



Research Paper

DOI : 10.5281/zenodo.3738703

Open access



Analyse numérique de la déchirure ductile d'un polymère : cas du Polyvinylidifluoride, PVDF

Numerical analysis of ductile failure of polymers materials: case of Polyvinylidifluoride, PVDF

Ali BENHAMENA ^{a,*}, Fatima BENAOU ^a, Khelil FOUJIL ^a, Abdelghani BALTACH ^a, Ahmed DRAI ^b

^a LPQ3M, BP 763, route de Mamounia, Université de Mascara, Algérie

^b Département de génie mécanique, BP 763, route de Mamounia, Université de Mascara, Algérie

ARTICLE INFO

Article history :

Received 22 January 20

Received in revised form 25 March 20

Accepted 01 April 20

Keywords:

PVDF polymer; triaxiality; temperature; hydrostatic pressure; GTN; MEF; J Integral ; arc-shaped specimen: CTPB.

Mots clés:

Polymère PVDF ; triaxialité ; température ; pression hydrostatique ; GTN ; MEF ; Intégrale J ; arc-shaped specimen : CTPB.

RÉSUMÉ

Le but de notre travail est d'apporter une contribution à l'étude de la déchirure ductile en utilisant les concepts de l'approche locale en mécanique de la rupture dans le cas d'un polymère (Polyvinylidifluoré ; PVDF). La simulation numérique avec le code de calcul par éléments finis Ansys a été réalisée à l'aide d'un modèle micromécanique basé sur l'approche locale de la rupture ductile : le modèle Gurson-Tvergaard-Needleman ; GTN. Nous avons validé ce modèle à l'aide des résultats expérimentaux. Le modèle GTN permet de reproduire fidèlement le comportement mécanique macroscopique du matériau PVDF en termes de contrainte en fonction de la déformation pour différent niveau de température. La sensibilité du comportement mécanique du PVDF à l'effet de la triaxialité des contraintes, de la température et de la pression hydrostatique ont été examinés. En second point, l'application de la mécanique de la rupture élasto-plastique basée sur la détermination de l'intégrale J pour étudier le comportement en rupture du PVDF et sa sensibilité à l'élévation de température.

ABSTRACT

The aim of this work is to make a contribution to study the ductile failure of polymers materials (Polyvinylidifluoride, PVDF) using the concepts of the local approach in fracture mechanics. The numerical simulation with the Ansys finite element code was carried out using a micromechanical model based on the local approach in order to study the ductile failure of polymers: the Gurson-Tvergaard-Needleman model; GTN. The validation of this finite element model was carried out using the experimental results. The GTN model faithfully reproduces the macroscopic mechanical behavior of the PVDF material in terms of stress versus strain at different level of temperature. The sensitivity of the PVDF mechanical behavior to some parameter such as: effect of triaxiality of stresses, temperature and hydrostatic pressure were examined. Secondly, the application of the elastoplastic fracture mechanics based on the determination of the J integral is used in order to study the fracture behavior of PVDF and its sensitivity to rise of level of temperature.

* Corresponding author. Tel.: +273 771 18 03 36.

E-mail address: ali.benhamena@univ-mascara.dz

1 Introduction

Les tuyaux et les coudes de raccordement sont des composants importants de tout système de tuyauterie pour le transport des hydrocarbures. Ces structures sont soumises à des charges complexes compte tenu de leur configuration géométrique et de la multiplicité des conditions de charge en service. Les tuyaux installés au-dessus du sol sont d'un grand problème. Au cours de leur fonctionnement, ils peuvent générer plusieurs dommages inattendus. Toute défaillance d'ingénierie catastrophique est une préoccupation majeure, car elle implique non seulement des pertes économiques et une perturbation des services, mais peut également entraîner des pertes en vies humaines, ce qui est très regrettable. Les tuyaux en plastique ont en général une bonne propriété d'isolation thermique et électrique, de faible densité et de haute résistance aux produits chimiques, mais mécaniquement sont plus faible et présentent un module d'élasticité plus faible par rapport aux tuyaux métalliques selon Jaroslav et al. [1]. Les tuyaux en plastique offrent plusieurs avantages par rapport aux tuyaux métalliques: ils ont une bonne résistance à l'usure et à la corrosion, faible coût, facile d'installation, la production de forme complexe (coude de raccordement dans les canalisations), en plus supporte les tremblements de terre et l'affaissement du sol. Mais les propriétés mécaniques pour les matériaux polymères sont très sensibles à certains paramètres tels que chargement, vitesse de déformation et température. En service, la combinaison de ces facteurs sous une pression interne et l'effet de l'environnemental (Température, temps) a tendance de réduire de manière significative la durée de vie de ces structures selon Benhamena et al. [2, 3]. Ces effets conduit les auteurs de se concentrer de la présente étude en vue de faire une contribution de cette thématique. L'évaluation de l'intégrité des pipelines de Polyvinylidifluoré (PVDF) avec un défaut implique une analyse non-linéaire au niveau du front de la fissure. L'analyse par éléments finis (MEF) est un outil important pour concevoir un composant mécanique en pratique tel que les pipelines. Dans notre environnement, tous les matériaux sont poreux. De par leurs techniques de fabrication, les matériaux plastiques et composites sont ceux contenant le plus d'inclusions d'air. Alors la rupture ductile est le mode prédominant de rupture des matériaux polymères à différents niveaux de température. C'est pourquoi des critères spécifiques aux matériaux poreux ont été élaborés, tenant compte de l'effet de la pression hydrostatique. Le critère le plus largement accepté c'est le critère de Gurson [4]. Le modèle de Gurson a d'abord été modifié par Tvergaard et Needleman [5] pour prendre en compte les interactions entre les cavités et la coalescence. Le but de cette étude est d'analyser l'effet de la triaxialité des contraintes et du paramètre de température sur l'endommagement d'un matériau polymère basé sur un modèle micromécanique de Gurson-Tvergaard-Needleman ; GTN. En second lieu, c'est l'application de la mécanique de la rupture élasto-plastique pour étudier le comportement en rupture du polymère (PVDF) et sa sensibilité à l'élévation de température.

2 Modèle géométrique et matériau

L'utilisation croissante des matériaux polymères dans les applications d'ingénierie exige de nouvelles méthodologies afin d'évaluer la capacité de matériau à supporter des charges. La ténacité à la rupture de l'impact de pièces structurales cylindriques telles que les récipients sous pression ; Mouzakis et al. [6] et les conduites sous pression pour gaz combustible et des matériaux de distribution d'eau ; Dale et al. [7], Greig et al. [8], Han et al. [9] peut être très important d'un point de vue pratique. Les essais de rupture est parfois ambiguë et n'est pas facile à réaliser, car un échantillon standard ne peuvent pas être facilement fabriqués et préparés pour faire l'essai. Pour cette raison, les éprouvettes en forme d'arc (arc-shaped specimen : CTPB, (figure 1-a) ont été souvent utilisé pour les essais de tuyaux ou récipients sous pression (ASTM E399-09), [10]. Afin d'examiner la sensibilité du comportement mécanique du PVDF à l'effet de la triaxialité des contraintes et de température, l'analyse numérique a été faite sur différentes géométries avec des chargements en traction uniaxiale. Une schématisation de la géométrie des éprouvettes axisymétriques entaillées est donnée à la figure 1-b. Ces éprouvettes sont appelées AE (Axisymétriques Entaillées) suivi de la valeur du rayon d'entaille en millimètres. L'éprouvette testée (AE4) à un diamètre en fond d'entaille de 6 mm et un fût de 14 mm. Ces essais permettront la détermination de certains paramètres liés aux modèles basés sur l'approche locale. Le matériau utilisé de la présente étude est un Polyvinylidifluoré (PVDF) caractérisé à différents niveaux de températures par Laiarinandrasana et al. [11]. Les propriétés mécaniques élastiques à la température ambiante sont : $E = 1760 \text{ MPa}$ et $\nu = 0,3$. La figure 1-c illustre la courbe contrainte déformation à deux niveaux de températures.

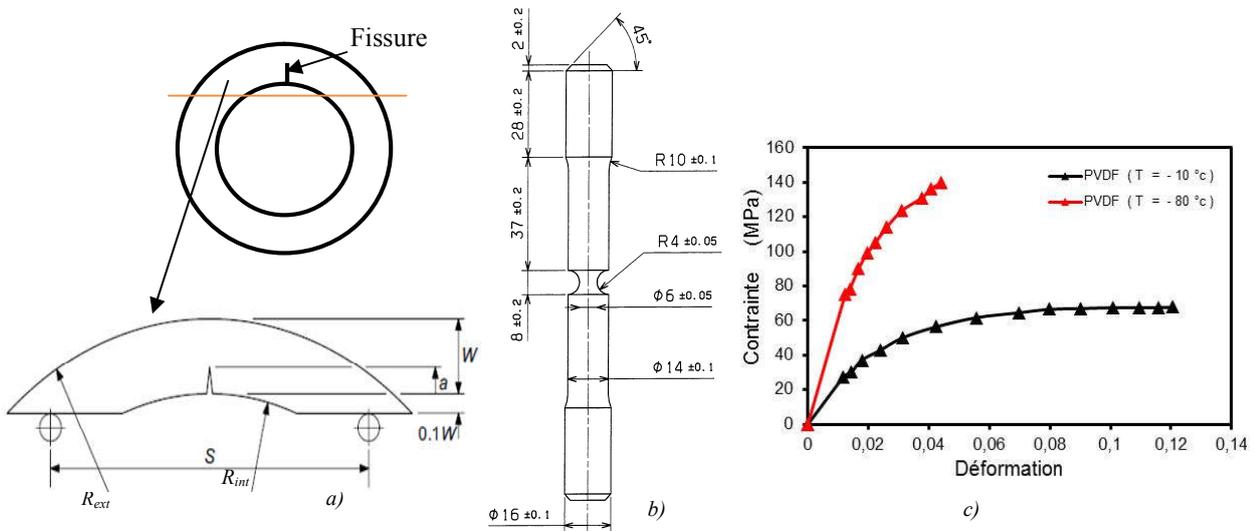


Fig. 1 – (a) arc-shaped specimen : CTPB, (b) Eprouvettes axisymétriques entaillées AE4, (c) courbe contrainte déformation du PVDF [11].

3 Modèle élément finis

L'analyse par éléments finis (Méthode des Eléments Finis : MEF) est un outil important pour la conception d'une composante mécanique. Selon les dimensions de l'éprouvette, un modèle en deux dimensions a été généré en utilisant le logiciel commercial ANSYS® (ANSYS v11.0 [12]) pour analyser l'effet de la triaxialité des contraintes et de température sur le comportement du PVDF.

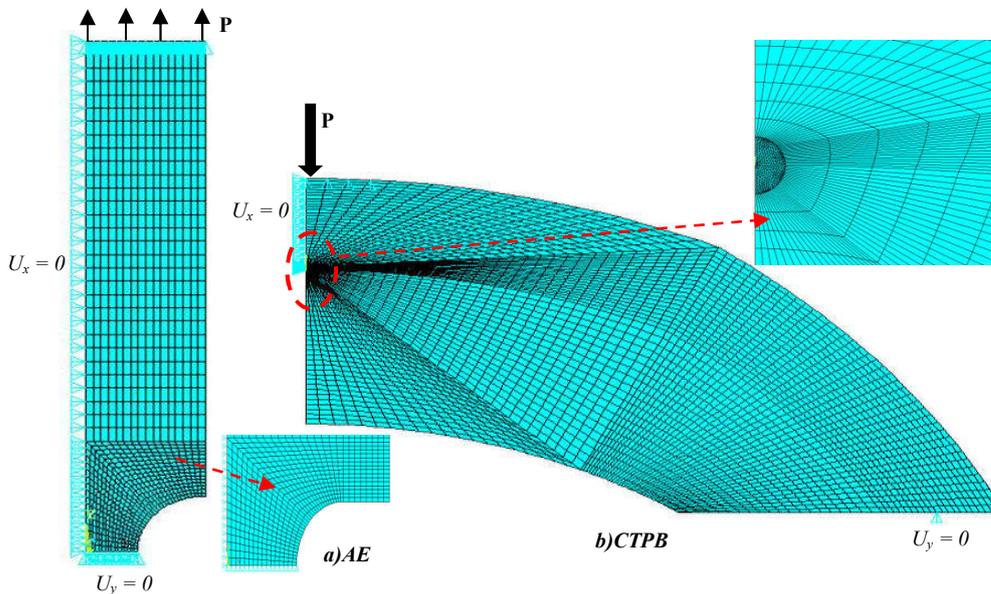


Fig. 2 – Maillage avec les conditions aux limites et chargement : (a) Eprouvettes AE, (b) Eprouvette CTPB

Pour la détermination des paramètres locaux (porosité, contraintes critiques, déformations plastiques, etc.), nous avons modélisé différentes éprouvettes axisymétriques entaillées (AE4). Nous avons considéré la symétrie de l'éprouvette par rapport au plan de section minimale au fond d'entaille et la symétrie de révolution. Par conséquent, seul un quart de l'éprouvette a été modélisé en 2D axisymétrique. Le maillage de chaque éprouvette AE est composé de plusieurs zones réglées. La section minimale est maillée de façon très dense car cette zone est la plus déformée et endommagée. Le maillage avec les conditions aux limites est présenté sur la figure 2-a. La figure 2-b montre également, le maillage par élément finis avec les conditions de chargement pour l'éprouvette arc-shaped specimen : CTPB. En tenant compte de la

symétrie du chargement et la géométrie, seule la moitié du modèle est étudié afin de réduire le temps de calcul. Les éléments quadratiques sont utilisés dans la modélisation. La singularité à la proximité de la fissure est modélisée par des éléments spéciaux afin d'accroître la précision de calcul. Globalement, le modèle éléments finis contient 1360 éléments et 1447 nœuds pour la première configuration (éprouvette AE), pour la deuxième configuration (CTPB) ; 4688 éléments et 4467 nœuds sont considérés. La théorie de la plasticité incrémentale est introduite pour modéliser la non-linéarité des matériaux. La méthode itérative de Newton-Raphson est utilisée comme une approche pour résoudre les équations non linéaires par éléments finis.

4 Modèle de GursonTvergaard et Needleman GTN

Dans le cas d'un endommagement ductile, le mécanisme de dégradation est l'apparition et la croissance de vides microscopiques a été étudié par le modèle de Gurson [4].

$$\phi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_0^2} + 2f \cosh\left(\frac{3\sigma_m}{2\sigma_0}\right) - 1 - f^2 = 0 \tag{1}$$

où f représente la fraction volumique de cavité et σ_0 la contrainte d'écoulement de la matrice.

Ce modèle surévalue la ductilité car il ne tient pas compte des interactions entre les cavités. C'est pourquoi Tvergaard : Tvergaard et Needleman, [5] améliore le modèle en définissant trois nouveaux paramètres q_1 , q_2 et q_3 .

$$\phi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_0^2} + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_0}\right) - 1 - (q_3 f^*)^2 = 0 \tag{2}$$

5 Résultats et discussions

5.1 Validation du modèle élément finis

La figure 3 présente les isovaleurs de la pression hydrostatique prédites par le modèle GTN pour la géométrie AE4 à deux niveaux de température ($T = -10$ et -80°C). On observe que la pression hydrostatique (figure 3) a lieu au centre de l'éprouvette. Cette dernière est traduite par un phénomène de concentration en mécanique, L'élément qui correspond au milieu de l'éprouvette est le plus dangereux, car la composante de la contrainte qui déclenche l'amorçage (cavitation) et la propagation de la fissure dans la plaque atteigne leur valeur maximale. Ce point sera le premier à se rompre si une charge critique est atteinte. Ces résultats sont très cohérents avec les observations expérimentales de Chambert [13] et numérique de Benseddiq et al. [14]. A titre de comparaison, pour une température de service faible ($T = -80^\circ\text{C}$) la pression hydrostatique produite est de l'ordre de 310 % à celle produite par une température élevée ($T = -10^\circ\text{C}$). L'explication de ce phénomène est que les propriétés mécaniques (la limite élastique, le module d'Young et le taux d'écroutissage) du PVDF change avec l'augmentation de la température. G'Sell et Haudin [15] ont montré que la limite élastique et le durcissement diminuent progressivement quand la température de l'essai augmente pour le cas de polyéthylène (PE).

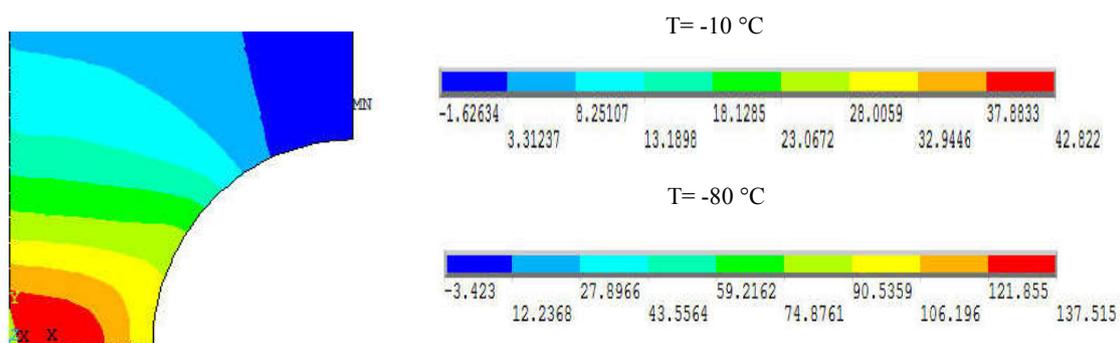


Fig. 3 – Pression hydrostatique à $T = -10$ et -80°C

Les figures 4-a et b illustrent les réponses obtenues en grandes déformations lors de la simulation d'un essai de traction numériquement et prédit par le modèle de GTN en termes de contrainte-déformation du PVDF à deux niveaux de température ($T = -10$ et -80°C) sur éprouvette AE4. Sur ces deux figures, on présente les résultats obtenus numériquement comparés avec l'expérimentale de Laiarinandrasanaet [11]. Du point de vue qualitatif les évolutions dans les deux figures présentent des réponses similaires quel que soit le niveau de température. L'explication de ce comportement mécanique est que la réponse en déformation d'un polymère amorphe dépend fortement des conditions de sollicitations mais également de l'environnement et de son histoire thermomécanique. La température est un paramètre très important conditionnant la réponse des polymères. Autrement dit, la limite élastique et le durcissement diminuent progressivement quand la température de service augmente. On peut constater que les résultats numériques sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Le PVDF passe d'un comportement élasto-plastique (température élevée : ($T = -10^{\circ}\text{C}$) à un comportement élastique pour des niveaux de températures faibles ($T = -80^{\circ}\text{C}$).

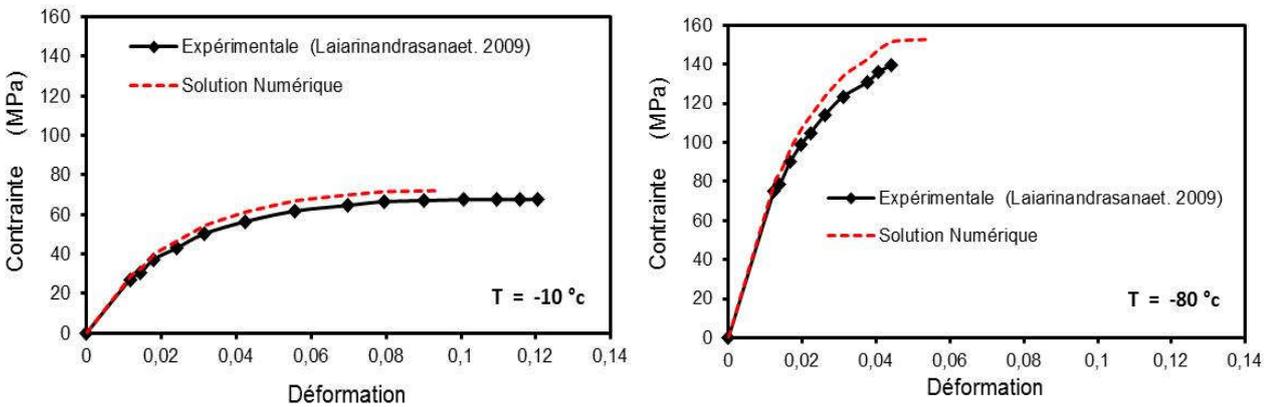


Fig. 4 – Contrainte-déformation du PVDF à deux niveaux de température ($T = -10$ et -80°C), comparaison expérimentale et numérique

5.2 Effet de la taille de la fissure

Dans la Figure 5, on présente la variation du facteur d'intensité de contrainte FIC en fonction de la taille de la fissure déterminé numériquement. On remarque que le facteur d'intensité de contrainte croît progressivement avec le développement de la taille de la fissure. Il convient de noter que le FIC varie exponentiellement avec une taille de fissure plus grande. La figure 5 montre également, que les résultats numériques sont en bon accord avec la solution analytique selon la norme ASTM (ASTM E399-09), [10]. Selon cette norme (ASTM), pour le cas des éprouvettes CTPB, le facteur d'intensité de contrainte est exprimé par :

$$K = \left(\frac{P}{B} \frac{S}{W^{3/2}} \right) \left[1 + \left(1 - \frac{R_{int}}{R_{ext}} \right) h_1(a/W) \right] f_1(a/W) \tag{3}$$

Avec
$$h_1\left(\frac{a}{W}\right) = 0.29 - 0.66 \left(\frac{a}{W}\right) + 0.37 \left(\frac{a}{W}\right)^2$$

et
$$f_1\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{0.677 + 1.078 \left(\frac{a}{W}\right) - 1.43 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.669 \left(\frac{a}{W}\right)^3}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

R_{int} et R_{ext} : diamètre interne et externe du pipe, respectivement. B : épaisseur de l'éprouvette. $W = R_{int} - R_{ext}$. $S = 4W$.
 a : longueur de la fissure. P : Charge appliquée.

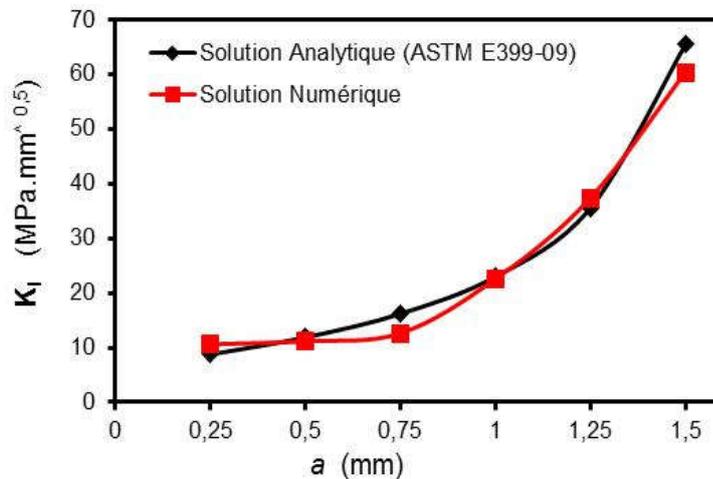


Fig. 5 – Comparaison entre les résultats obtenus par la méthode des éléments finis et analytique

5.3 Effet de la température

Les propriétés mécaniques des matériaux polymères (PVDF) sont sensibles aux chargements appliqués, la vitesse de déformation et de la température. Ce matériau perd sa résistance mécanique à des températures élevées. L'élévation de température est un facteur très important pour prédire le comportement à la rupture des conduites en polymère. Afin d'étudier cet effet (effet de température), nous envisageons le modèle géométrique précédent avec comportement de matériau à différents niveaux de température ($T = 20\text{ °C}$; (température ambiante), -10 °C et -80 °C).

La figure 6 présente la variation de l'intégrale J en fonction du déplacement imposé pour différents niveaux de température. Selon cette figure, on peut noter que l'augmentation de l'intégrale J est de forme exponentielle en fonction du déplacement imposé (chargement appliqué) pour des températures plus faibles (absence de déformation plastique : comportement élastique linéaire), alors que l'évolution est tout à fait linéaire par rapport à la charge à la température ambiante (présence de déformation plastique : comportement élasto-plastique). Nous notons également que la variation des températures a un effet considérable sur la variation intégrale J . A titre d'exemple, pour un déplacement imposé $d = 0,4\text{ mm}$, Le taux de réduction des valeurs de intégrales J à température faible ($T = -80\text{ °C}$) est d'environ 260% à celle à la température ambiante ($T = 20\text{ °C}$). La raison principale de ce comportement variable est due au changement de température de service ; ce qui conduit au changement de la loi de comportement du matériau et par conséquent les propriétés mécaniques.

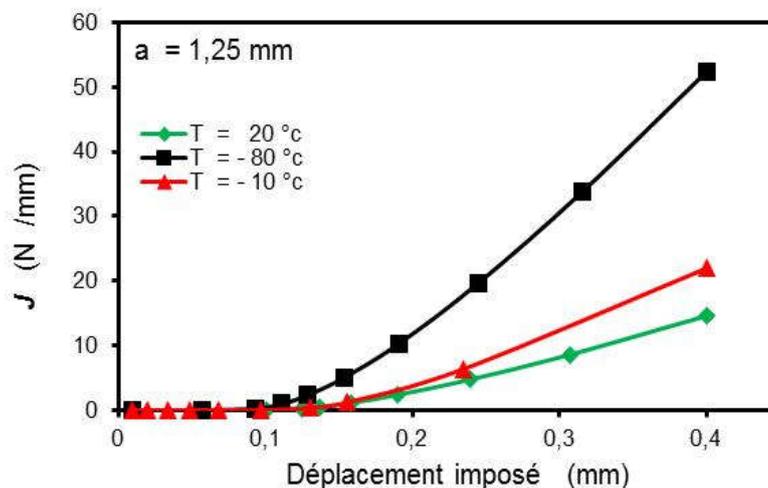


Fig. 6 – Evolution de l'intégrale J en fonction du chargement

L'influence de la température sur l'évolution de l'intégrale J est présentée sur la figure 7. Cette dernière montre que la variation de l'intégrale J varie selon deux zones différentes (I et II). La première zone ($-100\text{ °C} < T \leq -50\text{ °C}$) montre que l'intégrale J diminue sensiblement avec l'augmentation de niveau de température (rupture fragile). Le taux de propagation de la fissure est important. Dans La deuxième zone ($-50\text{ °C} < T \leq 20\text{ °C}$), nous remarquons qu'il ya une diminution progressive de la valeur de l'intégrale J. Cette zone est caractérisée par une relation linéaire entre le paramètre énergétique (l'intégrale J) et la température de service (rupture ductile). Ce phénomène peut s'expliquer que le PVDF semble être l'un des polymères qui présente la plus importante ductilité à température ambiante tant dit que son comportement est linéaire élastique à des niveaux de température très faible. Cet effet a été mis en évidence par G'Sell et Haudin [15]. Ces hauteurs ont étudié l'influence de la température sur le comportement plastique du polyéthylène (PE) et du polycarbonate (PC). Dans le cas du PE, la limite élastique et le durcissement diminuent progressivement quand la température de l'essai augmente. Pour le PC, ils ont observé également une diminution de la contrainte d'écoulement quand la température approche à la température de transition.

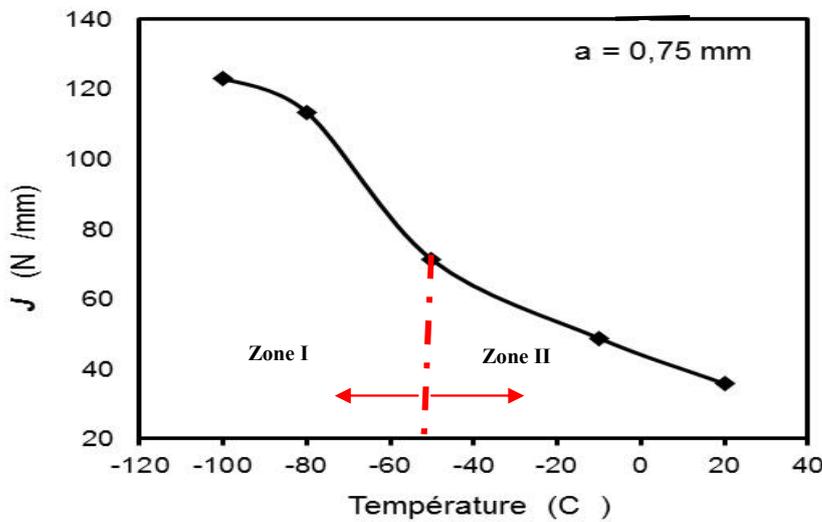


Fig. 7 – Evolution de l'intégrale J en fonction de la température

La figure 8 présente les iso-valeurs de la contrainte équivalente de Von Mises du modèle élément finis à deux niveaux de température ($T = -10\text{ °C}$ et -80 °C). Nous remarquons que le champ de contraintes est important à la pointe de la fissure puis s'affaiblit lorsqu'on s'éloigne à la discontinuité géométrique (fissure). Par conséquent la présence de ce gradient de contrainte très élevé à cet endroit peut favoriser la propagation qui conduit à une rupture inattendue par la présence du chargement de service. Nous remarquons que la zone plastique se développe principalement en avant de la fissure. C'est le cas d'une plastification en mode I pour des angles différents de zéro selon le critère de Von Mises.

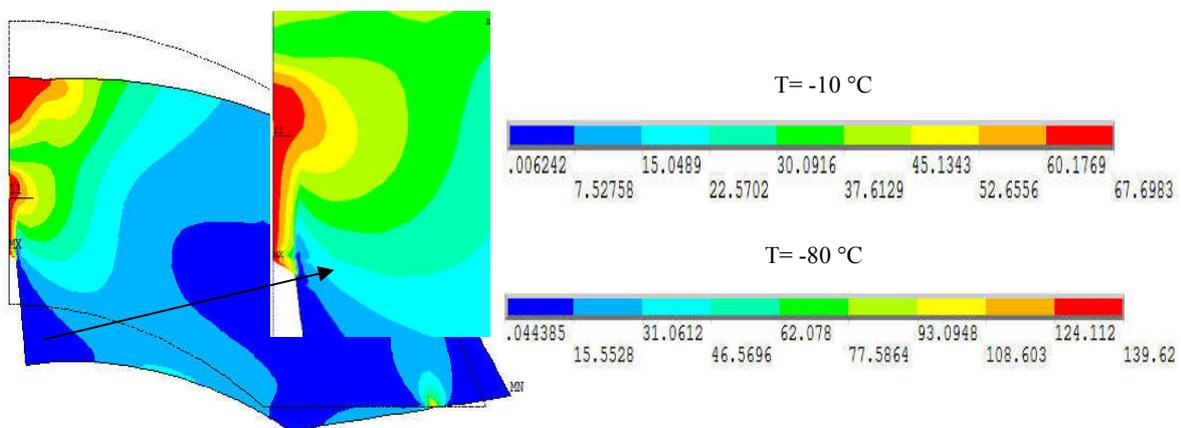


Fig. 8 – Représentation du Contour des contraintes de Von Mises pour différente températures

6 Conclusion

Cette étude a été réalisée dans le but d'analyser l'effet de la triaxialité des contraintes sur l'endommagement d'un matériau polymère basé sur le modèle micromécanique de Gurson-Tvergaard-Needleman ; GTN sur des éprouvettes axisymétriques entaillées AE en traction et son rupture sur des éprouvettes arc-shaped specimen : CTPB. Les résultats obtenus nous permettent de déduire les conclusions suivantes :

- Une bonne corrélation entre la simulation numérique et les résultats analytiques,
- Le niveau d'une contrainte hydrostatique sous une condition de chargement va conduire à un processus de cavitation,
- La pression hydrostatique à un effet déterminant sur la déformation plastique des polymères,
- Le comportement mécanique du PVDF est très sensible à l'élévation de température,
- L'intégrale J est fortement influencée par la condition de chargement et la température,
- Le PVDF passe d'un comportement élastoplastique (température élevée) à un comportement élastique pour des niveaux de températures faibles,
- Nous pouvons dire que la ductilité d'un matériau (courbe d'écrouissage) joue un rôle très important sur le niveau de l'intégrale J et par conséquent sur la rupture.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Jaroslav, Finite element analysis and simulation of polymers: a bibliography, modelling and simulation in materials. Sci. Eng. Vol.5 N°6 (1997) pp. 615-651.
- [2] A. Benhamena, B. Bachir Bouiadjra, A. Amrouche, G. Mesmacque, N. Benseddiq, M. Benguediab. Three finite element analysis of semi-elliptical crack in high density poly-ethylene pipe subjected to internal pressure. Materials and Design. Vol.31 (2010) pp. 3038-3043.
- [3] Benhamena A, L. Aminallah, B. Bachir Bouiadjra, M. Benguediab, A. Amrouche, N. Benseddiq. J integral solution for semi-elliptical surface crack in high density poly-ethylene pipe under bending. Materials and Design. Vol.32 (2011) pp. 2561-2569.
- [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. Journal of Engineering Materials and Technology. Vol.99 (1977) pp. 2-15.
- [5] V. Tvergaard, A. Needleman. Effects of non-local damage in porous plastic solids. Int. J. Solid. Struct. Vol.32 (1995) pp. 1063-1077.
- [6] D. E. Mouzakis, J. Karger-Kocsis. Effects of gasoline absorption on the tensile impact response of HDPE/Selare laminar microlayer composites. J. Appl. Polym. Scien. Vol.68 (1998) pp. 561-569.
- [7] B. A. Dale, M. C. Moyer, T. W. Sampson. A test program for the evaluation of oil filed thread protectors. J. Pet Technol. (1985) pp. 306-314.
- [8] J. M. Greig, P. S. Leever, P. Yayla. Rapid crack propagation in pressurized plastic pipe. I: full scale and small scale RCP testing. Eng. Fract. Mech. Vol.42 (1992) pp. 663-673.
- [9] L. H. Han, Y. C. Deng, C. D. Liu. The determination of JIC for polyethylene pipe using non-standard arc-shaped specimen. Int. J. of Pressure Vessels Piping. Vol.76 (1999) pp. 647-651.
- [10] ASTM Standard E399-12e2, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials" Annual Book of ASTM Standards, Part 03.01.
- [11] L. Laiarinandrasana, J. Besson, M. Lafarge, G. Hochstetter. Temperature dependent mechanical behaviour of PVDF: Experiments and numerical modelling. International Journal of Plasticity. Vol.25 (2009) pp. 1301-1324.
- [12] ANSYS v11.0, Ansys Inc. Documentation, ANSYS Elements Reference
- [13] J. Chambert, Analyse et modélisation de la rupture ductile par des modèles micromécaniques fondés sur l'approche locale, Thèse de Doctorat, Université Balaise Pascal-Clermont II, 2001.
- [14] N. Benseddiq and A. Imad. A ductile fracture analysis using a local damage model. Int. J. of Pressure Vessels Piping. Vol.85 (2008) pp. 219-273.
- [15] C. G'Sell, J. M. Haudin. Lois de comportement mécanique des polymères solides. Introduction à la mécanique des polymères. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1995.