

Endommagement par cavitation dans les élastomères : analyses expérimentale et numérique

A. Hamdi ^a, M. Naït Abdelaziz ^b

^a Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs d'El Manar, Campus universitaire, 2092 Manar II, Tunis

^b Université des Sciences et Technologies de Lille, Polytech'Lille, avenue P. Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

Résumé :

Dans ce travail nous avons analysé le phénomène de cavitation dans les élastomères en combinant les approches expérimentale, théorique et numérique. Nous avons réalisé des essais spécifiques qui ont mis en évidence ce phénomène dans un matériau de type Styrene Butadiène Rubber (SBR). La nucléation, la taille et le nombre des vacuoles observées en post-mortem sur les faciès de rupture, semblent dépendre du facteur de forme des éprouvettes qui traduit le degré de confinement de celles-ci. Numériquement, nous avons modélisé à l'aide de la Méthode des Eléments Finis (MEF) nos essais expérimentaux et avons tenté de prédire la nucléation des cavités dans le matériau étudié en utilisant deux modèles théoriques : le modèle de Ball et celui de Hou et Abeyaratne. Ces deux modèles ont conduit à des prédictions similaires qui, de plus, s'avèrent en bon accord avec les observations expérimentales.

Abstract :

In this study, we have analysed the cavitation phenomenon in rubber-like materials by combining experimental, theoretical and numerical approaches. We have carried out on a Styrene Butadiene Rubber (SBR) specific tests that pointed out this phenomenon. Then, we have numerically modelled with Finite Element Method (FEM) the hydrostatic depression tests and compared Ball's and Hou & Abeyaratne's models as regard to their capacity to predict the cavity nucleation in the material. The two models have led to similar results which, besides, happen to well fit experimental observations suggesting that the appearance of cavities in elastomers depends on the confinement degree of the specimen.

Mots clefs : MEF, élastomère, endommagement, cavitation, pression hydrostatique.

1. Introduction

Les élastomères sont des matériaux quasi-incompressibles, ce qui favorise, sous certaines conditions de chargement, l'apparition des cavités dans le matériau conduisant à sa rupture. Ces cavités apparaissent et accroissent sous l'action d'une forte triaxialité de contraintes et, plus particulièrement, sous un chargement purement hydrostatique élevé. Ainsi, le phénomène de cavitation joue un rôle capital dans le processus de rupture des structures composées de pièces volumiques en élastomère. Cependant, la mise en oeuvre d'expériences qui mettent en évidence ce phénomène n'est relativement pas triviale. En effet, elle nécessite des éprouvettes spécifiques et un équipement de pointe permettant de détecter la nucléation des cavités et de suivre leurs évolutions en cours de chargement. Par ailleurs,

d'un point de vue théorique, l'analyse de l'endommagement ou de la rupture par cavitation fait très vite appel à des développements analytiques fastidieux. L'utilisation de la MEF est dans ce cas une alternative intéressante.

Le phénomène de cavitation dans les élastomères a été observé, sans doute pour la première fois, dans les années trente par Busse [1] et Yertzley [2] au centre de fines éprouvettes en forme de disques, sollicitées en traction uniaxiale. Depuis, certains auteurs ont analysé ce phénomène tant de point de vue expérimental que théorique. En effet, Gent et Lindley [3] ont conduit une campagne d'essais, appelés « poker chip », qui consistent à soumettre en traction des disques fins suivant l'axe principal, perpendiculaire à leur plus grande surface. Le matériau étudié est un caoutchouc naturel chargé au noir de carbone. Ce type d'éprouvette est appelé éprouvette « pancake ». Gent et Lindley [3] ont principalement remarqué qu'au-delà d'une charge critique globale, des cavités apparaissent au centre de l'éprouvette. Ils ont, de plus prouvé, en supposant que le champ de contrainte est purement sphérique, que cette charge correspond à une pression hydrostatique locale critique, p_c , qui s'écrit sous la forme suivante :

$$p_c = 5E/6 \quad (1)$$

E est le module de d'Young du matériau.

Oberth et Bruenner [4], et Oberth [5] ont, quant à eux, sollicité en traction uniaxiale des éprouvettes transparentes en polyuréthane contenant une inclusion sphérique au centre. Ils ont constaté qu'une cavité apparaît au voisinage du pôle de cette inclusion, lieu d'une forte triaxialité des contraintes, à partir d'un certain niveau de chargement global qui engendrerait à une pression hydrostatique locale égale à $5E/6$.

Cho et Gent [6, 7] ont confirmé la valeur de $5E/6$ comme pression hydrostatique critique lorsqu'il s'agit d'un matériau non chargé. En effet, dès que cette valeur était atteinte, ils ont observé qu'une cavité apparaît soudainement au centre d'une feuille de silicone transparent, collée entre deux sphères ou deux cylindres parallèles en acier et sollicitée en traction suivant son épaisseur.

De point de vue théorique, Ball [8] fut probablement le premier à avoir fait un développement mathématique rigoureux sur le phénomène de cavitation. Il a considéré un Volume Élémentaire Représentatif (VER) de forme sphérique, soumis à une pression p uniformément répartie sur sa surface extérieure. Il a ainsi proposé une expression de la pression hydrostatique qui gouverne la nucléation d'une cavité au milieu de ce VER. Cette expression s'écrit, dans le cas d'un comportement néo-Hookéen, sous la forme suivante :

$$p_c = \frac{\dagger_1 + \dagger_2 + \dagger_3}{3} = \frac{5\sim}{2} \quad (2)$$

où \sim est le module de cisaillement du matériau, et \dagger_1 , \dagger_2 et \dagger_3 sont les contraintes principales de Cauchy suivant les directions 1, 2 et 3, respectivement. Sous l'hypothèse d'incompressibilité du matériau, le module de Young E est lié au module de cisaillement \sim par $E = 3\sim$, ce qui permet d'écrire l'équation (2) comme suit :

$$p_c = \frac{\dagger_1 + \dagger_2 + \dagger_3}{3} = \frac{5E}{6} \quad (3)$$

Cette expression est identique à celle obtenue antérieurement par Gent et Lindley [3]. Hou et Abeyaratne [9] ont généralisé le modèle de Ball pour un chargement tridimensionnel quelconque. Ils ont ainsi établi un critère de cavitation défini par une « surface seuil », dans l'espace des contraintes principales \dagger_1 , \dagger_2 et \dagger_3 . En considérant une loi de comportement néo-Hookéenne, ce critère s'écrit

sous la forme suivante :

$$(4\tau_1 - \tau_2 - \tau_3)(4\tau_2 - \tau_1 - \tau_3)(4\tau_3 - \tau_1 - \tau_2) - (5\tau)^3 = 0 \quad (4)$$

2. Etude expérimentale

2.1. Matériau et loi de comportement

Le matériau étudié est un élastomère à base de copolymère en Styrène Butadiène Rubber (SBR), vulcanisable. Il est utilisé dans plusieurs pièces industrielles tels que les pneumatiques. Les calculs analytiques et/ ou numériques visant à exploiter les données d'essais sur ces pièces ou à améliorer les propriétés de celles-ci, nécessitent une identification précise de la loi de comportement du matériau. Dans ce travail, nous avons analysé numériquement le phénomène d'endommagement et de rupture des élastomères par le processus de cavitation. La loi de comportement du matériau étudié a donc été extraite, par optimisation, à partir d'une combinaison de données expérimentales issues de différents types d'essais. Ces essais, détaillés dans notre précédent travail [10], renferment la traction uniaxiale, la compression uniaxiale, le cisaillement pur et la traction équibiaxiale.

2.2. Essais d'endommagement / rupture

Des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques en utilisant une machine de traction (Figure 1). Les sollicitations sont imposées suivant l'axe du cylindre à une vitesse de déformation contrôlée. Ces éprouvettes, appelées « pancake », sont moulées avec un diamètre $d = 100\text{mm}$ et une hauteur $h = \{2.5, 5, 10, 20, 25, 50\}$ (mm). En raison de la géométrie particulière de ces éprouvettes, $h \ll d$, une dépression hydrostatique devrait être générée en leurs centres. Ces types d'essai, appelés essais « poker chip », ont été conduits jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette.

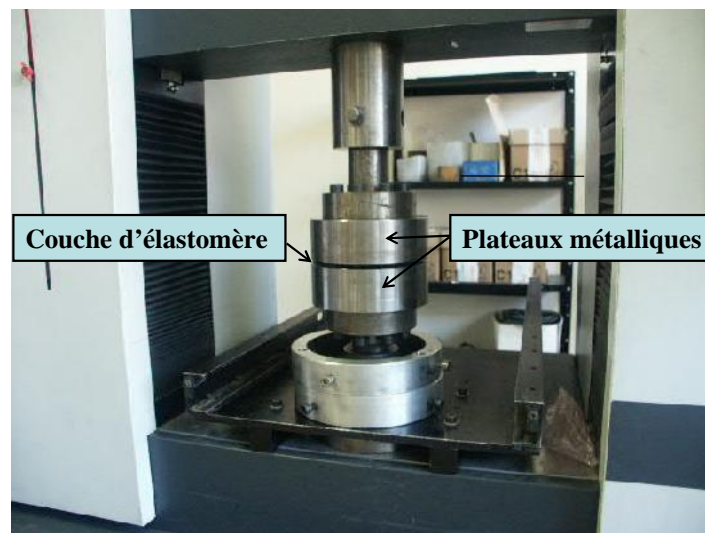


Figure 1 : Machine d'essais - éprouvette « pancake ».

Quelques exemples de faciès de rupture des éprouvettes sont représentés sur la figure 2. La nature des faciès de rupture semble dépendre essentiellement du facteur de forme de l'échantillon $s = R/2h$, exprimant le degré de confinement de chaque éprouvette. R et h sont le rayon et la hauteur de l'éprouvette. Ces faciès mettent en évidence des vacuoles de tailles, mesurée avec une lunette binoculaire, allant jusqu'à 1mm, 2 à 3mm et 4 à 7mm pour les éprouvettes ayant une hauteur, respectivement, de 2.5mm, 5mm et 10mm. Ainsi, en augmentant la hauteur h de l'éprouvette (ou en

diminuant le facteur de forme s), la taille des vacuoles macroscopiques augmente, leur nombre diminue, et elles sont de plus en plus concentrées dans une zone centrale de l'échantillon. Pour les éprouvettes de hauteur $h \geq 25\text{mm}$, aucune cavité n'apparaît mais une grande fissure est observée au centre de l'éprouvette (Figure 2). Enfin, pour $h = 50\text{mm}$, une rupture adhésive a été constatée en raison, certainement, du haut niveau d'élançement de l'éprouvette qui causerait la migration du phénomène de concentration de contraintes du centre de l'échantillon vers l'interface caoutchouc/métal.



Figure 2 : Faciès de rupture des éprouvettes pancake : $h = 2.5, 5, 10$ et 25mm .

3. Analyse numérique par la MEF

L'objectif de cette étude numérique est, d'une part, de vérifier la pertinence de notre analyse expérimentale sur le phénomène de cavitation dans les élastomères. D'autre part, d'approfondir nos investigations sur ce phénomène.

3.1. Modèle numérique

Nous avons modélisé toutes les géométries d'éprouvette « pancake », testées expérimentalement, avec un modèle 2D axisymétrique en utilisant le code de calcul « MARC ». Seule la partie en caoutchouc est analysée. Les armatures métalliques étant considérées indéformables et une adhésion parfaite étant supposée entre l'élastomère et ces armatures. Les déplacements radiaux de tous les nœuds des deux plus grandes faces du disque sont bloqués. Les conditions de chargement consiste à appliquer sur l'une de ces deux faces un déplacement axial incrémental et uniforme tout en maintenant immobile l'autre face. Pour chaque incrément de déplacement, nous avons calculé l'effort axial global induit et les contraintes principales de Cauchy à travers toute l'éprouvette.

3.2. Pression hydrostatique de cavitation

Dans cette partie, nous comparons qualitativement les modèles théoriques de Ball (Eq. 3) et de Hou et Abeyaratne (Eq. 4) quant à la pertinence de leurs prédictions de la nucléation de cavités dans un élastomère. Les modèles de Ball et de Hou et Abeyaratne ont été établis pour une loi de comportement néo-Hookéenne ; tous les calculs qui vont suivre seront effectués avec un tel potentiel comportant une seule constante matériau C_{10} . Par ailleurs, pour des raisons de commodité d'analyse des résultats, nous avons implanté dans le logiciel « Msc Marc » deux programmes permettant de visualiser les lieux où les inégalités suivantes sont vérifiées :

$$(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) / 3 - 5E / 6 \geq 0 \quad (5)$$

et

$$(4\tau_1 - \tau_2 - \tau_3)(4\tau_2 - \tau_1 - \tau_3)(4\tau_3 - \tau_1 - \tau_2) - (5\tau)^3 \geq 0 \quad (6)$$

Ces lieux sont assimilés aux endroits où les cavités apparaissent. Les inégalités (5) et (6) découlent, respectivement, des modèles de Ball (Eq. 3) et de Hou et Abeyaratne (Eq. 4).

3.3. Résultats et analyse

Les lieux de cavitation prédits par les modèles de Ball et de Hou et Abeyaratne, correspondant respectivement aux inégalités (5) et (6), sont représentés avec une couleur rouge sur les figures 3a et 3b. A titre d'illustration, seuls, les résultats relatifs aux éprouvettes de hauteur 2.5, 10 et 25 mm sont mentionnés.

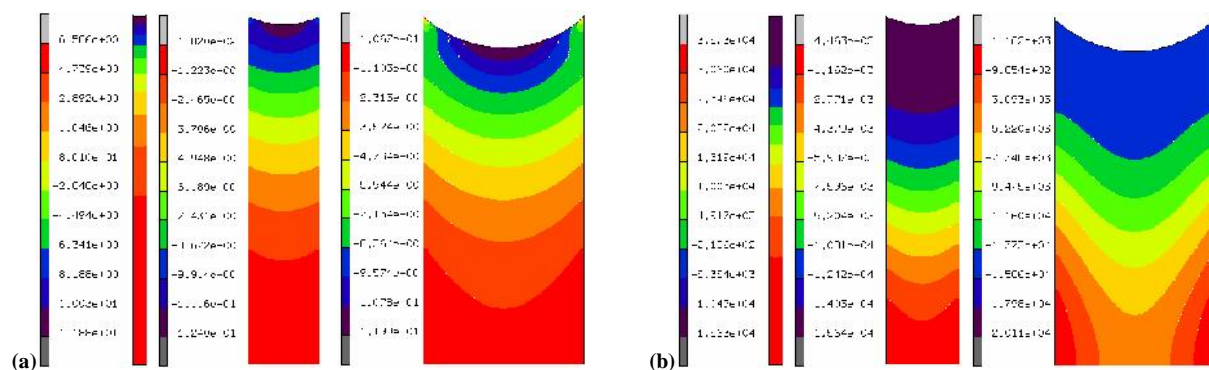


Figure 3 : Zones de cavitation selon les modèles de a- Ball, b- Hou & Abeyaratne.

Pour les éprouvettes de faibles hauteurs $h = \{2.5, 5, 10\}$ (mm), i.e. des éprouvettes relativement confinées, les deux modèles prédisent une zone de cavitation concentrée aux centres des échantillons où la pression hydrostatique est maximale. Ils prédisent aussi un décalage de cette zone vers l'interface caoutchouc/ métal pour les éprouvettes de plus grandes hauteurs. Il est important de remarquer qu'avec le modèle de Ball (Eq. 3), la zone de cavitation est de taille plus importante que celle obtenue avec le modèle de Hou et Abeyaratne (Eq. 4).

Les prédictions du modèle de Ball et de Hou et Abeyaratne sont en bon accord avec nos observations expérimentales et avec celles présentées dans notre précédent travail [11]. En effet, même si les deux modèles ne font pas apparaître rigoureusement les mêmes distributions de pression hydrostatique, ils conduisent toutefois à des prédictions similaires des lieux probables d'apparition des premières cavités.

4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons analysé le phénomène de cavitation dans les matériaux caoutchoutiques en combinant les approches expérimentale, théorique et numérique.

Dans un premier temps, nous avons rappelé l'approche théorique des modèles de Ball et de Hou et Abeyaratne utilisés dans notre analyse du phénomène de cavitation. Ensuite, nous avons décrit le protocole expérimental qui met en évidence l'apparition de cavité dans le matériau. Les éprouvettes « pancake » utilisées sont des disques fins adhésés à des armatures métalliques. Le caractère triaxial du champ de contrainte au centre de ces éprouvettes semble être à l'origine de la nucléation de cavités dans cette zone.

Nous avons ainsi mis en évidence la naissance de vacuoles dans le matériau dont la taille et le nombre dépendent du facteur de forme exprimant le degré de confinement de l'éprouvette. Cependant, lorsque l'éprouvette est suffisamment élancée, les faciès de rupture ne font pas état de présence de cavités mais plutôt d'une fissure macroscopique. En dessous d'une certaine valeur de facteur de forme, la rupture a lieu au niveau de l'interface caoutchouc/ métal et non au sein du matériau. Ceci explique une rupture observée de type adhésive et non cohésive.

Enfin, nous avons analysé le phénomène de cavitation en combinant les calculs numériques par la MEF selon les prédictions des modèles de Ball et de Hou et Abeyaratne. Les deux modèles théoriques ont conduit à des prédictions similaires qui, de plus, sont en bon accord avec nos observations expérimentales. Les résultats numériques ont particulièrement montré que le phénomène de cavitation dans les élastomères, en plus d'être lié au degré de confinement des éprouvettes, semble être gouverné par une pression hydrostatique critique locale.

References

- [1] Busse W.F., Physics of rubber as related to the automobile, *J. of appl. Phys.*, 9, 438-451 (1938).
- [2] Yertzley F.L., Adhesion of Neoprene to metal, *Ind. and Eng. Chem.*, 31, 950-956 (1939).
- [3] Gent A.N. and Lindley P.B., Internal rupture of bonded rubber cylinders in tension, *Proc. Roy. Soc. A*249, 195-205 (1958).
- [4] Oberth A.E. and Bruenner R.S., Tear phenomena around solid inclusions in constable elastomers, *Trans. of the Soc. of Rheo.*, 9(2), 165-185 (1965).
- [5] Oberth A.E., Principle of strength reinforcement in filled rubbers, *Rubber Chem. and Tech.* 40, 1337-1363 (1967).
- [6] Cho K., Gent A.N. and Lam P.S., Internal fracture in an elastomer containing a rigid inclusion", *J. of Mat. Sci.*, 22, 2899-2905 (1987).
- [7] Cho K. and Gent A.N., Cavitation in model elastomeric composites, *J. of Mat. Sci.*, 23, 141-144 (1988).
- [8] Ball J.M., Discontinuous equilibrium, solutions and cavitation in nonlinear elasticity., *Phil. Trans. of the Roy. Soc. Lond.*, A306, 557-610 (1982).
- [9] Hou H.S. and Abeyaratne R., Cavitation in elastic and elastic-plastic solids, *J. Mech. Phys. Solids*, 40(3), 571-592 (1992).
- [10] Hamdi A., Naït Abdelaziz M., Aït Hocine N., Heuillet P., Benseddiq N. A fracture criterion of rubber-like materials under plane stress conditions. *Polymer Testing*. 2006; 25:994–1005.
- [11] Aït Hocine N., Hamdi A., Naït Abdelaziz M., Heuillet P., Zaïri F. Experimental and finite element investigation of void nucleation in rubber-like materials. *International Journal of Solids and Structures*. 2011; 48:1248–54.