

Analyse d'un test *in situ* de double-torsion par tomographie X et corrélation d'images 3D

P. Leplay^{1,2,3}, J. Réthoré¹, S. Meille², M.-C. Baietto¹, J. Adrien², E. Maire²

¹ Université de Lyon, CNRS INSA-Lyon, LaMCoS UMR 5259, France, {paul.leplay,julien.rethore,marie-christine.baietto}@insa-lyon.fr

² Université de Lyon, CNRS INSA-Lyon, MATEIS UMR 5510, France, {sylvain.meille,jean.adrien,eric.maire}@insa-lyon.fr

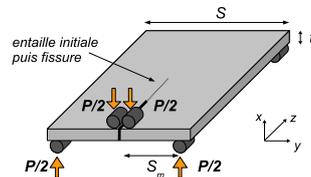
³ Saint-Gobain, CREE, Cavaillon, France

Résumé — La double-torsion est utilisée pour caractériser la propagation de fissure dans les céramiques. Ce test n'ayant été que peu étudié d'un point de vue mécanique dans la littérature, un prototype a été fabriqué pour réaliser un test *in situ* dans un tomographe. Les scans ainsi obtenus au cours du chargement sont associés à différentes techniques de corrélation d'images 3D pour obtenir des informations sur la cinématique globale, la forme du front de fissure ou encore les facteurs d'intensité de contraintes.

Mots clés — Corrélation d'images 3D, Double-torsion, Tomographie X.

1 La double-torsion : état de l'art bibliographique et prototype

- La double-torsion est principalement utilisée pour caractériser la propagation de fissure dans les céramiques fragiles [6]. Contrairement aux tests de traction et de flexion, il est possible avec ce test de contrôler et de stabiliser la propagation d'une fissure même pour les céramiques les plus fragiles. En effet, le comportement en pointe de fissure est en première approximation indépendant de la longueur de fissure d'après la Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture (fig.1).



$$K_I = P.S_m \cdot \left(\frac{3(1+\nu)}{t^4 S \psi(t)} \right)^{1/2} \quad (eq.1)$$

FIGURE 1 – Schéma, notations et équation pour un test de double-torsion

où K_I est le facteur d'intensité de contraintes en mode I, P est le chargement mécanique, S_m le bras de levier, ν le coefficient de Poisson, t et S l'épaisseur et la largeur de l'échantillon, $\psi(t)$ une fonction de correction. De nombreuses céramiques ont ainsi pu être caractérisées et comparées [2]. Très peu étudié d'un point de vue mécanique dans la littérature [1], l'analyse habituelle de ce test s'appuie pourtant sur de nombreuses hypothèses concernant la cinématique globale et la forme du front de fissure.

- Pour apporter une meilleure compréhension, vérifier les hypothèses habituelles et proposer une nouvelle exploitation couplée entre expérimental et numérique de la double-torsion, un prototype a été fabriqué pour réaliser un test *in situ* dans un tomographe. Au lieu d'être horizontal, l'échantillon est vertical pour pouvoir tourner devant le faisceau de rayons X du tomographe. Il est possible d'obtenir ainsi plusieurs scans 3D au cours du chargement afin d'observer la propagation de la fissure (fig.2).

2 Analyse par corrélation d'images 3D : principe et résultats

- A partir de deux scans 3D (f l'état de référence et g l'état déformé) et s'appuyant sur le principe de conservation du flux optique (eq.2), il est possible de remonter au champ de déplacement u par des méthodes de corrélation d'images récemment étendues à la 3D [4]. Une approximation v du champ de déplacement est obtenue par minimisation d'un résidu de corrélation (eq.3).

$$g(x+u(x)) = f(x) \quad (eq.2) \quad v(x) = \text{Arg Min} \left(\iiint_{\Omega} [f(x) - g(x+v(x))]^2 dx \right) \quad (eq.3)$$

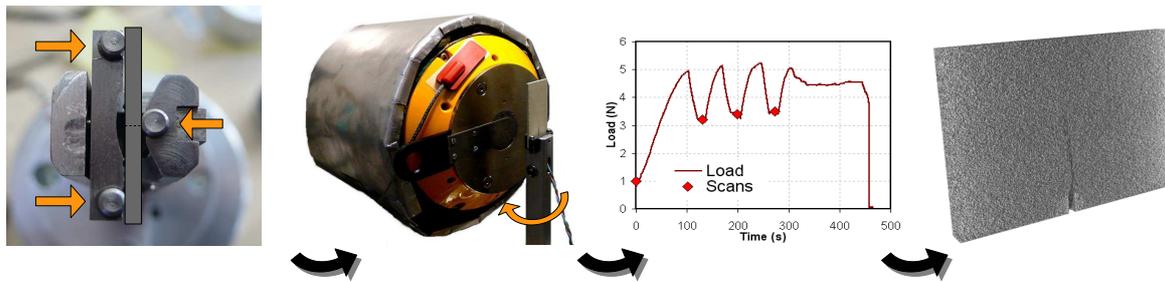


FIGURE 2 – Prototype de double-torsion in situ dans un tomographe X

- L'échantillon testé est à base de titanate d'aluminium, une céramique quasi-fragile à température ambiante. L'épaisseur t est de $1,60 \pm 0,02$ mm. Les nombreux pores (porosité $\approx 50\%$) sont utilisés comme marqueurs volumiques pour la corrélation. En utilisant un maillage d'hexahédres de 16 voxels de côté, le champ de déplacement v est obtenu à partir de fonctions de formes de type éléments finis C8 (fig.3). Une discontinuité est visible sur la face en traction de l'échantillon, révélant la propagation de la fissure. Par contre, il n'y a pas de discontinuité sur la face en compression, indiquant que la fissure n'est pas débouchante sur l'autre face. En recherchant où se situent les déformations maximales (seuil à $\epsilon_{yy} > 0,01$) apparaît une première esquisse du front de fissure.

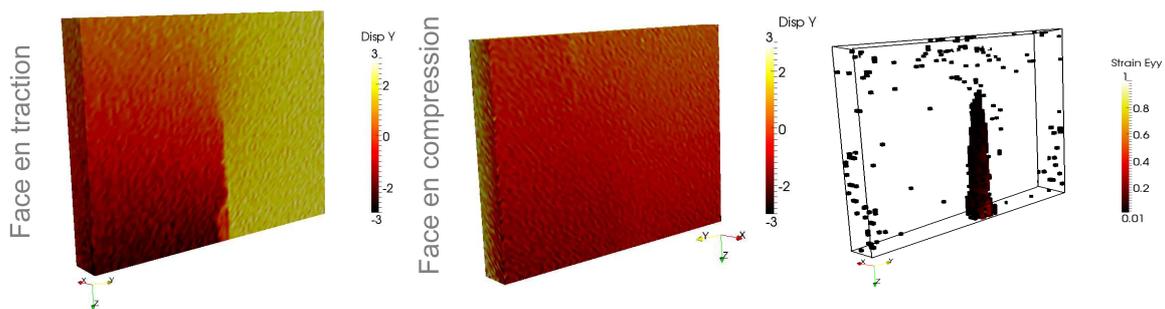


FIGURE 3 – Déplacement v_y (en voxel) et seuil sur ϵ_{yy} entre le scan initial et le dernier scan

Les trois prochaines étapes sont une meilleure détection du front de fissure à partir de la carte d'erreur [4], l'apport de la régularisation mécanique [5] à partir d'une loi de comportement déjà identifiée par corrélation [3] et l'extraction des facteurs d'intensité de contraintes le long du front de fissure [4]. En plus de pouvoir vérifier les hypothèses habituelles de la littérature, ces trois étapes permettront de proposer une exploitation plus fine de la double torsion grâce à un couplage entre expérimental et numérique.

Références

- [1] M. Ciccotti, *Realistic Finite-Element model for the double-torsion loading configuration*, Journal of the American Ceramic Society 11(83), 2737-2744, 2000.
- [2] J. Chevalier et al. *Double-torsion testing a 3Y-TZP ceramic*, Ceramics International 2(22), 171-177, 1996.
- [3] P. Leplay et al. *Damage law identification of a quasi brittle ceramic from a bending test using Digital Image Correlation*, Journal of the European Ceramic Society (30), 2715-2725, 2010.
- [4] J. Rannou et al. *Three dimensional experimental and numerical multiscale analysis of a fatigue crack*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (199), 1307-1325, 2009.
- [5] J. Réthoré et al. *An extended and integrated digital image correlation technique applied to the analysis of fractured samples*, European Journal of Computational Mechanics (18), 285-306, 2009.
- [6] A. Shyam, E. Lara-Curzio. *The double-torsion testing technique for determination of fracture toughness and slow crack growth behavior of materials : A review*, Journal of Materials Science 13(41), 4093-4104, 2006.