

Explosifs comprimés : comportement plastique du HMX

J. VIAL - D. PICART / CEA – Le Ripault

P. BAILLY / PRISME, INSA Centre Val de Loire, Bourges

F. DELVARE / Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6139, Caen

L'allumage des explosifs soumis à une agression mécanique (chute, impact, choc) dépend fortement du comportement des constituants (cristaux énergétiques, liant) de ces matériaux composites. Cette étude est un premier pas vers une compréhension du comportement des cristaux de HMX (octogène) lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations quasi statiques. Nous nous appuyons sur (i) des observations expérimentales réalisées en temps réel et à l'échelle de la microstructure lors d'un essai inversé de compression dans la tranche et (ii) des simulations numériques. Nous démontrons que la réponse du matériau composite enregistrée lors d'un essai macroscopique fortement confiné correspond au comportement « isotrope moyen » des cristaux de HMX.

L'explosif étudié, à base de HMX (ou cyclo-tétraméthylène-tétranitramine), dont la composition chimique brute est $C_4H_8N_8O_8$, est hétérogène. Il est fabriqué par pressage d'un mélange de grains de HMX (~ 95 %) et d'un liant (porosité finale ~ 2 %). Les essais d'impact ont montré qu'il est difficile de prévoir *a priori* le début des réactions pyrotechniques. La sécurité des systèmes pyrotechniques passe donc par de coûteuses campagnes expérimentales. Notre objectif est de développer les modèles permettant de prédire l'allumage de ces matériaux. Notre démarche combine étroitement des expérimentations réalisées à l'échelle de la microstructure et la simulation numérique de la déformation et de l'échauffement à cette échelle.

Expérimentations

Afin de mesurer les déformations des cristaux lors d'une sollicitation, un essai de compression a été développé. L'échantillon est placé dans un montage rigide, face à un canal (figure 1). Une machine permet de pousser l'échantillon et le contraint à contourner l'angle formé par l'entrée du canal. Dans cette zone, le matériau est fortement cisailé. Le montage est fermé par une vitre. Elle confine l'échantillon et permet l'observation par un microscope optique à fort grandissement. L'expérience met en évidence le développement d'un processus de plasticité dans certains des grains de HMX (figure 2).

Représentation numérique du matériau

Les grains ont une distribution granulométrique allant de 1 à 600 μm . Nous choisissons une représentation bi-phasique du matériau. Les plus gros

grains, de taille supérieure à 200 μm et représentant 50 % en volume, sont répartis dans une matrice homogène (dans la réalité formée des plus petits grains, du liant et de la porosité). L'analyse des images ne permet pas de retrouver automatiquement la forme des grains de HMX. Pour cela, les grains sont assimilés à des ellipses. Leurs centre et orientation sont déterminés manuellement sur les images.

Concernant le comportement mécanique plastique des grains de HMX, trois hypothèses ont été testées. Les deux premières proviennent d'études

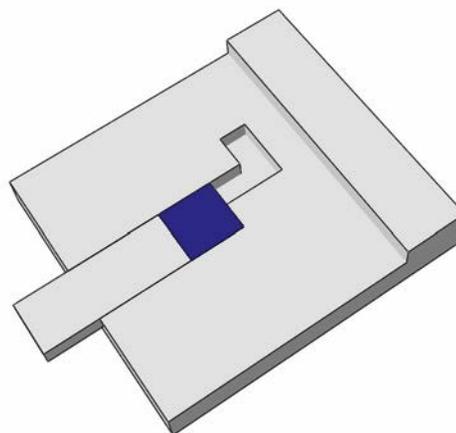


Figure 1. Schématisation de l'essai de compression dans la tranche. L'échantillon ($10 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$) en bleu est disposé dans un montage rigide et fixe, face à un canal. Il est poussé par un piston, actionné par une machine. Une vitre supérieure permet le confinement de l'échantillon et l'observation de sa microstructure.

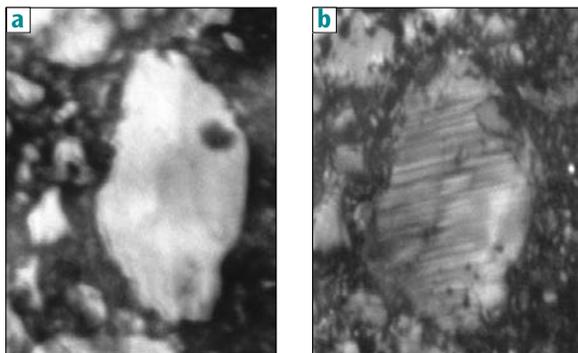


Figure 2. Observation d'un grain avant (a) et après compression (b), avec manifestation de sa déformation plastique (bandes rectilignes).

antérieures [1,2] où le comportement est supposé élastique et parfaitement plastique avec une limite d'élasticité de 135 ou 260 MPa. La troisième hypothèse suppose que la courbe contrainte-déformation enregistrée sur un échantillon massif du composite, lors d'un essai triaxial fortement confiné, traduit le comportement isotrope plastique « moyen » du HMX. La limite d'élasticité est égale à 70 MPa et l'écroutissement isotrope est non linéaire. La contrainte équivalente de 260 MPa est atteinte pour une déformation plastique de 0,25.

Validation du comportement

La validité de l'hypothèse d'un comportement élastique plastique non linéaire du HMX est testée en comparant les images obtenues lors d'un essai de compression dans la tranche avec la simulation (figure 3). Cette dernière a été réalisée avec le code aux éléments finis Abaqus, en régime quasi-statique et pour une cinématique 2D plane. La plupart des grains qui sont de couleur verte (resp. bleue) sont en phase élastique (resp. déformation plastique non nulle) à la fois dans la simulation et dans l'essai. Par contre, les grains de couleur rouge sont élastiques dans la simulation alors que l'expérience montre des bandes de plasticité et inversement pour les grains de couleur orange. La cartographie a été obtenue avec notre hypothèse. Un bon accord est observé notamment en constatant que (i) quelques instants après tous les grains oranges plastifient durant l'essai et que (ii) le plus gros grain rouge se situe dans une zone où, expérimentalement, l'endommagement est important (ce phénomène n'est pas modélisé ici). L'accord calcul/expérience est moins bon pour les autres hypothèses.

Perspectives

Cette étude a permis de mieux comprendre le comportement élasto-plastique des cristaux de HMX [3]. À faible confinement, la matrice est bien plus déformable que le HMX. La modélisation du comportement de ce constituant, lui-même hétérogène, doit maintenant être améliorée. Ses grandes déformations sont probablement le siège des mécanismes dissipatifs pouvant conduire, par frottement des plus petits grains entre eux, à un échauffement du matériau et à son allumage. Enfin, l'amélioration des simulations devra passer par une description plus réaliste et donc tridimensionnelle de la microstructure.

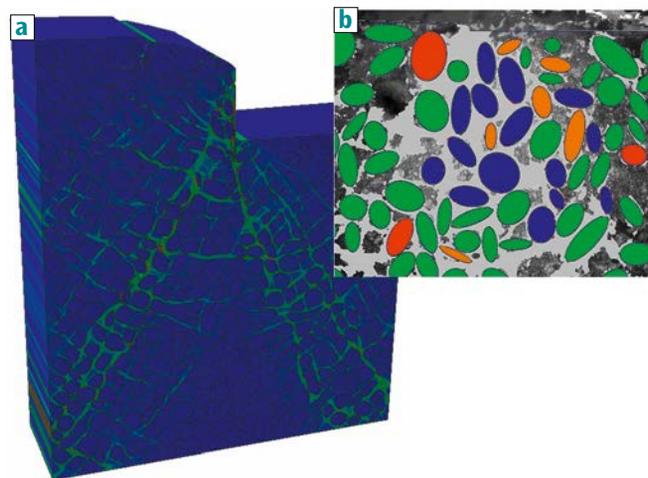


Figure 3. (a) : Simulation numérique de l'essai. (b) : État mécanique des plus gros grains pour une limite d'élasticité de 70 MPa et un écroutissement isotrope non linéaire. Un bon accord expérience/calcul est observé pour les grains de couleurs verte et bleue; un mauvais accord pour les grains rouges et orange. Si le calcul est poursuivi quelques instants, seuls les trois grains rouges persistent.

Références

- [1] R. MENIKOFF, T. SEWELL, "Constituent properties of HMX needed for meso-scale simulations", *Combust. Theor. Model.*, **6**, p. 103–125 (2002).
- [2] S. J. P. PALMER, J. E. FIELD, "The deformation and failure of β -HMX", *Proc. R. Soc., A* **383**, p. 399–407 (1982).
- [3] J. VIAL, D. PICART, P. BAILLY, F. DELVARE, "Numerical and experimental study of the plasticity of HMX during a reverse edge-on impact test", *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, **21**(4), 045006 (2013).