICE Generator for Dynamic Material Characterization and Hypervelocity Impact", *Shock Compression of Condensed Matter*, p. 1209-1212 (2003).
- [2] B. ERZAR, E. BUZAUD, "Shockless spalling damage of alumina ceramic", *Eur. Phys. J. – ST*, **206**, p. 71-77 (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).
- [5] J.-L. ZINSZNER, B. ERZAR, E. BUZAUD, *Dynamic Tensile Behaviour of Alumina Ceramic at Very High Strain-Rates, Opportunities and Challenges of Light-Weight Armour*, Eds E. Cadoni and H. Kaufmann, p. 147-154 (2012).