

Impacts hypervéloces sur du graphite : expériences et simulations

D. HÉBERT - G. SEISSON - I. BERTRON - J.-M. CHEVALIER - L. HALLO / CEA – Cesta
 L. VIDEAU - P. COMBIS / CEA – DAM Île-de-France
 F. GUILLET / CEA – Le Ripault
 M. BOUSTIE / ENSMA, Institut PPRIME, Université de Poitiers
 L. BERTHE / ENSAM ParisTech, Paris

La modélisation des impacts hypervéloces couvre une large gamme d'applications, dont la protection de satellites contre les débris spatiaux et celle d'équipements au sein des lasers de puissance tels que le LMJ. Le carbone, utilisé dans de nombreux matériaux composites, présente ainsi un fort intérêt. La compréhension de son comportement est donc une étape indispensable pour interpréter et simuler l'endommagement dans les composites à l'échelle mésoscopique. Nous présentons ici des résultats expérimentaux d'impacts à plus de 4 km/s d'une bille d'acier sur un graphite poreux. Des tomographies ont permis d'observer que les débris de la bille d'acier étaient présents sous la surface endommagée du matériau. Les simulations numériques permettent d'interpréter et de restituer les principaux phénomènes. Nous montrons enfin l'intérêt d'expériences de choc laser pour ajuster certains coefficients du modèle.

Le comportement des métaux sous impacts hypervéloces a été étudié depuis de nombreuses années, mais les publications concernant les matériaux fragiles sont plus rares. Toutefois, en raison de leur utilisation croissante, les matériaux composites à base de carbone ouvrent un nouveau domaine d'études [1]. Mais, sur le plan de la modélisation, ils nécessitent une

bonne compréhension du comportement de leurs constituants, et notamment le carbone. Ainsi, pour répondre au besoin de mieux comprendre le comportement du graphite sous impacts hypervéloces, nous présentons une étude expérimentale et les simulations associées [2]. Le matériau considéré est un graphite commercial, macroscopiquement homogène et isotrope, et qui contient environ 20 % de porosité.

Essais MICA

Des expériences d'impact de billes ont été réalisées avec le lanceur MICA, situé au CEA – Cesta, qui permet de projeter une bille en acier de diamètre 0,5 mm jusqu'à 5 km/s. Nous considérons ici des impacts en incidence normale. Les cratères sont ensuite analysés par tomographie X, méthode non destructive qui permet de voir l'état de fissuration, mais qui a également permis de révéler la présence de débris de bille sous la surface du cratère (figure 1). Le piégeage du projectile dans du carbone avait déjà été signalé [3], mais pour des vitesses d'impact sensiblement plus faibles (600 à 1 500 m/s), et aucune interprétation de ce mécanisme n'était proposée. Les simulations hydrodynamiques présentées ci-après ont pour but de clarifier cette question.

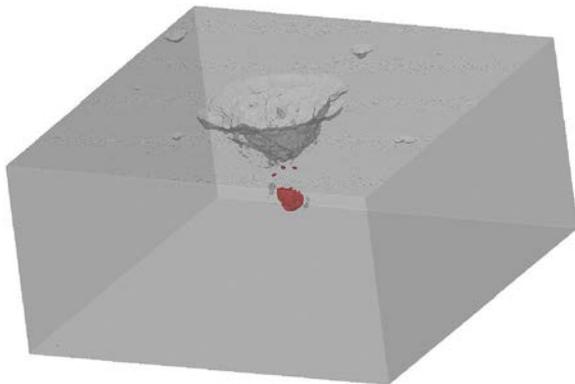
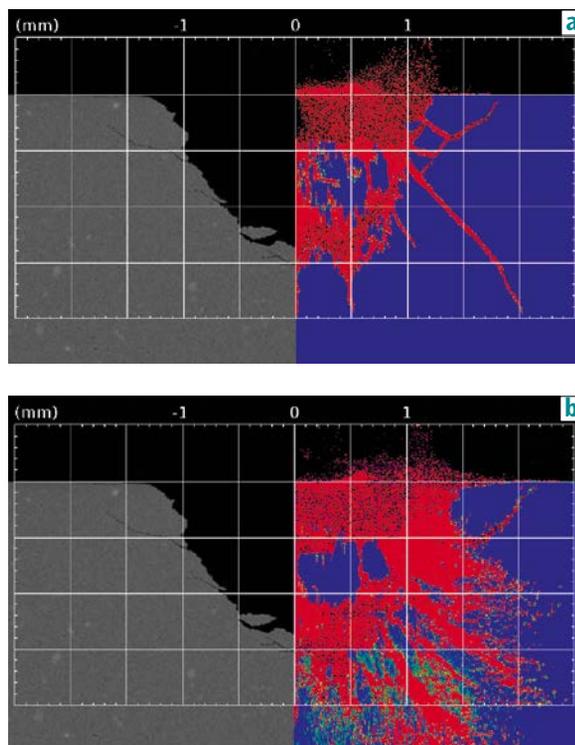


Figure 1. Reconstitutions volumétriques à partir d'une tomographie d'échantillon testé sur MICA (impact à 4 100 m/s). Les restes du projectile sont en rouge. L'échantillon est en gris transparent.

Figure 3. Simulation du tir laser à 5 TW/cm^2 (tache focale 2 mm).
Les images (a) et (b) présentent sur leur partie gauche une coupe du cratère obtenue par tomographie X; les parties droites représentent les résultats de simulations réalisées avec deux jeux de paramètres pour le modèle de Weibull qui donnaient des résultats identiques pour l'essai MICA (les zones bleues sont intactes et les zones rouges sont endommagées).



Modélisation, simulations et validation

Nous utilisons un modèle élastoplastique poreux ajusté à partir d'expériences de chocs de plaques et de compaction statique [4]. La rupture fragile est traitée par un modèle de Weibull : dans le régime de traction dynamique, cette approche probabiliste permet de prendre en compte une dépendance à la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$. Ces modèles ont été implémentés dans le code de dynamique rapide Hésione. Les simulations 2D axi présentées ici ont été faites avec un schéma eulérien.

La simulation des essais MICA met en évidence un mouvement de débris de graphite derrière le projectile, conduisant au rebouchage du cratère (figure 2). Ce résultat est permis par le modèle de Weibull, et le valide dans la gamme $\dot{\epsilon} \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$.

Une expérience complémentaire a été réalisée avec le laser LULI2000 de l'École polytechnique, où la focalisation du faisceau sur l'échantillon permet d'atteindre un régime différent ($\dot{\epsilon} \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$), qui correspond à des vitesses d'impact plus élevées, non accessibles avec MICA. La simulation de cet essai avec Hésione a été faite en imposant à la surface du matériau une loi de pression équivalente à celle générée par le laser [5]. On constate

que le résultat est très sensible aux coefficients de Weibull (figure 3), ce qui permet donc de mieux les ajuster.

Conclusion

Nous avons montré l'existence d'un phénomène de piégeage du projectile lors d'un impact à 4 km/s d'une bille d'acier sur du graphite. Nous avons également mis en évidence que ce phénomène est possible à simuler avec un modèle de rupture fragile. Enfin, nous avons montré l'intérêt complémentaire des essais laser pour l'ajustement des paramètres associés.

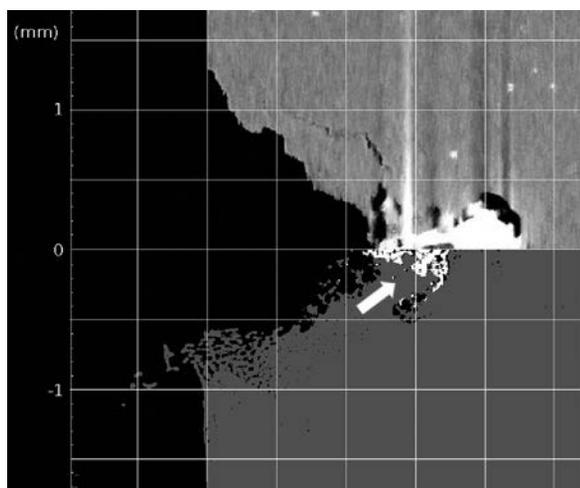


Figure 2. Comparaison expérience/calcul.
Partie haute : tomographie. Partie basse : simulation. Le projectile est en blanc, le graphite en gris et le vide en noir. Le projectile arrive de la gauche. La flèche indique le mouvement de matière.

Références

- [1] D. NUMATA *et al.*, "HVI tests on CFRP laminates at low temperature", *Int. J. Impact Eng.*, **35**, p. 1695-1701 (2008).
- [2] G. SEISSON *et al.*, "Dynamic cratering of graphite: Experimental results and simulations", *Int. J. Impact Eng.*, **63**, p. 18-28 (2014).
- [3] Y. TANABE *et al.*, "Crater formation of carbon materials by impact of a high velocity sphere", *Carbon*, **33**, p. 1547-1552 (1995).
- [4] D. HÉBERT *et al.*, "Plate impact experiments and simulation on porous graphite", *APS-SCCM Conf. Proc.*, Seattle, July 2013.
- [5] G. SEISSON *et al.*, "Modeling of laser-driven shocks into porous graphite", *APS-SCCM Conf. Proc.*, Seattle, July 2013.