

Propagation d'une fissure 2D dans un matériau ductile endommageable avec X-FEM

Jean-Philippe Crété, Patrice Longère, Jean-Marc Cadou, Michel Salaün

▶ **To cite this version:**

Jean-Philippe Crété, Patrice Longère, Jean-Marc Cadou, Michel Salaün. Propagation d'une fissure 2D dans un matériau ductile endommageable avec X-FEM. 11e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2013, Giens, France. hal-01717032

HAL Id: hal-01717032
https://hal.science/hal-01717032

Submitted on 25 Feb 2018

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.

Public Domain

CSMA 2013
11e Colloque National en Calcul des Structures
13-17 Mai 2013

Propagation d'une fissure 2D dans un matériau ductile endommageable avec X-FEM

Jean-Philippe CRÉTÉ [1]*, Patrice LONGÈRE [2], Jean-Marc CADOU [3], Michel SALAÜN [4]

[1] Université de Toulouse, ISAE/ICA et Université Européenne de Bretagne, UBS/LIMATB, jean-philippe.crete@isae.fr
[2] Université de Toulouse, ISAE/ICA, patrice.longere@isae.fr
[3] Université Européenne de Bretagne, UBS/LIMATB,jean-marc.cadou@univ-ubs.fr
[4] Université de Toulouse, ISAE/ICA, michel.salaun@isae.fr
* Auteur correspondant

Résumé — Ce travail est consacré à la simulation numérique de la propagation d'une fissure dans un matériau dont la rupture résulte de la création, la croissance et la coalescence de vides. Le comportement du matériau est décrit via un modèle de type Gurson prenant en compte les effets combinés de l'écrouissage, de l'adoucissement thermique, de la viscoplasticité et de l'endommagement ductile. La méthode des éléments finis étendus a été retenue pour décrire les conséquences des discontinuités fortes induites par la présence d'une fissure dans le maillage. Un critère basé sur un paramètre lié à l'endommagement en pointe de fissure est proposé afin de propager la fissure pré-existante. Considérant quelques simplifications, le travail présenté reproduit la propagation d'une fissure en 2D résultant de la croissance de vides induits par l'endommagement.
Mots clés — X-FEM, viscoplasticité, endommagement, calcul numérique

1 Introduction

Ce travail est consacré à la simulation numérique de la propagation d'une fissure dans un matériau dont la rupture résulte de la création, de la croissance et de la coalescence de vides. Durant ce processus d'endommagement ductile, le matériau voit ses propriétés thermomécaniques dégradées et l'apparition de déformations irréversibles volumiques en plus des déformations irréversibles déviatoriques générées par les glissements plastiques. Afin de décrire ces effets, le comportement du matériau est décrit via le modèle de Gurson [4], modifié par Tvergaard and Needleman [12] et Longère et al [9]. Celui-ci prend en compte les effets combinés de l'écrouissage, de l'adoucissement thermique, de la viscoplasticité et de la croissance de cavités. Le traitement numérique de la propagation d'une fissure dans une structure n'est pas trivial. La première difficulté réside dans le fait que le maillage près du fond de fissure doit être suffisament fin pour reproduire le champ des déplacements en pointe de fissure. Ce qui peut conduire à des difficultés numériques dans le cas de structures réelles car elles nécessitent un nombre important d'éléments. Le second problème est la méthode de propagation, c'est-à-dire la représentation de la propagation de la fissure au sein de la structure. Récemment, des méthodes consistant à enrichir la cinématique de l'élément fini permettant de rendre compte de la présence d'une fissure ont émergé. Une de ces méthodes, appelée méthode des éléments finis enrichis (X-FEM), a été retenue dans cette étude pour décrire la fissure et sa propagation au sein d'une structure.

Le comportement du matériau et la méthode de propagation de la fissure présentés dans cette étude, ont fait indépendamment l'objet de nombreux travaux. Cependant, la combinaison de la X-FEM avec un comportement matériau avancé, i.e. fortement non linéaire, est beaucoup plus récente. La démarche habituelle consiste en effet soit à utiliser un modèle avancé, i.e. GTN, dans le cadre d'une formulation EF standard soit à utiliser un modèle simple dans le cadre d'une formulation EF enrichi (p.ex. XFEM). L'interet d'utiliser la X-FEM avec un matériau dont la rupture résulte de la création, de la croissance et la coalescence de vides, est de permettre de retrouver le sens physique du mécanisme microstructural à l'origine de la fissure, ce qui nous permet d'aller plus loin dans l'analyse de la propagation d'une fissure dans un tel matériau. La X-FEM ouvre donc de nouvelles voies quant aux critères de propagation utilisés usuellement pour de tels matériaux. Dans cette optique, et pour réduire l'effet du maillage, un

critère énergétique a été utilisé ici pour activer la propagation de la fissure. En considérant quelques simplifications, le travail présent reproduit la propagation dynamique d'une fissure 2D résultant de la croissance de vides. Le comportement du matériau et la méthode des éléments finis étendus ont été implantés dans le code de calcul par éléments finis Abaqus via des routines utilisateurs. L'intérêt de cet article réside donc dans le couplage de la X-FEM avec un comportement matériau de type GTN.

Le comportement du matériau considéré dans cette étude est résumé dans la Sect.2. La méthode des éléments finis enrichis adaptée à notre étude est décrite dans la Sect.3. Le couplage de la X-FEM et du comportement du matériau est présenté dans la Sect.4. Une application de l'approche présentée (simulation numérique d'une plaque soumise à un chargement de type Mode I) est réalisée et commentée dans la Sect.5.

2 Comportement du matériau

La rupture du matériau est supposée résulter de la création, de la croissance et de la coalescence de vides. Afin de reproduire ce processus d'endommagement ductile, le comportement du matériau est décrit via un modèle de type Gurson, enrichi par Tvergaard et Needleman. Longère et al [9] ont introduit dans le modèle de GTN une contrainte cinématique pour décrire la croissance de l'endommagement lorsque le matériau est soumis à du cisaillement :

$$\Phi_{GTN} = (\frac{\sigma_{eq}}{\overline{\sigma_y}})^2 + 2q_1 f \cosh(-\frac{3}{2} q_2 \frac{p_m + p_r}{\overline{\sigma_y}}) - (1 + q_3 f^2) = 0 \tag{1}$$

avec σ_{eq} la contrainte équivalente, p_m le pression, $\overline{\sigma_y}$ la contrainte d'écoulement, f la fraction volumique des vides, p_r la pression cinématique et (q_1, q_2, q_3) des constantes.

La contrainte d'écoulement $\overline{\sigma_y}$ prend en compte les effets combinés de l'écrouissage, de l'adoucissement thermique et de la vicoplasticité :

$$\overline{\sigma_y}(\kappa, \dot{\kappa}, T) = \sigma_y(\kappa, T) + \sigma_{vp}(\dot{\kappa}, T) \tag{2}$$

avec κ la déformation plastique cumulée, $\dot{\kappa}$ la vitesse de la déformation plastique cumulée et T la température absolue. Dans la partie indépendante du temps $\sigma_y(\kappa, T)$, l'écrouissage est décrit via une loi de type Voce et l'adoucissement thermique via une loi puissance :

$$\sigma_y = (R_0 + R_\infty[1 - \exp(-k\kappa)]^\beta) \left(1 - \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^m\right) \tag{3}$$

avec (R_0, R_∞, k, β) les contantes de l'écrouissage isotrope et (T_{ref}, m) les constantes de l'adoucissement thermique. La partie dépendante du temps de la contrainte d'écoulement est décrite via une loi de type Norton et reproduit une asymétrie en tension/compression [3] :

$$\sigma_{vp} = Y[\dot{\kappa}\exp(\frac{V_a p_m}{k_b T})]^{\frac{1}{n}} \tag{4}$$

avec (Y,n) les constantes en rapport avec les effets viscoplastiques et (V_a,k_B) les constantes en rapport avec l'asymétrie. $V_a = V_h\beta^3$ où V_h est une contante et β est l'amplitude du vecteur de Burgers (β=2.5Å). Enfin, k_B est la constante de Boltzmann (k_B=1.3804.10$^-$23J/K).

3 Enrichissement des élements finis

3.1 Principe

La méthode des éléments finis étendu consiste à enrichir la cinématique des éléments finis afin de reproduire la présence d'une fissure au sein du maillage. Il en résulte alors deux avantages :
- Lors de la propagation de la fissure, aucun remaillage n'est nécessaire.
- Un enrichissement bien choisi en pointe de fissure permettra de représenter les singularités proches de celle-ci, permettant ainsi d'utiliser des maillages plus grossiers.

Le champ de déplacement $u(x,t)$ est généralement décrit par

$$u(x,t) = \sum_{i\in I} u_i(t)N_i(x) + \sum_{j\in J} b_j(t)N_j(x)H(x) + \sum_{k\in K} N_k(x)\left(\sum_{l=1}^{4} c_k^l(t)F_l(x)\right) \tag{5}$$

où $u_i(t)$ représente les degrés de liberté réguliers du noeud i, $b_j(t)$ représente les degrés de liberté du noeud j en rapport avec la discontinuité et $c_k^l(t)$ les degrés de liberté du noeud k en rapport avec le champ singulier en pointe de fissure. $N_i(x)$ représente les fonctions de forme, $F_l(x)$ sont les quatre fonctions singulières et $H(x)$ la fonction généralisée d'Heaviside avec $H(x) = signe(d_\Gamma(x))$ ($H(x)$ prend la valeur +1 pour les noeuds situés au-dessus de la fissure et -1 pour les noeuds situés en-dessous de la fissure). L'ensemble des noeuds du maillage est noté I, l'ensemble des noeuds appartenant aux éléments entièrement coupés est noté J et l'ensemble des noeuds appartenant à l'élément contenant la pointe de la fissure est noté K, voir Fig. 1.

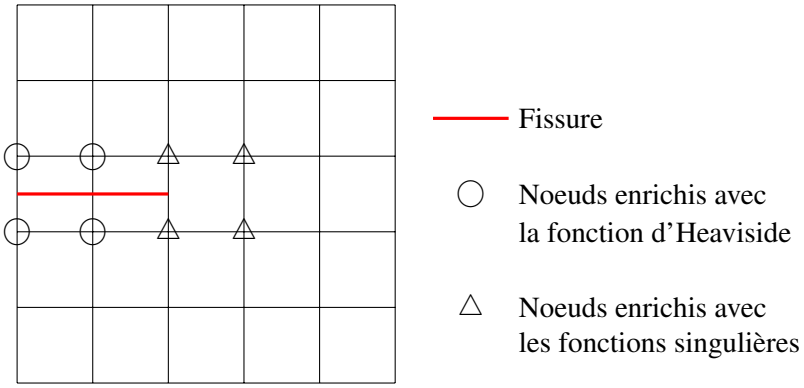


Fig. 1 – Principe de la désignation des noeuds enrichis

3.2 Approche adoptée

Fonctions singulières

La X-FEM est particulièrement efficace lorsqu'elle est appliquée pour des cas 2D impliquant un comportement matériau élastique fragile pour lequel les fonctions singulières $F_l(x)$ peuvent être déterminées analytiquement, voir Eq.(6).

$$F_{l=1,2,3,4}(r,\theta) = [\sqrt{r}sin\frac{\theta}{2}, \sqrt{r}cos\frac{\theta}{2}, \sqrt{r}sin\theta sin\frac{\theta}{2}, \sqrt{r}sin\theta cos\frac{\theta}{2}] \tag{6}$$

Pour les matériaux présentant des lois de comportement fortement non linéaires, il est quasiment impossible de donner une expression analytique de ces fonctions singulières. Une pré-étude numérique permet dans certains cas de les approximer. Cependant, pour le matériau étudié, où l'on retrouve de l'écrouissage, de l'adoucissement thermique, de la visco-plasticité ainsi que de l'endommagement, les expressions des fonctions singulières sont extrêmement complexes. Une alternative consiste à conserver les fonctions singulières décrites dans un contexte élastique. Cela a pour effet de permettre à la pointe de la fissure de se localiser au sein d'un élément alors que l'utilisation de la fonction d'Heaviside seule, oblige la pointe de fissure à se situer le long d'un coté d'un élément. Ce dernier cas nécessite alors de mailler plus finement la structure car le champ en pointe de fissure est perturbé. Cependant, hormis le fait de pouvoir stopper la pointe de la fissure au sein d'un élément, l'utilisation des fonctions singulières n'a un réel întéret que si celles-ci sont en accord avec le comportement du matériau. En effet dans notre cas, l'utilisation des fonctions singulières élastiques perturbera le champ en pointe de fissure et nous obligera à mailler plus finement. De plus tenant compte du comportement fortement non linéaire du matériau, la diminution du nombre d'inconnus par élément (48 dof avec fonctions singulières élastiques vs. 8 dof

avec la fonction d'Heaviside seule) semble être une nécessité. En l'absence des fonctions singulières, le champ de déplacement se réduit à :

$$u(x,t) = \sum_{i\in I} u_i(t)N_i(x) + \sum_{j\in J} b_j(t)N_j(x)H(x) \tag{7}$$

Pour s'assurer que les enrichissements disparaîtront dans les éléments non coupés par la fissure, voir [13], le champ de déplacement prend la forme :

$$u(x,t) = \sum_{i\in I} u_i(t)N_i(x) + \sum_{j\in J} b_j(t)N_j(x)(H(x) - H(j)) \tag{8}$$

où $H(j)$ correspond à la valeur de la fonction d'Heaviside généralisée au noeud j.

Intégration numérique

La méthode originale consiste à subdiviser l'élément fini coupé par la fissure en sous-triangles ce qui permet d'intégrer parfaitement l'élément puisque nous retrouvons des points de Gauss de part et d'autre de la fissure. Cette méthode est facilement applicable dans un contexte élastique puisque la projection des variables d'état d'un point de Gauss à un autre ne pose pas de problème. Cependant dès lors que des déformations plastiques apparaissent, l'histoire des variables d'état est importante et la projection d'un point de Gauss à un autre n'est pas triviale. Pour cette raison, la technique consistant à augmenter significativement le nombre de points d'intégration [2] de l'élément original a été préférée dans notre étude. Nous utilisons donc 64 points d'intégration dans tout les éléments enrichis du maillage.

4 Couplage X-FEM et endommagement ductile

Le processus physique de la création d'une fissure est très complexe, en particulier la transition entre la coalescence des vides et l'apparition d'une fissure. Nous allons donc considérer que la transition en question est instantanée. Afin de diminuer la dépendance à la taille de maille, nous avons adopté un critère de transition endommagement-fissure basé sur l'énergie stockée, moyennée au sein d'un patch situé en pointe de fissure. Cette méthode du patch a notamment été utilisée par Haboussa et al [5] impliquant un critère basé sur une contrainte équivalente moyennée.

4.1 Critère de propagation de la fissure

L'état du matériau est supposé être bien décrit via l'énergie libre d'Helmholtz $\omega(\underset{\sim}{\varepsilon}^e, \kappa, T)$ où $\underset{\sim}{\varepsilon}^e$ représente le tenseur des déformations élastiques. L'énergie libre d'Helmholtz se décompose en une partie réversible et une partie stockée, notées respectivement $\omega_r(\underset{\sim}{\varepsilon}^e)$ et $\omega_s(\kappa, T)$:

$$\omega(\underset{\sim}{\varepsilon}^e, \kappa, T) = \omega_r(\underset{\sim}{\varepsilon}^e) + \omega_s(\kappa, T) \tag{9}$$

Reprenant le comportement du matériau résumé dans la Sect.2, les deux contributions de l'énergie libre d'Helmholtz s'expriment comme :

$$\omega_r(\underset{\sim}{\varepsilon}^e) = \frac{1}{2}\underset{\sim}{\varepsilon}^e : \underset{\approx}{C} : \underset{\sim}{\varepsilon}^e \tag{10}$$

$$\omega_s(\kappa, T) = h(\kappa)g(T) \tag{11}$$

où $h(\kappa)$ représente l'énergie stockée d'un point de vue isotherme et $g(T)$ la fonction d'adoucissement thermique. Les forces thermodynamiques s'écrivent comme :

$$\underset{\sim}{\sigma} = \frac{\partial \omega}{\partial \underset{\sim}{\varepsilon}^e} = \frac{\mathrm{d}\omega_r}{\mathrm{d}\underset{\sim}{\varepsilon}^e} = \underset{\approx}{C} : \underset{\sim}{\varepsilon}^e \tag{12}$$

$$r = \frac{\partial \omega}{\partial \kappa} = \frac{\partial \omega_s}{\partial \kappa} = h'(\kappa)g(T) \tag{13}$$

où r représente la force d'écrouissage. Conformément à l'Eq.(3), l'expression de l'écrouissage et de l'adoucissement thermique sont données par :

$$\sigma_y = R_0 g(T) + r(\kappa, T) \tag{14}$$

$$h'(\kappa) = R_\infty [1 - \exp(-k\kappa)]^\beta \tag{15}$$

$$g(T) = 1 - \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^m \tag{16}$$

D'un point de vue incrémental, la valeur de l'énergie stockée à l'étape(n+1) est déduite de sa valeur à l'étape (n) via

$$\omega_s^{n+1} = \omega_s^n + \Delta\omega_s \tag{17}$$

$$\Delta\omega_s = \frac{\partial\omega_s}{\partial\kappa}\Delta\kappa + \frac{\partial\omega_s}{\partial T}\Delta T = h'(\kappa)g(T)\Delta\kappa + h(\kappa)g'(T)\Delta T \tag{18}$$

Cette quantité est alors moyennée au sein d'un patch contenant un ensemble d'éléments finis nommé p (conformément à Eq.(19)), situé au niveau de la pointe de la fissure et dans la direction de propagation :

$$W_{patch} = \frac{1}{A}\sum_{i=1}^{p} \omega_s^i A^i \tag{19}$$

$$A = \sum_{i=1}^{p} A^i \tag{20}$$

où A représente l'aire du patch. En gardant constante l'aire du patch pour différentes tailles de mailles, celà permet de diminuer l'influence de la taille du maillage au niveau des résultats numériques. Le principe est illustré sur la Fig.2. La fissure se propage si

$$F(W_{patch}) = 1 - \frac{W_c}{W_{patch}} > 0 \tag{21}$$

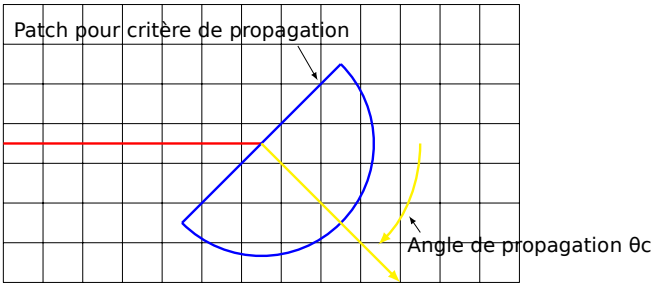


Fig. 2 – Forme du patch utilisé pour l'évaluation du critère de propagation de la fissure

4.2 Vitesse de propagation de la fissure

La vitesse de propagation de la fissure est estimée en utilisant l'expression développée par [8] et adaptée à la présente approche :

$$\dot{a} = C_r F(W_{patch}) = C_r(1 - \frac{W_c}{W_{patch}}) \tag{22}$$

où $\dot{a}$ représente la vitesse d'avancée de la fissure et C_r la vitesse des ondes de Rayleigh dans le matériau. Selon l'équation 22, la vitesse de propagation $\dot{a}$ tend vers C_r quand W_{patch} tend vers l'infini. La valeur critique W_c dépend du matériau et du rayon du patch. D'un point de vue numérique, l'avancée de la fissure est déduite par

$$\Delta a = C_r(1 - \frac{W_c}{W_{patch}})\Delta t \tag{23}$$

4.3 Direction de propagation

L'identification de la direction de propagation de la fissure constitue un autre challenge dans le traitement numérique de la propagation d'une fissure, en particulier en présence d'un matériau élastique-(visco)plastique. Les critères basés sur la mécanique de la rupture, voir Haboussa et al.([5]), ou sur une analyse de bifurcation, voir Hill [7] ou Rice [11], sont souvent utilisés et dépendent de l'application. Dans une première approche, nous nous sommes basés sur les travaux d'Haboussa et al. avec quelques modifications. La présence d'endommagement près de la pointe de la fissure provoque une chute des contraintes. D'un point de vue physique, se baser sur le champ de contrainte/déformation élastiques afin d'en déduire une direction de propagation ne semble donc pas adapté à un tel problème. Une autre approche consiste à se baser sur le champ des déformations plastiques près de la pointe de fissure afin d' identifier une direction dans laquelle va se propager la fissure. Dans notre cas, une telle approche semble plus adaptée à ce genre de problème. Dans un premier temps, on définit un tenseur des déformations plastiques défini dans le repère local de la fissure et moyenné au sein du patch présenté auparavant. La direction de propagation est alors définie par

$$\theta_c = 2\arctan\left(\frac{1}{4}\left[\frac{\varepsilon^p_{22}}{\varepsilon^p_{12}} - sign(\varepsilon^p_{12})\sqrt{8+\frac{\varepsilon^p_{22}{}^2}{\varepsilon^p_{12}}}\right)\right. \tag{24}$$

5 Application

Afin d'évaluer la capabilité de notre approche, nous avons considéré le cas d'une plaque 2D (déformations planes) pré-entaillée soumise à un chargement de type Mode I, voir Fig.3. Les éléments finis utilisés sont des quadrilatères avec 64 points d'intégration et enrichis suivant la formulation présentée Sect.3. Le comportement du matériau est décrit via la formulation présentée Sect.2. La X-FEM et le comportement du matériau ont été implantés dans le code de calcul par éléments finis Abaqus via des routines utilisateurs. Pour des raisons de confidentialité, les valeurs des constantes du matériau ne sont pas données. Les noeuds de la surface supérieure de la plaque sont soumis à une vitesse de chargement constante de 1m/s.

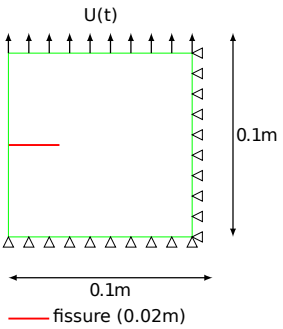
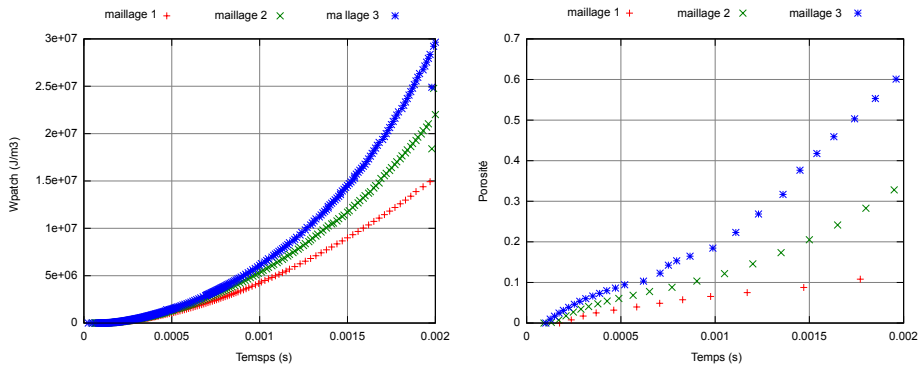


Fig. 3 – Application à une plaque pré-entaillée soumise à un chargement en tension

5.1 Tension sans propagation de la fissure

Dans un premier temps, nous allons étudier une plaque pré-entaillée sans propagation. L'évolution de l'énergie stockée W_{patch} dans le patch (voir Eq.19) avec un rayon de 6.25mm et un angle de 0° ainsi que de la porosité dans l'élément contenant le pointe de la fissure pour trois différents maillages (le maillage 3 est le plus fin et le maillage 1 est le plus grossier) est tracée sur la Fig.4. Dans le cas d'un matériau ductile endommageable, le critère classiquement utilisé afin de propager la fissure est une porosité critique. La comparaison de ce critère avec le critère de propagation présenté Sect.4, va nous permettre de faire un premier bilan sur la méthode de propagation proposée dans ce travail. Considérant la Fig.4 on peut observer une diminution de l'influence de la taille de maille en utilisant le critère basé sur l'énergie stockée en pointe de fissure comparé à la porosité présente dans l'élément contenant la pointe de la

fissure. Ce phénomène de concentration de la porosité près de la pointe de la fissure a été observé par [6] et pose un réel problème lorsqu'une porosité critique est utilisée comme critère de propagation.

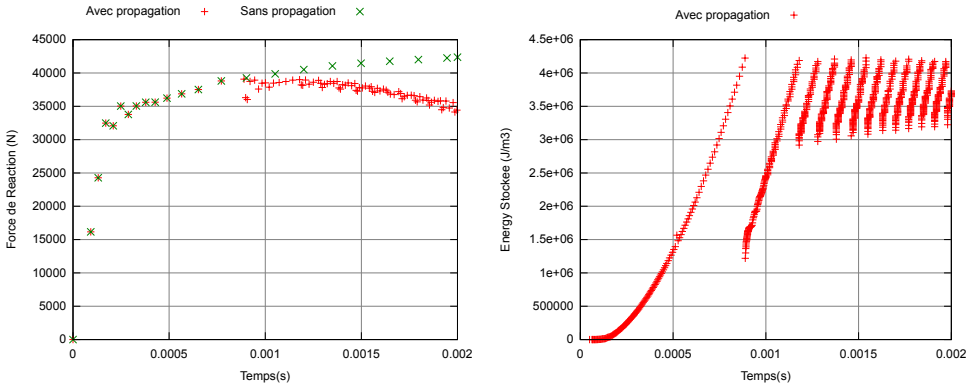


(a) (b)

Fig. 4 – Comparaison de l'évolution de a) Wpatch et de b) la porosité en pointe de fissure durant l'essai pour un angle de 0° et un rayon de patch de 6.25mm

5.2 Tension avec propagation de la fissure

La méthode présentée Sect.4 qui permet de propager la fissure, necessite deux paramètres (W_c le critère de propagation et le rayon du patch). Ces deux quantités doivent être définies au moyen d'une campagne expérimentale. Dans une première approche, pour évaluer la capacité de notre modèle nous choisissons des valeurs arbitraires. Ainsi le rayon du patch est de 6.25mm et W_c est égale à 4.10^6 J.m^{-3}. La valeur de W_c n'est pas tout à fait arbitraire puisque nous nous basons sur les courbes représentant l'évolution de la porosité en pointe de fissure afin de la définir. Ainsi une valeur de 4.10^6 J.m^{-3} semble raisonnable vis à vis de la porosité que l'on peut observer (≈10% pour le maillage 2). La force de réaction avec et sans propagation est alors tracée sur la Fig.5 (a). Considérant la Fig.5 (a), on peut observer que la propagation de la fissure provoque une chute de la réponse de la force de réaction, comme attendue. L'évolution de l'énergie stockée dans le patch est présentée sur la Fig.5 (b). D'après la Fig.5 (b), Wpatch



(a) (b)

Fig. 5 – a) Evolution de la force de réaction avec et sans propagation et b) Ecolution de Wpatch durant la propagation

augmente avec l'augmentation du déplacement de l'arête supérieure de la plaque, atteint W_c, dépasse W_c, puis chute brutalement en-dessous de W_c. Par la suite, ce scénario se répète. Cette évolution en dents de scies peut être expliquée par le fait que le nouvel incrément de fissure doit être suffisament important pour couper entièrement l'élément qui contenait l'ancien fond de fissure. Le rafinement du maillage permettra de réduire ces fluctuations dans l'évolution de Wpatch. On peut enfin noter que la première

chute dans l'évolution de Wpatch est largment plus importante que les suivantes qui sont du même ordre de grandeur. Lors de la première propagation, le pas de temps étant important, la fissure se propage au travers de trois éléments. Par la suite du calcul, le pas de temps du calcul est moindre et la fissure se propage élément par élément.

6 Conclusion

Ce travail est voué au traitement numérique de la propagation d'une fissure dans un matériau dont la rupture résulte de l'initiation, de la croissance et de la coalescence des vides. Notre approche numérique couple un matériau ayant un comportement de type Gurson [4] [12] [9] avec la méthode des éléments finis étendus [10] pour reproduire la propagation d'une fissure dans une structure 2D pré-entaillée soumise à un chargement de type Mode I. Le critère de propagation est basé sur l'énergie stockée dans un patch situé près de la pointe de la fissure. Ce critère basé sur un patch permet d'atténuer la dépendance au maillage observée en régime adoucissant. Dans une première approche, la direction de propagation est déduite du champ des déformations plastiques près de la pointe de la fissure. L'incrément d'avancée de la fissure est défini en utilisant la définition introduite dans [8] adaptée à notre approche. Les premières simulations donnent des résultats encourageants. Une étude de la dépendance de l'évolution de Wpatch à la température ainsi qu'à la vitesse de chargement devra être menée afin d'observer l'influence de ces deux quantités. Enfin une campagne expérimentale devra être menée afin de définir les quantités nécessaires dans notre méthode de propagation à savoir la valeur de W_c en fonction d'une taille de patch choisie arbitrairement.

Ce travail a été cofinancé par la DGA dans le cadre de la Convention 2010 60 074.

Références

[1] N. Aravas. *On the numerical integration of a class of pressure-dependent plasticity models*, Int. J. Num. Methods Eng., 1395–1416, 1987.

[2] T. Elguedj, A. Gravouil, A. Combescure. *Appropriate extended functions for X-FEM simulation of plastic fracture mechanics*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 501–515, 2006.

[3] S. Graff, S. Forest, S. Strudel, J.L. Prioul, P. Pilvin, J.L. Béchade. *Strain localization phenomena associated with static and dynamic strain ageing in notched specimens : experiments and finite element simulations*, Materials Science & Engineering, 181–185, 2004.

[4] A.L. Gurson. *Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth : Part I - Yield criteria and flow rules for porous ductile media*, J. Eng. Mat. Tech., 2-15, 1977.

[5] D. Haboussa, D. Grégoire, T. Elguedj, H. Maigre, A. Combescure. *X-FEM analysis of the effects of holes or other cracks on dynamic crack propagations*, Int. J. Num. Methods Eng., 618–636, 2011.

[6] R. Hambli. *Comparison between Lemaitre and Gurson damage models in crack growth simulation during blanking process*, Int. J. Mech. Sciences, 2769–2790, 2001.

[7] R. Hill. *Acceleration waves in solids*, J. Mech. & Phy. of Solids, 1–16, 1962.

[8] M. Kanninen, C.H. Popelar. *Advanced Fracture Mechanics*, Oxford University Press, 1985.

[9] P. Longère, A.G. Geffroy, B. Leblé, A. Dragon. *Modelling the Transition between Dense Metal and Damaged (Micro-Porous) Metal Viscoplasticity*, Int. J. Damage Mech., 1020-1063, 2012.

[10] N. Moës, J. Dolbow, T. Belytschko. *A finite element method for crack growth without remeshing*, Int. J. Num. Methods Eng., 131-150,1999.

[11] J.R. Rice. *The Localization of Plastic Deformation*,Koiter, W. (Ed.). Amsterdam, North-Holland, 207–220, 1976.

[12] V. Tvergaard, A. Needleman. *Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar*, Acta Metall., page157-page169, 1984.

[13] G. Zi, T. Belytschko. *New crack-tip elements for XFEM and applications to cohesive cracks*, Int. J. Num. Methods Eng., 2221-2240,2003.