

MODÉLISATION DE BÉTONS ET DE CÉRAMIQUES DE BLINDAGE : COMPLÉMENTARITÉ DES ESSAIS À L'ÉCHELLE DU MATÉRIAU ET DE LA STRUCTURE

Le besoin de disposer de capacités prédictives pour répondre aux missions d'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures ou des effets des armes conventionnelles nécessite la mise en place d'une démarche de simulation alliant modélisation physique, expérimentations et outils numériques. La maîtrise du comportement des matériaux constitutifs de l'arme (missile, charge explosive, etc.) et de la cible (structure en béton, aéronef, etc.) est de ce fait primordiale.

Les exemples présentés dans cet article concernent, d'une part, l'amélioration d'un modèle d'endommagement dédié aux bétons à ultrahaute performance renforcés par des fibres métalliques et, d'autre part, les étapes d'identification des paramètres d'un modèle micromécanique décrivant la fragmentation des céramiques de blindage. Dans les deux cas, les modèles développés sont alimentés par des essais de caractérisation à l'échelle du matériau. La validation des capacités de simulation est ensuite obtenue grâce à des essais d'impact à l'échelle de la structure.

La prédictibilité de la simulation numérique de phénomènes dynamiques intenses comme des explosions proches d'infrastructures ou des impacts dépend fortement de la précision des modèles de comportement utilisés pour tous les matériaux impliqués. Le développement et l'identification de ces modèles s'appuient souvent sur la mise en place d'essais de caractérisation dans lesquels il s'agit d'étudier spécifiquement la réponse dynamique du matériau à une sollicitation

maîtrisée. L'étape suivante consiste à entreprendre la validation de ces modèles à plus grande échelle, en menant par exemple des essais d'impact en laboratoire, pour lesquels une instrumentation importante est mobilisée : jauges pour mesurer la déformation ou la pression, interféromètre laser pour des mesures locales de vitesse, accéléromètre embarqué permettant d'enregistrer la décélération du projectile qui pénètre la cible, mesures de champs, etc. Lors de ces essais, les matériaux subissent

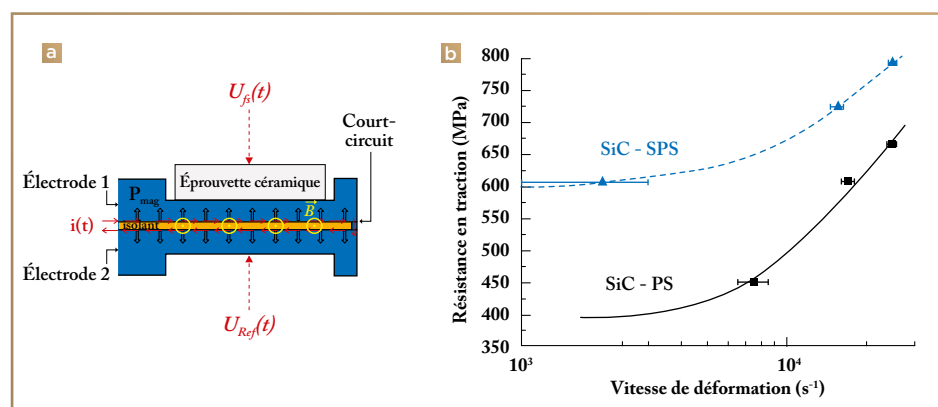


Figure 1

(a) Principe de l'essai d'écaillage pour l'étude de la fragmentation des céramiques : la décharge rapide d'un courant i intense se propageant sur la surface interne des électrodes induit un champ magnétique B ; leur combinaison se traduit par l'apparition d'une pression P_{mag} appliquée à l'électrode et transmise à l'éprouvette à tester. Une mesure de vitesse par interférométrie laser est réalisée sur la surface libre de l'échantillon U_{β} et une mesure de référence est réalisée sur l'électrode opposée U_{ref} . (b) Résultats obtenus pour deux carbures de silicium SiC obtenus par des procédés différents (PS ou SPS) : la résistance dynamique et la sensibilité à la vitesse de déformation sont intimement liées aux caractéristiques microstructurales.

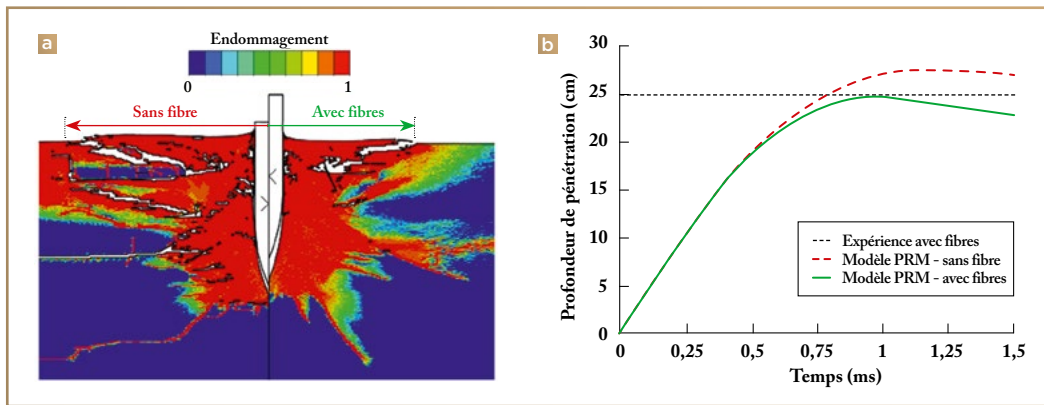


Figure 2

➤ Simulations numériques de l'impact d'un pénétrateur sur une cible en béton à ultrahaute performance avec et sans fibres. La prise en compte des fibres métalliques dans le modèle Pontiroli-Rouquand-Mazars (a) réduit l'étendue des dommages causés à la cible et le diamètre du cratère formé sur la face impactée (flèches) et permet de mieux restituer la décélération du projectile ainsi que (b) sa profondeur de pénétration dans la cible.

des chargements dynamiques complexes plus proches de l'application finale. En comparant les résultats expérimentaux avec les prévisions obtenues par simulation numérique, il est possible de valider les lois de comportement et d'endommagement des matériaux. Deux exemples illustrent cette démarche.

Le premier exemple est l'identification d'un modèle permettant de traiter la fragmentation dynamique des céramiques provoquée par un impact (figure 1a) 1. Les céramiques entrent souvent dans la conception de blindages de haut niveau de protection, qu'ils soient destinés aux combattants, ou qu'ils équipent des véhicules terrestres ou des avions. Ces matériaux présentent une très haute résistance dynamique en compression associée à une densité relativement faible. Toutefois, leur résistance en traction, généralement un ordre de grandeur inférieure à leur résistance dynamique en compression, et leur faible ténacité (quelques $\text{MPa} \cdot \text{m}^{3/2}$) mènent à une fragmentation intense lors d'un impact. Pour pouvoir simuler un impact balistique sur un blindage céramique, il faut nécessairement être capable de modéliser finement l'endommagement dynamique provoqué dans la céramique.

Bien que les céramiques soient utilisées dans les blindages depuis de nombreuses années (principalement des alumines, des carbures de silicium et des carbures de bore), les liens entre la microstructure et le comportement dynamique sont mal maîtrisés. Dans l'étude 3 menée grâce au générateur électrique de pression intense (Gepi) du CEA – Gramat exploitant les principes des hautes puissances pulsées 4, des essais d'écaillage ont été menés sur une gamme de vitesses de déformation allant de 10^3 à 10^4 s^{-1} 2. Les matériaux étudiés dans 3 sont deux carbures de silicium (SiC) mis au point par Saint-Gobain à partir d'une unique poudre de SiC et de deux procédés de frittage (PS : frit-

tage naturel, SPS : frittage flash). Les essais réalisés sur ces deux microstructures grâce au Gepi ont permis de constater des écarts notables en matière de résistance dynamique et de sensibilité à la vitesse de déformation (figure 1b), et de faire le lien avec le niveau de densification ($> 99\%$ pour le SiC-SPS contre $98,5\%$ pour le SiC-PS) qui apparaît comme le paramètre microstructural le plus influent. Ces essais de caractérisation à l'échelle du matériau ont permis d'identifier et d'évaluer la pertinence d'un modèle d'endommagement décrivant les mécanismes activés au cours de la fragmentation dynamique 3. Ce modèle peut ensuite être exploité pour mieux comprendre l'influence de la microstructure sur le comportement balistique de blindages utilisant du SiC.

Le second exemple concerne l'extension d'un modèle dédié aux bétons. Ce modèle est utilisé pour simuler des agressions intenses comme une explosion au contact d'une structure ou l'impact d'un pénétrateur sur un bâtiment (figure 2a). Le modèle Pontiroli-Rouquand-Mazars (PRM) a été mis au point dès le milieu des années 1990. Il a ensuite été étendu pour prendre en compte le comportement plastique et la densification (compaction) constatée sous les fortes pressions de confinement 5.

Les bétons à ultrahaute performance (BUHP) présentent des résistances quatre à six fois supérieures aux bétons standards. Ils sont de plus en plus utilisés pour des ouvrages d'art ou des façades impossibles à concevoir avec un béton standard, mais ils peuvent aussi permettre d'augmenter le niveau de protection d'infrastructures sensibles. Les BUHP, comme le Ductal-FM®, sont souvent renforcés par des fibres métalliques. Ces fibres contribuent à résister à l'ouverture des fissures lors d'une sollicitation dynamique par des mécanismes de pontage, limitant ainsi l'étendue des dommages.

Les travaux récents ont eu pour objectif de proposer une extension du modèle PRM

pour un BUHP fibré en s'appuyant sur un ensemble de résultats d'essais de caractérisation menés sur ce matériau 5. Outre la validation à l'échelle du matériau, le modèle a pu être confronté à des résultats expérimentaux à l'échelle de la structure puisqu'une campagne d'essais d'impact a été conduite au CEA – Gramat sur le BUHP fibré. Les confrontations entre résultats expérimentaux et prévisions numériques illustrent le bénéfice apporté par la nouvelle formulation du modèle (figure 2) 6.

RÉFÉRENCES

- 1 J.-L. ZINSZNER, *Identification des paramètres matériau gouvernant les performances de céramiques de blindage*, Thèse de doctorat de l'université de Lorraine, soutenue le 19 décembre 2014.
- 2 B. ERZAR, E. BUZAUD, "Shockless spalling damage of alumina ceramic", *Eur. Phys. J. Special Topics*, **206**, p. 71-77 (2012).
- 3 J.-L. ZINSZNER *et al.*, "Strain rate sensitivity of the tensile strength of two silicon carbides: Experimental evidence and micromechanical modelling", *Phil. Trans. R. Soc. A*, **375**, 20160167 (2017).
- 4 F. LASSALLE *et al.*, « Hautes puissances pulsées pour l'étude des environnements sévères », *Revue chocs*, **47**, p. 57-63 (2016).
- 5 C. PONTIROLI *et al.*, "Predicting concrete behaviour from quasi-static loading to hypervelocity impact: An overview of the PRM model", *Eur. J. Environ. Civil Eng.*, **14**, p. 703-727 (2010).
- 6 B. ERZAR *et al.*, "Ultra-high performance fibre-reinforced concrete under impact: Experimental analysis of the mechanical response in extreme conditions and modelling using the PRM model", *Phil. Trans. R. Soc. A*, **375**, 20160173 (2017).