



HAL
open science

Identification expérimentale d'une zone cohésive par corrélation d'images. Exemple pour une rupture par craquelage dans un polymère amorphe

Rafael Estevez, Julien Réthoré

► To cite this version:

Rafael Estevez, Julien Réthoré. Identification expérimentale d'une zone cohésive par corrélation d'images. Exemple pour une rupture par craquelage dans un polymère amorphe. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592941

HAL Id: hal-00592941

<https://hal.science/hal-00592941>

Submitted on 3 May 2011

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.

Identification expérimentale d'une zone cohésive par traitement d'images

Exemple pour une rupture par craquelage dans un polymère amorphe

R. Estevez¹, J. Réthoré²

¹ SIMaP, UMR 5266, CNRS, Grenoble-INP, UJF, France, Rafael.Estevez@simap.grenoble-inp.fr

² LaMCoS, UMR 5259, INSA Lyon, France, Julien.Rethore@insa-lyon.fr

Résumé — Nous présentons une identification d'un modèle de zone cohésive à partir de mesures par corrélation d'images des champs de déplacement observées autour d'une entaille sollicitée principalement en mode I, pour un polymères amorphes dont la rupture a lieu par craquelage. A partir d'un seul essai, des caractéristiques comme le niveau de contrainte pour l'amorçage du craquelage, l'ouverture critique et l'étendue de la zone d'élaboration ainsi que le profil traction-ouverture sont obtenus. Les valeurs identifiées apparaissent cohérentes avec des mesures reportées par ailleurs dans la littérature.

Mots clés — Corrélation d'images, Identification, Zone cohésive, Craquelage, Polymères.

1 Introduction

La rupture des polymères amorphes solides (PMMA, polystyrène, polycarbonate) a lieu par craquelage. Ce mécanisme procède selon trois étapes (i) d'amorçage pour un état de contrainte local critique, (ii) de fibrillation avec la transformation de la matière massive en fibrille avec une zone plastique localisée à l'interface entre ces deux régions et (iii) l'apparition d'une fissure pour un ouverture critique caractéristique du matériau. La géométrie d'une craquelure avec quelques microns d'épaisseur et quelques dizaines de microns de longueur suggère une description par un modèle de zone cohésive pour l'analyse de la rupture des polymères. La communauté de mécanique des polymères a d'abord considéré le modèle de Dugdale [1] pour sa description dont les prédictions en termes de longueur de zone cohésive ont été assez bien vérifiées expérimentalement par des observations en interférométrie optique de la craquelure se développant au fond d'une entaille sollicitée en mode I [24, 2].

Cependant, le modèle de Dugdale avec l'hypothèse d'une énergie de fissuration constante est mis en défaut expérimentalement où des effets de vitesses de chargement sur le taux de restitution d'énergie correspondant à l'amorçage de la propagation sont observés [2, 3]. L'origine d'une telle dépendance se trouve dans le mécanisme de rupture par craquelage avec notamment l'étape de fibrillation qui implique une plasticité localisée [4] intrinsèquement dépendante du temps (et de la température) pour cette classe de matériaux. A partir des observations physiques disponibles un modèle cohésif viscoplastique a été proposé pour décrire le craquelage [5, 6]. Cette proposition a été calibré et validé expérimentalement [3], notamment pour rendre compte d'effets de vitesse de chargement sur l'amorçage de la rupture. Cependant, la calibration nécessite de expérimentations séparées et approfondies des trois étapes caractéristiques du craquelage pour identifier un critère d'amorçage, la cinétique d'élargissement des fibrilles et leur rupture pour une ouverture critique.

Dans cette étude, une méthode d'identification de la relation contrainte ouverture est proposé à partir d'un seul essai de rupture. Les champs de déplacement autour d'une entaille sollicitée principalement en mode I sont enregistrés. Une méthodologie est présentée à partir de laquelle la relation traction-ouverture est identifiée pour cet essai qui permet notamment d'identifier l'ouverture critique à partir de laquelle une fissure apparaît, l'étendue de la zone de craquelage en avant du fond d'entaille ainsi que le niveau de contrainte pour lequel le mécanisme de craquelage a lieu et lorsqu'il s'amorce.

Nous présentons tout d'abord le dispositif expérimental et la préparation de l'essai de rupture qui servira pour l'analyse par corrélation d'images (DIC) des champs de déplacement. Les bases de cette analyse sont données et les résultats de mesure des facteurs d'intensité des contraintes et identification

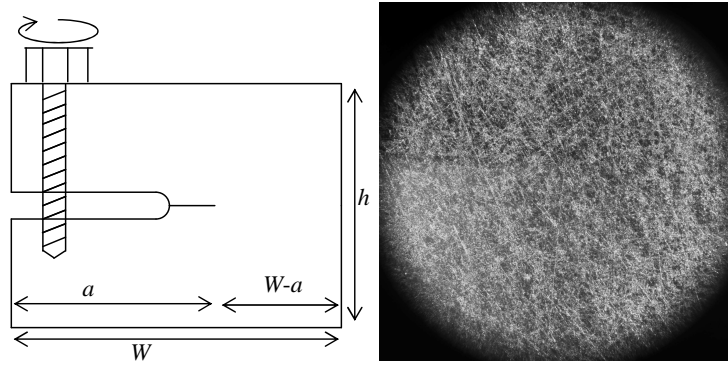


FIG. 1 – Description schématique du dispositif expérimental et observation de la région d'intérêt entourant l'entaille, localement.

d'un modèle cohésif sont exposés. Ensuite, à partir d'un modèle cohésif proposé et validé expérimentalement pour le craquelage [3], nous discutons les prédictions obtenus avec ce modèle aux résultats de DIC.

2 Dispositif expérimental de rupture pour analyse par DIC

Le matériau retenu pour cette étude est un PMMA commercial (Perspex) analogue à celui étudié par Saad et al. [3]. Une entaille fine est créée par tapping (cf. [3]). Un mouchetis est préparé en réalisant d'abord un ponçage fin puis le dépôt de noir de carbone de manière à obtenir une image avec des niveaux de gris variable tels que reportés en Fig. 2. Une vis assure son ouverture en mode I principalement, bien qu'une mixité entre modes I et II apparaisse progressivement car la configuration n'est pas pleinement symétrique. Nous présentons en Fig. 2 un schéma du montage ainsi qu'une image numérisée de l'état de référence avant la propagation de la fissure. En enfonçant progressivement la vis provoquant l'ouverture, la région observée autour de l'entaille est enregistrée à intervalles de temps réguliers. Un chargement pour un temps total d'environ 100 secondes a permis d'acquérir 21 clichés exploitables. Pour ce faire, l'observation est menée à l'aide d'un objectif télécentrique permettant une visualisation par l'intermédiaire d'une caméra CCD 2048×2048 pixels. Le dispositif permet un grossissement tel que la résolution d'un pixel correspond à une zone observée de $0.5\mu\text{m}$ de côté. Les images ainsi obtenues sont ensuite exploitées par corrélation d'images (DIC) afin d'en extraire les facteurs d'intensité des contraintes ainsi que la relation traction–ouverture au cours du chargement.

3 Bases de l'analyse par corrélation d'images autour de l'entaille

Les méthodes expérimentales fondées sur l'analyse des champs de déformation par corrélation d'images sont actuellement en pleine expansion notamment grâce à l'amélioration des dispositifs optique et d'acquisition. Ces méthodes ont d'abord été développées pour extraire des champs de déplacement continus (par exemple [7, 8, 9]) mais plus récemment la méthodologie a été étendue pour extraire des champs comportant des discontinuités comme des bandes de cisaillement ou des fissures. Pour ce cas, des stratégies d'enrichissement des champs de déplacement à identifier ont été développées [10, 11]. Les problématiques de rupture ont par ailleurs été abordées par [12, 13, 14]. Dans ce cas, les facteurs d'intensité des contraintes sont extraits de l'analyse par DIC. L'analyse des propriétés cohésives ou d'adhésion a fait l'objet de contribution plus récentes [15, 16, 17, 18] même si certaines bases sont déjà données par Hong et al. [19] pour l'identification de modèle cohésif. Les études mentionnées ci-dessus sont menées pour des grossissements supérieurs à ceux caractéristiques de la "process zone" cohésive. Dans le cas des polymères, les dimensions caractéristiques sont de l'ordre de quelques microns en ouverture et plusieurs dizaines de microns en étendue. Dès lors, les techniques optiques actuelles permettent une visualisation de telles régions et a priori l'extraction du modèle cohésif représentant le mécanisme de rupture. Nous montrons dans cette étude que le dispositif expérimental décrit en Fig. 2 ainsi que le matériel optique employé permettent une telle identification. Le calcul des facteurs d'intensité des contraintes est basé

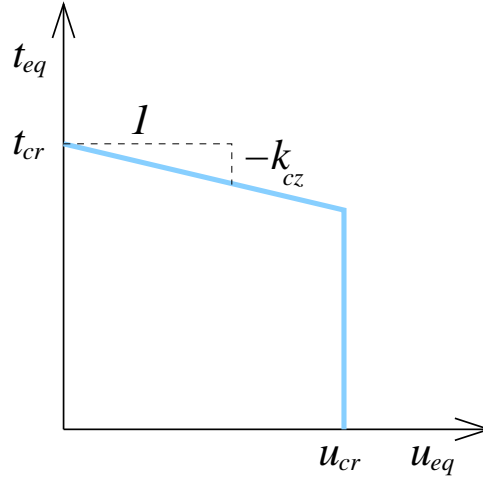


FIG. 2 – Paramétrisation de la loi cohésive recherchée.

sur la méthodologie présentée en [20], [14] ou [21].

Afin d'identifier un modèle cohésif représentant le mécanisme de rupture, un saut de déplacement $[[\mathbf{u}]]$ est autorisé dans le cadre de la méthodologie d'identification employant un enrichissement des déplacements. Le problème d'identification incorpore alors la condition supplémentaire suivante

$$C([[u]], t) = 0 \quad (1)$$

qui désigne la zone cohésive à identifier. Afin de tenir compte d'un mode de chargement mixte (ouverture et cisaillement), nous définissons les directions normale (n) et tangentielle (t) pour les tractions et les sauts de déplacement ainsi que les quantités équivalentes (e.g. [22])

$$t_{eq} = \sqrt{t_n^2 + \beta t_t^2} \quad (2)$$

où β est un paramètre qui contrôle l'influence du mode de cisaillement sur le processus de rupture. Ce paramètre est pris égal à $2(1 + \nu)$. Une expression analogue est définie pour le saut de déplacement équivalent selon

$$u_{eq} = \sqrt{u_n^2 + u_t^2 / \beta}. \quad (3)$$

La forme de la zone cohésive à identifier est présentée en Fig. 3 où t_{cr} correspond à la traction à partir de laquelle la fissuration par craquelage s'amorce avec une pente décroissante entre t_{eq} et u_{eq} . Au cours de l'analyse, l'ouverture a lieu jusqu'à u_{cr} qui correspond à l'apparition d'une fissure localement et l'amorçage de sa propagation. Les paramètres t_{cr} , k_{cz} et u_{cr} sont identifiés à partir de l'analyse DIC.

4 Analyse de la déformation autour de l'entaille au cours du chargement

Nous présentons en Fig. 7 les mesures des champs de déplacement pour le dernier enregistrement. A partir de ces observations, les facteurs d'intensité des contraintes et la position de la pointe de la fissure élastique équivalente sont calculés à partir des méthodologie fondées sur l'identification du champ de déplacement exprimé à partir d'une série de Williams [23] (cf. Fig. 4). L'évolution de la position de la pointe de la fissure élastique équivalente donne une estimation de la zone craquelée à un niveau de chargement donné. A partir de ces données, une analyse par éléments finis étendus tenant compte d'un enrichissement avec le saut de déplacement et le modèle cohésif présentés ci-dessus est menée. Les paramètres de la zone cohésive sont optimisés pour minimiser la différence entre les mesures de DIC et les prédictions en terme d'évolution de la taille de la zone craquelée au cours de l'essai. Le résultat conduit à une estimation des paramètres telle que

$$t_{cr} = 135 \text{ MPa}, \quad k_{cz} = 20 \text{ MPa}/\mu\text{m} \quad \text{et} \quad u_{cr} = 2.4 \mu\text{m}. \quad (4)$$

Les paramètres reportés ci-dessous indiquent qu'en terme de traction et ouverture équivalentes, la fissuration par craquelage s'amorce pour une traction de 135 MPa. Cette valeur décroît jusqu'à 87 MPa,

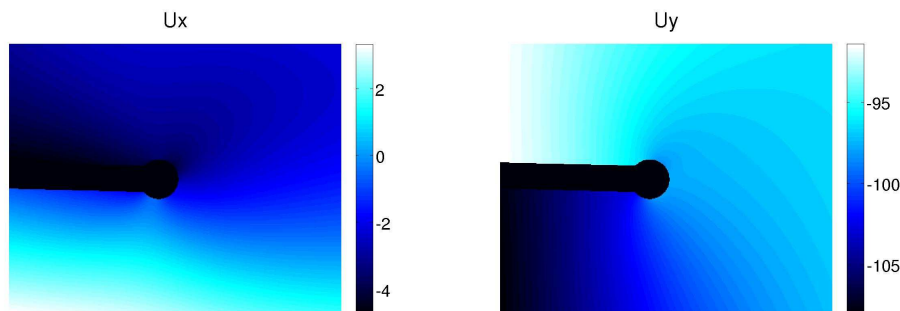


FIG. 3 – Obtention des champs de déplacement au voisinage de l’entaille pour le dernier enregistrement avant la propagation de la fissure

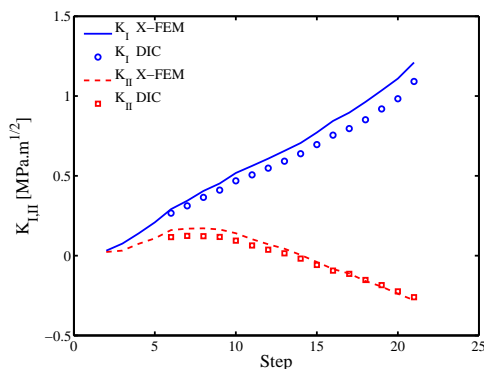


FIG. 4 – Calcul des facteurs d’intensité des contraintes au cours du chargement, l’analyse étant menée par DIC.

lorsque l’ouverture critique $u_{cr} = 2.4\mu\text{m}$ correspondant à l’ouverture quand l’amorçage de la propagation est atteinte.

Quelques commentaires s’imposent sur les valeurs du modèle cohésif obtenues ici et données en (4). Tout d’abord, ces trois paramètres sont identifiés à partir d’un seul essai mécanique pour lequel différents états de déformation sont enregistrés. Vis à vis des paramètres obtenus, il faut souligner que ceux-ci apparaissent en accord avec les caractéristiques reportés par Döll et al. [24, 2] qui ont analysé le craquelage par interférométrie optique en mode I. Pour le PMMA, l’ouverture critique est de l’ordre de 2.5-3 microns. La valeur identifié ici est comparable à ces mesures. Par ailleurs, Döll et al. observent le profil complet d’ouverture, et ont tenté de l’ajuster avec la solution de Dugdale [1], correspondant à k_{cz} nulle si l’on se réfère à la figure 3. Avec ce modèle, une traction de l’ordre de 100 MPa pour le PMMA à température ambiante est obtenue [24, 2] (Voir par exemple Fig. 3.20 dans [2]). Si l’on considère la valeur moyenne de la traction équivalente, elle apparaît comparable à cette mesure. L’étendue de la zone cohésive pour le dernier enregistrement indique une étendue de 15 microns (cf. Fig. 5). Celle-ci est inférieure à celle reportée par Döll et al. [24, 2] qui observe une longueur de process zone de l’ordre de 25-30 microns, cette dernière observation étant pour un mode I pur. Or, l’observation des variations des sauts de normal et tangentiel (cf. Fig 5) montre qu’un mode de cisaillement apparaît au cours du chargement, à partir de l’enregistrement 17 sur 21. Cette contribution tangentielle augmente dès qu’elle apparaît jusqu’à la rupture. Cependant, le maximum de traction atteint en cisaillement apparaît modeste, tant en déplacement qu’en contrainte en comparaison avec le mode normal (cf. Fig. 4). Le suivi du saut de déplacement tangentiel (cf. Fig. 5) indique à partir de quel niveau de chargement la part de cisaillement se manifeste sur le modèle cohésif représentant la fissuration. Le mode I est dominant mais une part non négligeable de mode II se manifeste. Les conditions de chargement n’étant pas identiques, il convient d’être prudent sur les comparaisons précises. Nous pouvons cependant raisonnablement considérer que les ordres de grandeur du modèle cohésif identifié par DIC est en accord avec les observations de Döll et al., même si ces derniers fondaient leur analyse sur le modèle de Dugdale.

Les résultats principaux de l’analyse par DIC est l’obtention et l’identification à partir des mesures

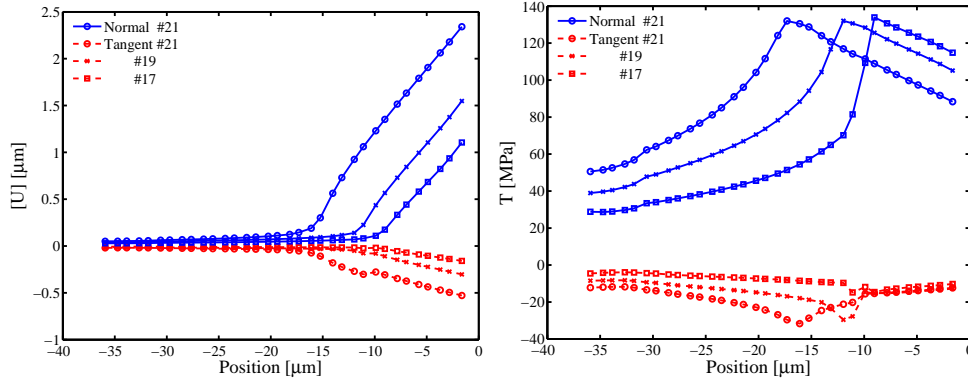


FIG. 5 – Variation de l’ouverture de la zone cohésive au cours du chargement, à droite, variation des tractions au cours du chargement.

de champs de déplacement d’un modèle cohésif représentant la rupture par craquelage. Dans la partie suivante, nous allons confronter cette identification à une formulation cohésive calibrée par Saad et al. [3] et validé à partir de comparaison entre prédictions et mesures des variations du taux de restitution d’énergie avec la vitesse de chargement. Cette approche peut être considérée comme un développement du modèle de Dugdale original dans la mesure où la formulation est dépendante du temps et fondée sur la physique intervenant dans le craquelage.

5 Simulation de la rupture du PMMA

A partir de cette étude expérimentale, nous allons comparer les mesures de DIC et l’identification du modèle cohésif pour la rupture par craquelage aux prédictions obtenues à partir d’un modèle cohésif qui prend en compte les étapes caractéristiques du craquelage et qui est fondé sur les observations locales du mécanisme de rupture. La formulation a été calibrée de manière indirecte par Saad et al. [3], à partir de mesure de variation du taux de restitution d’énergie et leurs comparaisons aux prédictions de simulations. Ici, nous nous intéresserons aux caractéristiques des zones cohésives identifiées par DIC vis à vis de celle obtenue par cette approche. Notamment, nous comparerons notamment la forme de la relation traction-ouverture, l’estimation de l’étendue de la zone cohésive.

En s’inspirant de la description du processus de craquelage de Kramer et Berger [4], Tijssens et al. [5, 6] ont proposé un modèle cohésif viscoplastique pour le craquelage avec une loi contrainte-ouverture qui tient compte des trois étapes d’amorçage, d’élargissement et de rupture des fibrilles. Les deux premières étapes ont été calibrées expérimentalement par Saad et al. [3]. L’amorçage du craquelage intervient dès lors que la contrainte normale au plan des craquelures est telle que

$$\sigma_n = \sigma_n^0 \quad \text{et} \quad \sigma_n \geq \sigma_m \quad (5)$$

où σ_n^0 est un paramètre matériau, σ_m est la contrainte moyenne locale. Dans le cadre d’une analyse en 2D, la deuxième condition ci-dessus assure que σ_n correspond à la contrainte principale maximum.

L’élargissement des craquelures étant associé à une activité viscoplastique importante à l’interface entre zone fibrillée et non fibrillée [4], cette étape est représentée par une ouverture viscoplastique de la zone cohésive selon [5, 6]

$$\dot{\Delta}_n^c = \dot{\Delta}^0 \exp \left[\frac{-A^c \sigma^c}{T} \left\{ 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma^c} \right\} \right], \quad (6)$$

où $\dot{\Delta}^0$, A^c et σ^c sont des paramètres caractéristiques du matériau. Enfin, à la suite des observations par interférométrie de Döll [24, 2], la rupture des fibrilles a lieu pour une valeur critique de l’ouverture des craquelures Δ_n^{cr} , qui est dépendante du matériau. Les trois étapes du craquelage étant décrites, la loi contrainte-ouverture gouvernant la réponse cohésive s’écrit

$$\dot{\sigma}_n = k_n (\dot{\Delta}_n - \dot{\Delta}_n^c), \quad (7)$$

qui représente le processus de craquelage, où $\dot{\Delta}_n$ est le taux d’ouverture de la surface cohésive, $\dot{\Delta}_n^c$ le taux d’élargissement des fibrilles d’après (6) et k_n une rigidité suffisamment grande pour garantir la continuité

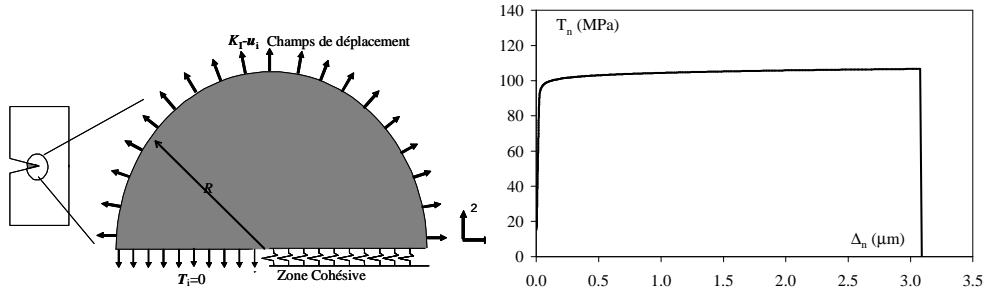


FIG. 6 – Description schématique des conditions de chargement pour simuler la rupture en mode I par craquelage. Le matériau est élastique isotrope, les zones cohésives sont insérées le long du plan de symétrie de l’entaille. A droite, Traction-Ouverture obtenue pour un chargement sous $K_I = 0.01 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$.

des champs en l’absence de craquelures ($\dot{\Delta}_n^c = 0$ et $\dot{\sigma}_n = k_n \dot{\Delta}_n$) et pour assurer $\dot{\Delta}_n \approx \dot{\Delta}_n^c$ au cours de l’élargissement. Lorsque la rupture des fibrilles a lieu, la contrainte normale s’annule pour représenter la fissure créée localement. La condition pour l’apparition d’une fissure localement est

$$\Delta_n^{cr} = \int \dot{\Delta}_n^c dt. \quad (8)$$

Dans le cadre de cette approche, nous ne tenons pas compte de contribution tangentielle dans la fissuration. Une loi traction-ouverture est prise pour les composantes tangentielles, leur rigidité étant ramené à zéro, ainsi que la traction lorsque la condition de rupture (8) est atteinte.

Le comportement du matériau massif est potentiellement élasto-viscoplastique en l’absence de craquelage. Il a été caractérisé par Saad et al. [3] en compression uniaxiale. Cependant, cette étude a montré qu’au cours d’un chargement de rupture en mode I, le comportement du matériau entourant la craquelure peut être approximée par une réponse linéaire élastique, avec un module d’Young $E = 2.2 \text{ GPa}$ et un coefficient de Poisson $\nu = 0.32$ [3].

TAB. 1 – Paramètres du modèle cohésif pour le craquelage extrait de Saad et al. [3]

σ_n^0	$\dot{\Delta}_0$	A^c	σ^c	Δ_n^{cr}
55 MPa	0.1 mm/s	60 K/MPa	140 MPa	3 μm

Nous présentons ici les résultats d’une simulation de la rupture avec le modèle cohésif décrit ci-dessus. La configuration retenue est décrite dans Estevez et al. [6, 3] et correspond à une simulation sous l’hypothèse de chargement confiné en mode I pur, en déformation plane. Le chargement est décrit schématiquement en Fig. 5 et le paramètre de chargement est le facteur d’intensité des contraintes K_I . La vitesse de chargement appliqué est $\dot{K}_I = 1 \times 10^{-2} \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ correspondant à un temps de chargement de 100 secondes conforme à l’expérience. La relation traction-ouverture pour ces conditions est présentée en Fig. 5 ainsi que le profil de la zone cohésive représentant le craquelage et son étendue pour différents niveaux de chargement précédant la rupture. Nous présentons à droite de la figure 5 la relation contrainte-ouverture normale (pas de composantes tangentielles ici). Le plateau correspondant à l’amorçage de la fibrillation a lieu pour $K_I = 0.32 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, la rupture apparaissant pour $K_I^{cr} = 1.02 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Lorsque l’ouverture critique est atteinte (Eq. 8), les fibrilles cassent localement et une fissure est créée. Dès lors, la fissure se propage sans que le niveau de chargement n’augmente notablement. Sur la figure 7, nous reportons la répartition de la contrainte moyenne à l’amorçage de la propagation. Nous observons également le profil d’ouverture de la zone cohésive. Les coordonnées X et Y sont normalisées par la rayon d’entaille initial r_i pris égal à $5 \mu\text{m}$. Nous présentons ces profils d’ouverture pour différents niveaux de chargement en Fig. 7 (droite).

Ces simulations montrent que la traction correspondant au craquelage est de l’ordre de 100 MPa, l’étendue de la process zone étant d’environ 25 microns. L’ouverture critique est ici fixée à 3 microns (valeur empruntée aux travaux de Döll et al. [24, 2]). Les valeurs de traction pendant le craquelage et l’étendue de la process zone sont en accord avec les mesures de Döll et al. [24, 2]. Cependant, dans les

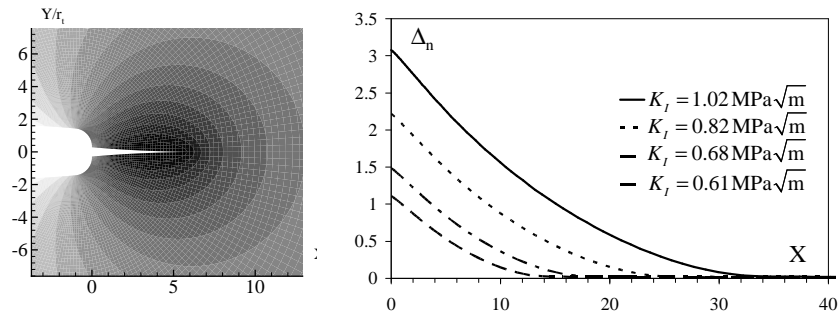


FIG. 7 – à gauche, répartition de la contrainte moyenne et ouverture de la zone cohésive juste avant l’amorçage de la propagation de fissure ; à droite, les profils d’ouverture de la zone d’élaboration cohésive représentant le craquelage pour différent niveaux de chargement.

deux cas un chargement en mode I pur est considéré.

Les prédictions relatives aux caractéristiques de la zone cohésive représentant le craquelage sont conformes aux observations par interférométrie de Döll et al. [24, 2].

La forme de la zone cohésive avec la formulation calibré par Saad et al. [3] comporte un plateau alors qu’un léger adoucissement est obtenu dans l’identification par DIC. Par ailleurs, les niveaux des contraintes et des sauts de déplacements sont comparables. Dans les deux études, celle-ci et celle de Saad et al., le même matériau est utilisé. Dès lors, il semble que la différence de mode de chargement soit responsable à la fois du profil distinct obtenu pour le modèle cohésif. Cet aspect est actuellement en cours d’analyse. Cependant, les résultats de DIC sont encourageants pour l’identification expérimentale de loi cohésive, dès lors que la résolution et la région d’observation sont observables.

6 Conclusion

Nous avons présenté une analyse expérimentale d’un essai de rupture par corrélation d’images. Le traitement mené permet d’estimer le facteur d’intensité des contraintes et d’évaluer la mixité du chargement et les parts relevant de l’ouverture (I) et du cisaillement (II).

Compte-tenu des dimensions caractéristiques de la process zone de rupture pour le PMMA (supérieure au micron en ouverture et plusieurs microns en étendue) et grâce aux moyens d’acquisition les plus récents, les champs de déplacement au voisinage de l’entaille sont accessibles et mesurés. A partir de ces données, un modèle cohésif est identifié à partir de la comparaison entre les champs de déplacement mesurés et ceux prédit dans le cadre d’une analyse par éléments finis étendus dans laquelle un saut de déplacement associé à un modèle cohésif est pris en compte.

Ainsi, à partir d’un seul essai mécanique pour lequel le chargement est observé et enregistré, il est possible d’estimer la contrainte à partir de laquelle la fissuration par craquelage apparaît, l’ouverture critique correspondant à l’amorçage de la propagation de la fissure ainsi que les variations contrainte-ouverture.

Cette identification est confrontée à des prédictions d’un modèle cohésif du craquelage par ailleurs validé en mode I, de manière indirecte. Les ordre de grandeurs des tractions sont comparables. Cependant, l’analyse par DIC montre une part non négligeable du mode de cisaillement au cours du chargement. Sa prise en compte doit permettre de confronter les deux approches. Cet aspect est en cours de développement et permettra notamment d’évaluer si la part tangentielle du modèle cohésif doit être prise en compte dans la définition du critère de rupture des polymères, cette contribution étant a priori négligée compte tenu du mécanisme opérant avec la fibrillation de la matière supposée gouvernée uniquement par la part normal des contrainte et ouverture.

Références

- [1] D.S. Dugdale. Yielding of steel sheets containing slits. *J. Mech. Phys. Sol.*, 8 :100–104, 1960.
- [2] W. Döll and L. Könczöl. Micromechanics of fracture : optical interferometry of crack tip craze zone. *Advances in Polymer Science*, 91-92 :138–214, 1990.

- [3] N. Saad-Gouider, R. Estevez, C. Olagnon, and R. Séguéla. Calibration of a viscoplastic cohesive zone for crazing in pmma,. *Engng. Fracture Mechanics*, 73 :2503–2522, 2006.
- [4] E.J. Kramer and L.L. Berger. Fundamental processes of craze growth and fracture. *Adv. Polymer Sci.*, 91/92 :1–68, 1990.
- [5] M.G.A. Tjssens, E. Van der Giessen, and L.J. Sluys. Modelling of crazing using a cohesive surface methodology. *Mech. Mat.*, 32 :1935, 2000.
- [6] R. Estevez, M.G.A. Tjssens, and E. Van Der Giessen. Modelling of the competition between shear yielding and crazing in glassy polymers. *J. Mech. Phy. Sol.*, 48 :2585–2617, 2000.
- [7] MA. Sutton, M. Cheng, WH. Peters, YS. Chao, and SR. McNeill. Application of an optimized digital image correlation method to planar deformation analysis. *Image Vision Computing*, 4(3) :143–150, august 1986.
- [8] Y. Sun, JHL. Pang, CK. Wong, and F. Su. Finite-element formulation for a digital image correlation method. *Applied Optics*, 44(34) :7357–7363, 2005.
- [9] G. Besnard, F. Hild, and S. Roux. ‘finite-element’ displacement fields analysis from digital images : Application to portevin-le châtelier bands. *Experimental Mechanics*, 46(6) :789–803, 2006.
- [10] J. Réthoré, F. Hild, and S. Roux. Shear-band capturing using a multiscale extended digital image correlation technique. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(49-52) :5016–5030, 2007.
- [11] J. Réthoré, F. Hild, and S. Roux. Extended digital image correlation with crack shape optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 73(2) :248–272, 2007.
- [12] J. Anbanto-Bueno and J. Lambros. Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation. *Engineering Fracture Mechanics*, 69 :1695–1711, 2002.
- [13] J. Réthoré, A. Gravouil, F. Morestin, and A. Combescure. Estimation of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral. *International Journal of Fracture*, 132(1) :65–79, 2005.
- [14] S. Roux and F. Hild. Stress intensity factor measurement from digital image correlation : post-processing and integrated approaches. *International Journal of Fracture*, 140(1-4) :141–157, 2006.
- [15] J. Abanto-Bueno and J. Lambros. Experimental determination of cohesive failure properties of a photodegradable copolymer. *Experimental Mechanics*, 45(2) :144–152, 2005.
- [16] R. Fedele, B. Raka, F. Hild, and S. Roux. Identification of adhesive properties in GLARE assemblies using Digital Image Correlation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 57(7) :1003–1016, 2009.
- [17] B. Shen and GH Paulino. Direct Extraction of Cohesive Fracture Properties from Digital Image Correlation : A Hybrid Inverse Technique. *Experimental Mechanics*, pages 1–21.
- [18] PF Fuchs and Z. Major. Experimental Determination of Cohesive Zone Models for Epoxy Composites. *Experimental Mechanics*, pages 1–8.
- [19] S. Hong and K.S. Kim. Extraction of cohesive-zone laws from elastic far-fields of a cohesive crack tip : a field projection method. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51(7) :1267–1286, 2003.
- [20] R. Hammam., F. Hild, and S. Roux. Stress intensity factor gauging by digital image correlation : Application in cyclic fatigue. *Strain*, 43(3) :181–192, 2006.
- [21] S. Roux, J. Réthoré, and F. Hild. Digital image correlation and fracture : an advanced technique for estimating stress intensity factors of 2d and 3d cracks. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 42(214004), 2009.
- [22] GT. Camacho and M. Ortiz M. Computational modeling of impact damage in brittle materials. *International Journal of Solids and Structures*, 33 :2899–2938, 1996.
- [23] ML. Williams. On the stress distribution at the base of a stationary crack. *ASME Journal Applied Mechanics*, 24 :109–114, 1957.
- [24] W. Döll. Optical interference measurements and fracture mechanics analysis of crack tip craze zones. *Advances in Polymer Science*, 52-53 :105–168, 1983.