



HAL
open science

Etude expérimentale et modélisation de la fissuration d'un polymère thermoplastique

Arnaud Coq, Julie Diani, Stella Brach

► **To cite this version:**

Arnaud Coq, Julie Diani, Stella Brach. Etude expérimentale et modélisation de la fissuration d'un polymère thermoplastique. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04281716

HAL Id: hal-04281716

<https://hal.science/hal-04281716v1>

Submitted on 14 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude expérimentale et modélisation de la fissuration d'un polymère thermoplastique

A. COQ, J. DIANI, S. BRACH

Laboratoire de Mécanique des Solides, CNRS UMR 7649, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Route de Saclay, 91128 Palaiseau, France, arnaud.coq@polytechnique.edu

Résumé :

Une étude expérimentale du comportement et de la fissuration d'un polymère thermoplastique, servant de joint pour pale éolienne, est proposée. En traction uniaxiale, le joint montre un comportement viscoplastique. Lors d'essais de fissuration en mode d'ouverture I, le joint semble montrer de la dissipation plastique. Par conséquent, une analyse par approche variationnelle de l'essai de fissuration est proposée afin d'estimer l'impact de la prise en compte du comportement viscoplastique du joint par rapport à un comportement élastique linéaire.

Abstract :

An experimental study of the mechanical behavior and of the fracture of a thermoplastic polymer, used as hard joint for wind turbine blade, is proposed. In uniaxial tension, the joint exhibits a viscoplastic behavior. During mode I fracture test, the joint seems to show some plasticity. Consequently, a variational approach for the fracture analysis is offered in order to estimate the impact of the account of the material viscoplastic behavior compared to a linear elastic behavior.

Mots clefs : Polymères, Viscoplasticité, Fissuration, Approche variationnelle de la fissuration, Corrélation d'images

1 Introduction

Afin de d'améliorer le recyclage des pales éoliennes, des joints thermoplastiques de même natures que le polymère imprégnant les fibres de verre des pales éolienne sont actuellement développés. On s'intéresse à la tenue mécanique de ces joints visant à remplacer les époxy thermodures. Pour ce faire, un polymère acrylate, vitreux a température ambiante, ciblant des applications de joints a été mis en forme pour des essais mécaniques de comportement et de fissuration. Le joint montre un comportement viscoplastique et une fissuration qui semble pouvoir être caractérisée par un taux de restitution d'énergie critique. Cependant, les résultats dépendent de la vitesse de sollicitation. Par conséquent, une analyse de type variationnelle de la fissuration est proposée afin de simuler la fissuration d'un essai DCDC dans le cas d'un matériau élastique et d'un matériau viscoplastique.

2 Caractérisation expérimentale

On s'intéresse à un polymère thermoplastique méthacrylate ayant une température de transition vitreuse largement au-dessus de la température d'application. Le matériau bi-composant est fourni par Arkema, mélangé et mise en forme au laboratoire à l'aide d'un pistolet bi-vis pour injection de colle. Des éprouvettes H3 standard ont été utilisées pour la caractérisation du comportement sous chargement uniaxial et des éprouvettes parallélépipédiques trouées en leur centre (éprouvettes DCDC) ont été retenues pour la caractérisation de l'énergie de fissuration.

2.1 Comportement uniaxial du polymère thermoplastique

Des essais de traction uniaxiale ont été réalisés sur éprouvettes H3 à l'aide d'une machine conventionnelle Instron 5967. La mesure de déformation est obtenue par extensométrie vidéo, l'effort est mesuré par une cellule de force 10 kN et l'essai est contrôlé à vitesse de traverse constante. Nous avons obtenu une bonne reproductibilité du comportement et une illustration des courbes de la contrainte ingénieure en fonction de la déformation en fonction de la vitesse de traverse est proposée Figure 1.

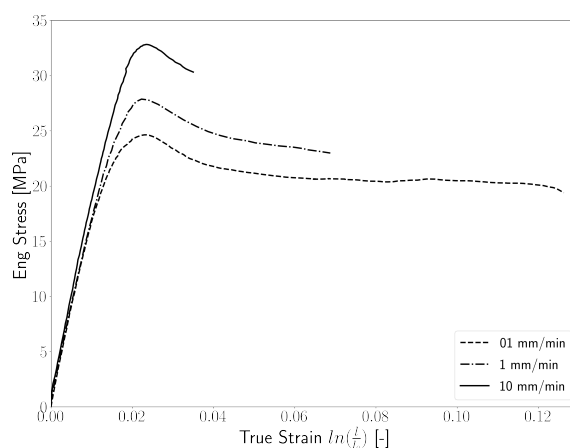


FIGURE 1 – Résultat de tests monotones en traction unilatérale à différentes vitesses.

On remarque sur la Figure 1 que le comportement élastique du matériau est peu dépendant de la vitesse de chargement alors que la réponse plastique l'est de façon significative. Le comportement du matériau illustré en Figure 1 est donc caractéristique d'un comportement viscoplastique. Un tel comportement pourra être représenté par une loi de type Johnson-Cook [1, 2] au vu des faibles déformations mises en jeu.

2.2 Etude de la fissuration

Le test DCDC (Double cleavage drilled compression) est un essai mécanique utilisé pour évaluer les propriétés de rupture en mode d'ouverture I de matériaux fragiles. Il a été initialement développé pour les verres [3], puis appliqué aux polymères vitreux [4, 5]. Un échantillon, prisme de dimensions longueur L , largeur $2 \times w$, et épaisseur t ayant un trou central de rayon R et deux pré-fissures aux pôles du trou ((Figure 2) est soumis à une contrainte de compression uniaxiale, notée σ . Lors du chargement, l'avancement des pré-fissures caractérisée par leur longueur a est enregistré. Deux vitesses de chargement ont été étudiées, $0.5 \mu\text{m}/\text{s}$ et $5 \mu\text{m}/\text{s}$ afin d'observer l'impact de la vitesse de chargement sur les

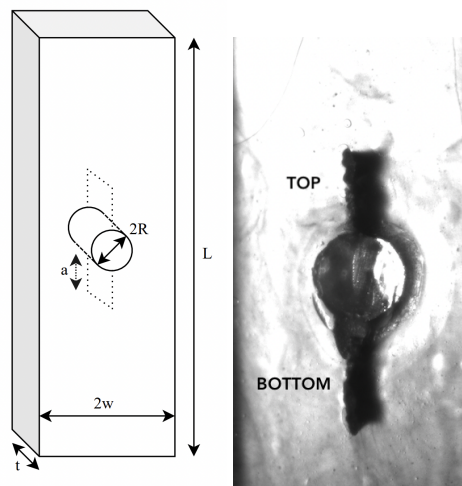


FIGURE 2 – Gauche : Illustration de la géométrie des échantillons utile à l’essai DCDC cité le papier, Droite : Illustration d’une fissure ce propageant dans le matériau d’intérêt lors d’un essai DCDC.

propriétés à rupture en mode d’ouverture I. Pour chaque vitesse de chargement, quatre échantillons ont été testés.

Une analyse de type Griffith en élasticité est possible. Après approximation de résultats numériques obtenus par éléments finis, différentes expressions analytiques ont été proposées pour estimer la valeur de la ténacité K_{Ic} [6, 7]. On peut citer l’expression développée par Wang et al. [8] dont les limites géométriques de validité du modèle incluent celles de nos échantillons.

$$\frac{\sigma\sqrt{\pi R}}{K_I} = \frac{1}{1 + \frac{a}{R}} \left(A_1 + B_1 \frac{a}{R} \right) \quad (1)$$

avec $A_1 = 0.034 + 1.322 \frac{w}{R} - 0.234 \left(\frac{w}{R} \right)^2$ et $B_1 = -1.453 + 1.751 \frac{w}{R} - 0.138 \left(\frac{w}{R} \right)^2$

Le post-traitement de l’essai consiste à tracer K_I en fonction de la longueur de la fissure suivant l’Eq. (1). La valeur au plateau de $K_I \left(\frac{a}{R} \right)$ représente la valeur critique du taux de restitution d’énergie K_{Ic} . Une représentation du facteur d’intensité des contraintes K_I estimé à partir de l’expression Eq. (1), correspondant à nos essais est montrée en Figure 3. L’écart type des mesures de K_{Ic} pour chaque vitesse est noté sur chaque courbe expérimentale grâce aux quatre essais réalisés. On observe que la vitesse de chargement a un impact significatif sur la valeur du taux de restitution d’énergie incompatible avec une analyse élastique.

Cette estimation de K_{Ic} ne prend en compte que le comportement élastique linéaire du matériau et néglige la dissipation plastique possible. Afin d’estimer cette dernière et décider de la valeur de K_{Ic} pertinente, nous proposons d’utiliser une modélisation par approche variationnelle de la fissuration en deux temps. Dans un premier temps, nous observons le champs de déformation par corrélation d’image lors de la propagation de la fissure afin d’apprécier si le champs de déformation correspond à celui d’un comportement élastique linéaire. Dans un second temps, la modélisation de la fissuration par approche variationnelle, dans le cas du comportement élastique puis du comportement viscoplastique permettra d’estimer la dissipation plastique.

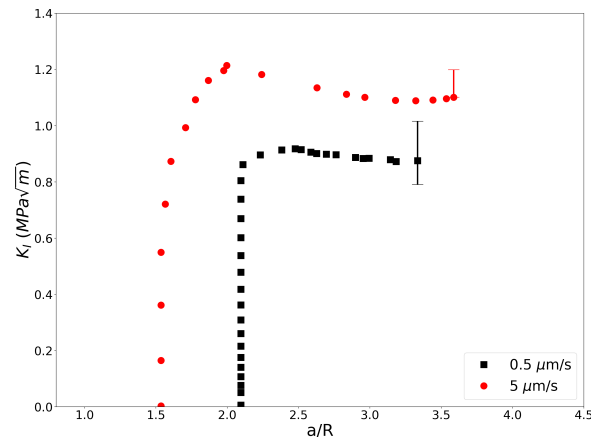


FIGURE 3 – Résultats expérimentaux de test DCDC à différentes vitesses de chargement.

2.3 Mesures par corrélation d'images

Un mouchetis à l'aérographe a été déposé sur les échantillons soumis à une compression (Figure 4). Les échantillons étudiés en compression sont des prismes troués avec et sans fissure. Les vitesses de déplacement de traverse appliquées sont similaires à celles des essais DCDC. L'analyse par corrélation d'image des champs de déformation a été réalisée à l'aide du logiciel Ncorr (Logiciel Matlab open-source) [9].

Les champs de déformations obtenus permettent de connaître les déformations locales en surface du matériau. Une illustration du champ de déformation ε_1 lors d'une compression sans fissure dans le domaine élastique est proposée en Figure 4. Une comparaison des champs élastique, plastique sur éprouvette fissurée et non fissurée permettra d'estimer la déformation plastique éventuelle pendant la propagation de fissure.

3 Modélisation

3.1 Approche variationnelle en champs de phase

La méthode présentée ici est basée sur la méthode variationnelle de la rupture proposée par Francfort et Marigo [10]. Les fissures ou discontinuités de déplacement sont régularisées par une formulation continue dans l'espace, en introduisant un champ de phase scalaire régularisé. Le problème de régularisation de l'approche variationnelle de la fracture fragile introduite par Bourdin et al. [11] [12] se présente sous la forme d'une minimisation de l'énergie totale du solide fissuré :

$$\xi_l(\underline{u}, \alpha) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \underline{\underline{\epsilon}} : a(\alpha) C : \underline{\underline{\epsilon}} d\Omega + \int_{\Omega} \frac{3G_c}{8} \left(\frac{w(\alpha)}{l} + l |\nabla \alpha|^2 \right) d\Omega \quad (2)$$

$$P_l : (\underline{u}^*, \alpha^*)_l = \underset{\underline{u} \in K_u ; \dot{\alpha} \geq 0}{\operatorname{argmin}} \xi_l(\underline{u}, \alpha) \quad (3)$$

avec les deux variables d'état \underline{u} le champ de déplacement et α le champ d'endommagement, $\epsilon = (\nabla \underline{u} + \nabla \underline{u}^T) / 2$ le tenseur symétrique du gradient de déformation en petites déformations, C le ten-

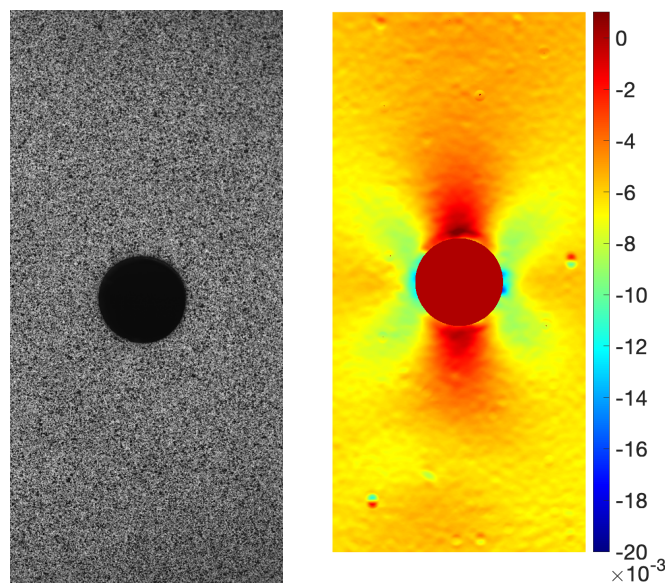


FIGURE 4 – Gauche : Mouchetis réalisé à l’aérogaphe sur un échantillon troué, Droite : Champ de déformation ε_1 expérimental obtenu par corrélation d’images numériques sur un test de traction d’un échantillon troué.

leur élastique, et G_c le taux de restitution d’énergie critique. Le paramètre d’endommagement α varie de 0 (matériau non endommagé) à 1 (complètement fissuré). Le paramètre l est un paramètre de régularisation strictement positif. La fonction $a(\alpha)$ est une fonction qui rend compte de la dégradation de l’énergie élastique lorsque le matériau s’endommage, et $w(\alpha)$ est une fonction strictement continue et monotone. Ces fonctions sont définies selon $a(0) = 1$, $a(1) = 0$, $w(0) = 0$, and $w(1) = 1$. Le problème de la rupture est résolu en minimisant alternativement la fonction d’énergie totale de l’équation (2) par rapport aux deux variables d’état \underline{u} et α .

3.2 Simulation d’un test de rupture

La modélisation par éléments finis a été réalisée dans un premier temps dans le cadre de l’élasticité linéaire isotrope en 2D. FEniCS [13], le solveur d’équations aux dérivés partielles est utilisé pour l’implémentation. La modélisation d’un test DCDC se fait à partir d’une demi-éprouvette pré-entallée. Le maillage a été réalisé à l’aide d’éléments triangulaires grâce à Gmsh. La fonction de dégradation $a(\alpha)$ permet de pénaliser l’énergie élastique lorsque l’endommagement augmente, et peut donc être vue comme un moyen de coupler les énergies élastiques et de fissuration. Différentes décomposition de l’énergie élastique peuvent être formulées [14, 15], en faisant apparaître les parties hydrostatique et déviatorique du tenseur de déformation. L’application de la fonction d’endommagement sur une de ces parties spécifiquement peut permettre de favoriser ou non différents modes de fissuration.

3.3 Analyse en Elasticité

Différents calculs ont été réalisés sur la géométrie du test DCDC, suivant les formules de dégradation de l’énergie élastique présentées dans Collet et al. [15]. Ainsi il a été possible de modéliser la nucléation et la propagation d’une fissure en mode I pour ce test, comme présenté sur la Figure 5. Il est aussi possible de voir que l’initiation et la propagation de la fissure dépendent du choix de la formulation (Figure 5). Une analyse similaire sera proposée pour un comportement viscoplastique.

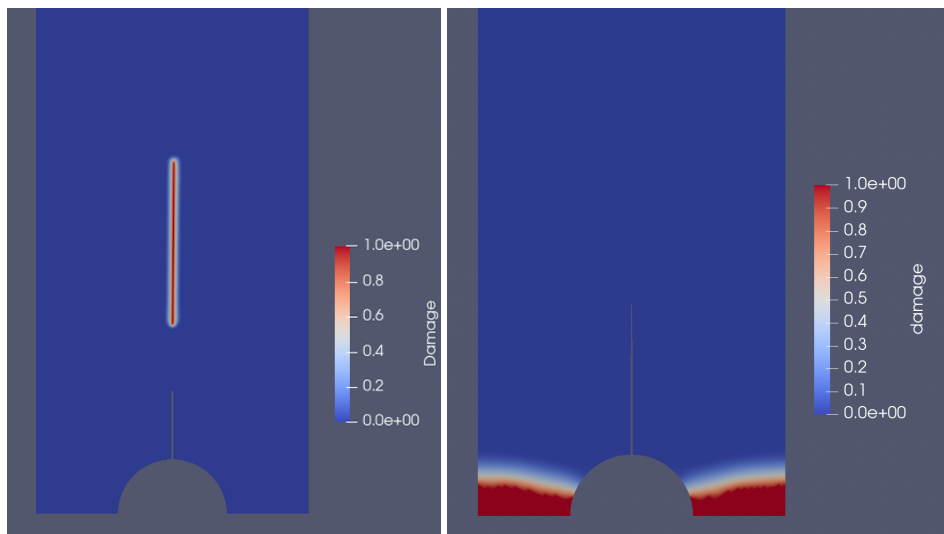


FIGURE 5 – Modélisation par approche variationnelle en champs de phase du test DCDC, selon deux couplages des énergies différents.

4 Conclusion

Le joint étudié montre un comportement viscoplastique lors de tests monotones à différentes vitesses, et pourra donc être modélisé par une loi de Johnson-Cook. La caractérisation de la rupture a été réalisée grâce au test DCDC. Ce test a montré que la vitesse de compression appliquée a un impact significatif sur les propriétés de fissuration obtenues, et il est donc logique d'estimer la dissipation plastique, non prise en compte dans les formules associées à ce test.

Un modèle numérique basé sur l'approche variationnelle aux champs de phase est mis en place afin de modéliser le comportement et la fissuration du matériau. Ce modèle permettra de valider de deux manières notre loi viscoplastique. Dans un premier en le comparant aux résultats de corrélation d'images, grâce à une comparaison des champs de déformations, ce qui a été fait en élasticité et sera appliqué en viscoplasticité. Ceci permettra d'apprécier quantitativement la différence entre les champs de déformation expérimentaux et numériques. Puis dans un second temps en comparant les résultats de modélisation de la fissuration par approche variationnelle, dans le cas du comportement élastique puis du comportement viscoplastique, ce qui permettra d'estimer la dissipation plastique.

Remerciements

Ce travail bénéficie du soutien de la chaire "Design and modeling of innovative materials - Design et modélisation de matériaux innovants" portée par l'X Ecole polytechnique et la fondation de l'école polytechnique et soutenue par Arkema.

Références

- [1] G.R. Johnson, W.H. Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, Netherlands, Vol. 21, 541 – 547, 1983.

- [2] G.R. Johnson, W.H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Eng. Fract. Mech.* Vol. **21**, 31 – 48, 1985.
- [3] C. Janssen. Specimen for fracture mechanics studies on glass, *Proceedings of the 10th International Congress on glass in Tokyo*, Vol. **10**, 23 – 30, 1974.
- [4] T. A. Plaisted, A. V. Amirkhizi , S. Nemat-Nasser. Compression-induced axial crack propagation in DCDC polymer samples : experiments and modeling, *Int. J. Fract.*, Vol. **141**), 447 – 457, 2006.
- [5] C. Nielsen, A. V. Amirkhizi, S. Nemat-Nasser. The effect of geometry on fracture strength measurements using DCDC samples, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. **91**), 1–13, 2012.
- [6] M.Y. He, M.R. Turner, A.G. Evans. Analysis of the double cleavage drilled compression specimen for interface fracture energy measurements over a wide range of mode mixities, *Acta. Metall. Mater.*, Vol. **43**), 3453 – 3458, 1995.
- [7] T. Fett, G. Rizzi, J.P. Guin, J.M. Lopez, S.M. Wiederhorn. A fracture mechanics analysis of the double cleavage drilled compression test specimen, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. **76**), 921 – 934, 2009.
- [8] Q.Z. Wang, M. Ni, L.Z. Wu, R.Q. Huang. Scrutinized and revised stress intensity factor formulas for double cleavage drilled compression specimens, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, Vol. **96**), 803 – 810, 2018.
- [9] [https ://www.ncorr.com/](https://www.ncorr.com/)
- [10] G.A. Francfort, J-J Marigo. Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem, *J. Mec. and Phy. of Solids*, Vol. **46** (8), 1319 – 1342 , 1998.
- [11] B. Bourdin, G.A. Francfort, J-J Marigo. Numerical experiments in revisited brittle fracture, *J. Mec. and Phy. of Solids*, Vol. **48**, 797 – 826, 2000.
- [12] B. Bourdin, G.A. Francfort, J-J Marigo. The variational approach to fracture, *J. Elast.* Vol. **91** (1–3), 5 – 148, 2008.
- [13] A. Logg and K.A. Mardal and G. N. Wells and others. *Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method*, Springer, 2012.
- [14] H. Amor, J.-J. Marigo, and C. Maurini. Regularized formulation of the variational brittle fracture with unilateral contact : Numerical experiments, *J. Mec. and Phy. of Solids*, Vol. **57**, 8, 1209 – 1229, 2009.
- [15] S. Collet. Variational phase-field study of adhesive wear : elastic and elastic-plastic models, Master Thesis, 2019.