

Etude numérique et expérimentale de la nocivité des défauts dans des coques cylindriques et sphériques : aide à la détermination des facteurs de contraintes

Saïd Hariri

Ecole des Mines de Douai, Département Technologie de Polymères et composites & Ingénierie mécanique (PCIM), 941 rue Charles Bourseul B.P. 838 - 59508 Douai Cedex, France,
hariri@ensm-douai.fr

Abdelhadi El Hakimi

Ecole des Mines de Douai, Département Technologie de Polymères et composites & Ingénierie mécanique (PCIM), 941 rue Charles Bourseul B.P. 838 - 59508 Douai Cedex, France,
elhakimi@ensm-douai.fr

Zitouni Azari

Université de Metz, Laboratoire de Fiabilité Mécanique
ENIM, Ile du Saulcy 57045 Cedex 01, France,
azari@univ-metz.fr

Résumé

Dans le domaine des équipements sous pression, plusieurs structures cylindriques ou sphériques sont le siège de fissures internes ou externes. Se pose alors la question de la nocivité de ce type de défaut pour des raisons de sécurité et du risque important lié à la pression et aux fluides contenus. Le problème de nocivité des défauts est abordé par les critères basés sur les Facteurs d'Intensité de Contraintes, notamment K_I . L'intégrale de Rice J peut être déterminée par l'utilisation des règles *R6* et *A16*. Cette étude, numérique, prend comme paramètres fondamentaux : les paramètres géométriques de la coque et de la fissure. Le champ des contraintes est développé sous forme polynomiale au voisinage du défaut, ce développement couvre la plupart des cas réels susceptibles d'être rencontrés dans les structures industrielles. Une validation expérimentale complète ce travail.

Mots clefs : Facteurs d'intensité de contrainte ; Coques cylindriques et sphériques ; Fissuration ; Nocivité des défauts ; Equipements sous pression.

Abstract

The field of pressure equipments often deals with cylindrical or spherical structures. These shells can be affected by internal or external cracks. It is then of great importance to assess the harmfulness of this type of defect, for safety reasons, considering the hazards that high pressure and the nature of stored fluids may cause. Defect harmfulness can be assessed by using criteria based on the stress intensity factors, in particular K_I , then by the Rice integral J . This mainly numerical study focuses on geometrical parameters of the shell and the crack, considered as fundamental parameters. The stress field is developed in a polynomial form in the vicinity of the defect, which enables to assess most of the cases that are likely to occur in real industrial structures. Experiments agree well with numerical results.

Keyword: Stress Intensity Factor; Cylindrical and spherical shells; cracking; Defect harmfulness; Pressure vessels.

1. INTRODUCTION

Dans le domaine des équipements sous pression, on rencontre souvent des structures cylindriques ou sphériques. Ces coques peuvent être le siège des fissures axisymétriques ou semi-elliptiques internes ou externes. Ce pose alors la question de la nocivité de ce type de défaut. Ce problème est abordé par les critères basés sur les Facteurs d'Intensité de contraintes, notamment K_I , puis par l'intégrale J de Rice. Cette étude, principalement numérique, prend comme paramètres fondamentaux les paramètres géométriques de la coque et de la fissure. Le champ des contraintes est développé sous forme polynomiales au voisinage du défaut. Ce développement couvre la plupart des cas réels susceptibles d'être rencontrés dans les structures industrielles.

Dans ce travail, nous abordons, par une approche purement numérique par les éléments finis, la nocivité des défauts dans les coques sphériques dans le domaine élastique et élastoplastique. L'objectif est de déterminer les abaques de calcul pour les coques sphériques soumises à des chargements complexes. En parallèle, nous validons l'application des méthodes d'estimations simplifiées de l'intégrale J, notamment R6 dans les coques sphériques.

2. CALCUL ELASTIQUE : FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE [1], [2]

Dans les matériaux élastiques linéaires, les composantes des contraintes, des déformations et des déplacements sont additives, une application du principe de superposition. Cependant, Il faut respecter certaines règles : ainsi par exemple deux contraintes normales selon la direction x peuvent s'ajouter entre elles. Il en est de même pour les Facteurs d'Intensité des Contraintes (FIC) : nous ne pouvons additionner des FIC que s'ils concernent le même mode de sollicitation (mode I, II ou III).

Dans plusieurs cas, le principe de superposition, convenablement appliqué, permet de déterminer le Facteur d'Intensité de Contrainte dans des configurations de chargement relativement complexes en les décomposant en somme de chargements simples. Les contraintes, appliquées à la frontière des structures fissurées, peuvent être déplacées sur les lèvres de la fissure. La figure (1) illustre l'application du principe de superposition dans le cas d'une structure fissurée sous chargement de traction.

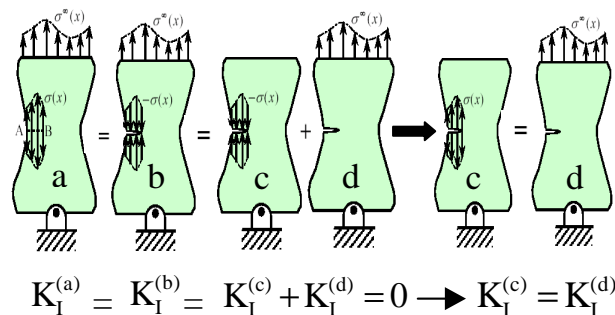


Figure. 1. Le principe de superposition

Ainsi, dans la zone proche du défaut, nous décomposons le champ des contraintes complexes appliquées aux lèvres de la fissure en polynômes de composantes simples. [3] [4] [5] [7] sous la forme suivante :

$$\sigma\left(\frac{u}{t}\right) = \sigma_0 + \sigma_1\left(\frac{u}{t}\right) + \sigma_2\left(\frac{u}{t}\right)^2 + \sigma_3\left(\frac{u}{t}\right)^3 + \dots + \sigma_n\left(\frac{u}{t}\right)^n$$

Où u représente la distance radiale d'un point dans la paroi de la structure à la surface, où débouche le défaut (Figure.2). Les composantes $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ et σ_3 correspondent respectivement à une distribution de chargement constant, linéaire, quadratique et cubique dans l'épaisseur de la structure fissurée.

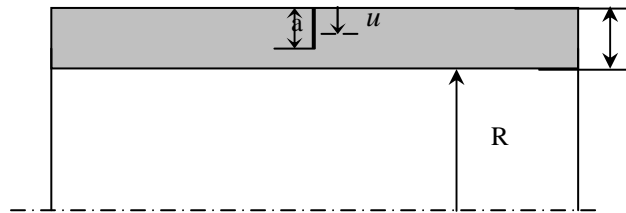


Figure. 2. Distance u dans la structure fissurée.

Pour chaque distribution élémentaire des contraintes, nous associons un Facteur d'Intensité de contraintes donné par l'expression suivante :

$$K_I^n = \sigma_n \sqrt{\pi a} \left(\frac{a}{t}\right)^n i_n$$

avec $n = 0,1,2,3$ et F_n la fonction d'influence correspondante.

D'après le principe de superposition, le Facteur d'Intensité de Contraintes, correspondant à un chargement complexe, est égal à la somme des contributions des différentes composantes de ce chargement, soit :

$$K_I^t = \sum_{n=0}^N K_I^n = \sum_{n=0}^N \sigma_n \sqrt{\pi a} \left(\frac{a}{t}\right)^n i_n$$

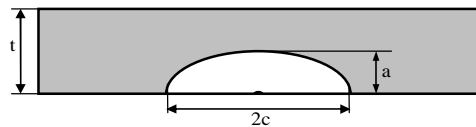


Figure 3 : Fissure semi elliptique

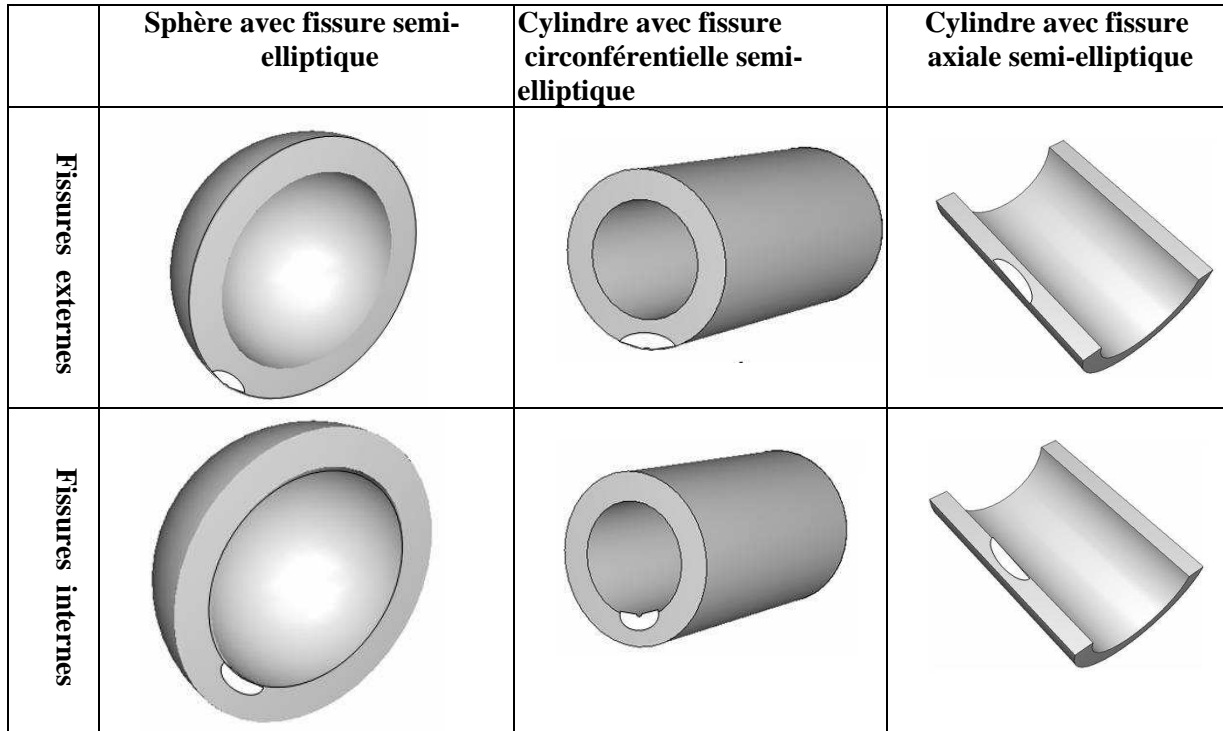


Figure 4. Différentes géométries étudiées

3. MODELISATION NUMERIQUE

3.1. Géométrie

Les géométries étudiées sont celles des coques sphériques et cylindriques comportant des fissures semi-elliptiques débouchant en surface interne ou externe figures (3, 4). Les formes des défauts semi-elliptiques sont caractérisées par deux rapports a/t et a/c , avec a profondeur de la fissure mesurée radialement et $2.c$ la longueur de la fissure. Les coques sont paramétrées par le rapport adimensionnel (t/R). t et R sont simultanément l'épaisseur et le rayon, figure.4.

Pour les fissures semi-elliptiques, nous avons étudié les rapports géométriques suivants :

$$t/R = 1/2 ; 1/10 ; 1/80 \quad a/c = 1/2 ; 1/4 ; 1/8 \quad a/t = 0.2 ; 0.4 ; 0.8$$

Dans le cas des fissures axisymétriques, les rapports retenus sont :

$$t/R = 1/2 ; 1/10 ; 1/80 \quad a/t = 0.2 ; 0.4 ; 0.5 ; 0.6 ; 0.7 ; 0.8$$

Cela fait un total de 54 cas avec des fissures semi-elliptiques et 36 cas avec des fissures axisymétriques. Le matériau utilisé est un acier de type **P264GH**, de module d'Young 200.000 MPa et de coefficient de Poisson 0.3.

3.2. Maillage et chargement [12] [13]

Le maillage de toutes les structures a été réalisé avec des éléments quadratiques. Le maillage en pointe de fissure est particulièrement raffiné pour une modélisation en approche locale, la concentration des contraintes étant très élevée. Les sphères et les cylindres, comportant une fissure semi-elliptique, sont modélisés par un maillage tridimensionnel. Le voisinage de la fissure est maillé par un « bloc-fissure » (figure 5), le principe de construction de ce bloc fissuré étant basé sur la propagation d'un maillage 2D le long du front de fissure semi-elliptique. Une zone intermédiaire permet de faire la jonction avec le reste de la structure autour de ce bloc-fissure (figure 6).

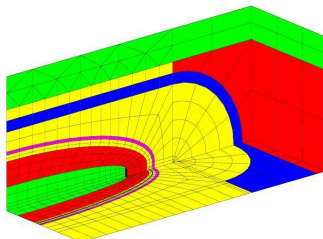


Figure. 5. Bloc-fissure.

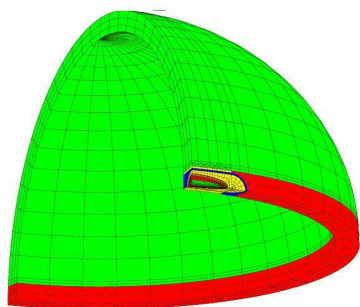


Figure. 6 a. Maillage d'une sphère avec une fissure semi-elliptique

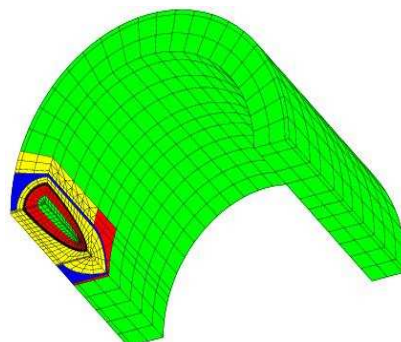


Figure. 6 b. Maillage d'une sphère avec une fissure semi-elliptique

Le chargement est imposé directement sous la forme d'une pression sur les lèvres de la fissure, correspondant à des contraintes constantes, linéaires, paraboliques ou cubiques. Ce procédé de mise en charge permet de déterminer les facteurs d'intensité de contrainte représentant le chargement global appliqué dans la sphère, d'après le principe de superposition en élasticité linéaire.

4. VALIDATION NUMERIQUE

Pour étudier l'évolution du Facteur d'Intensité de Contraintes le long du front de fissure semi-

elliptique, nous définissons un angle φ permettant de repérer la position d'un point, figure 7. Cet angle vaut 0° en surface et 90° en fond de fissure.

Dans les coques sphériques possédant une fissure semi elliptique et afin de valider nos calculs numériques, nous comparons les présents résultats avec ceux de Joseph et Erdogan [10] et Brighenti [7]. Les figures (8, 9) montrent un accord satisfaisant entre les différents résultats.

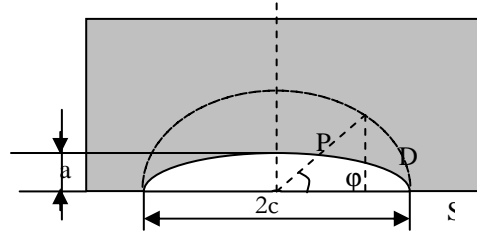


Figure 7. Définition de l'angle φ .

Pour le cas des coques cylindriques, les résultats numériques ont été comparés avec celles de S. Chapuliot [4].

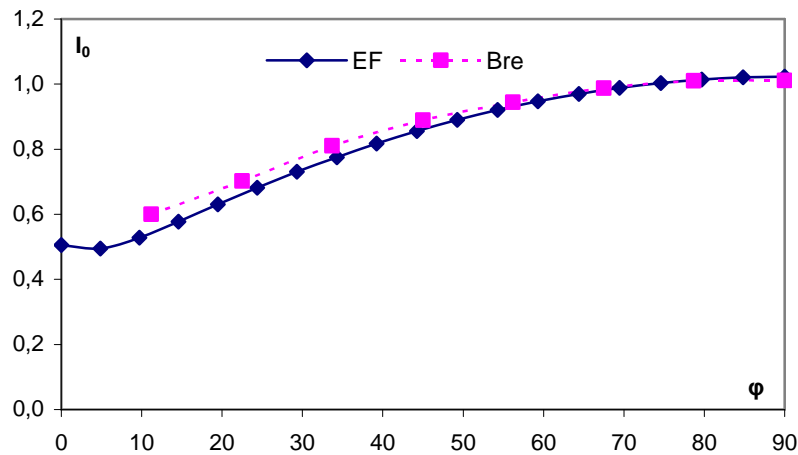


Figure 8. Evolution de i_0 en fonction de φ dans une sphère avec fissure semi-elliptique externe ($a/t = 0,2$ $a/c = 1/5$ $t/R = 1/10$)

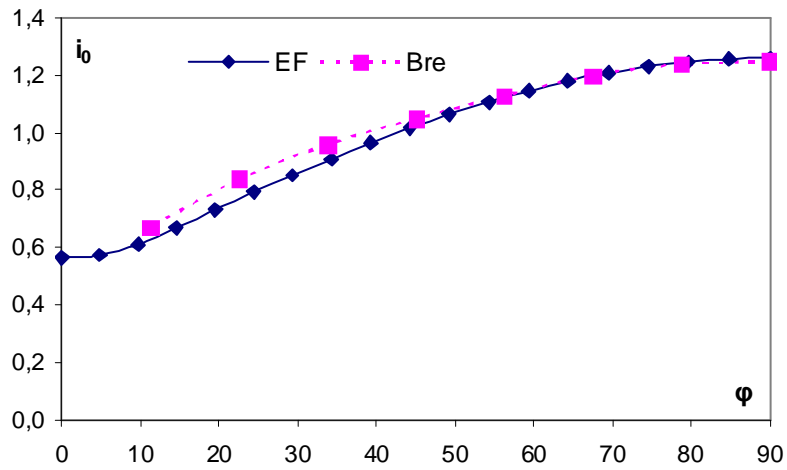


Figure 9. Evolution de i_0 en fonction de ϕ dans une sphère avec fissure semi elliptique externe ($a/t = 0,4$ $a/c = 1/5$ $t/R = 1/10$)

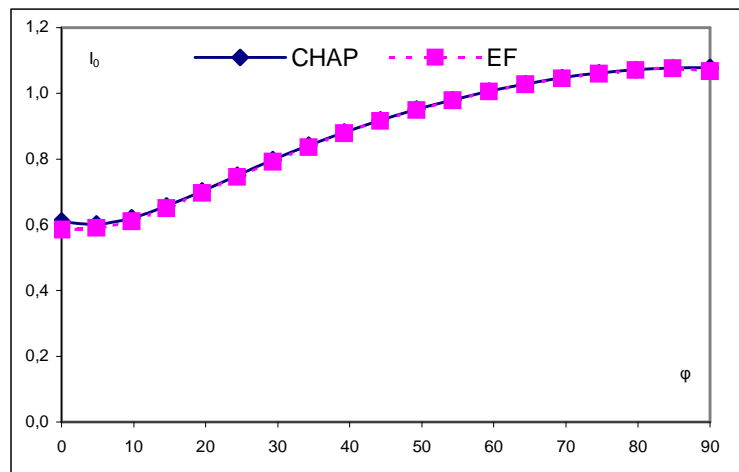


Figure 10. Variation de i_0 en fonction de ϕ dans fissure semi-elliptique axiale externe ($a/t = 0,2$ $a/c = 1/4$ $t/R = 1/10$)

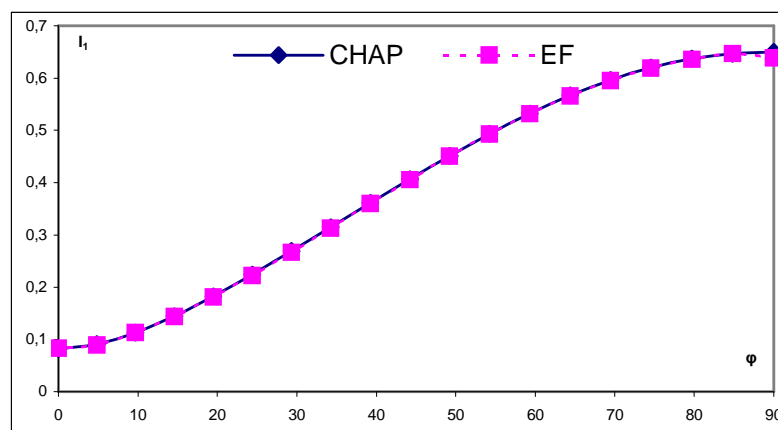


Figure 11. Variation de i_1 en fonction de ϕ dans fissure semi-elliptique axiale externe ($a/t = 0,2$ $a/c = 1/4$ $t/R = 1/10$)

5. VALIDATION EXPERIMENTALE

Afin de valider nos modèles numériques, nous avons réalisé des maquettes constituées de viroles cylindriques fermées par des fonds torisphériques (fonds GRC). Ces maquettes sont réalisées selon les recommandations du CODAP 2005. Sur chaque maquette nous avons réalisé deux fissures semi-elliptiques diamétralement opposées, d'orientation et de dimensions différentes. On notera par a la profondeur de la fissure et par $2c$ sa longueur. Les figures 13 et 14 montrent les dimensions et une photo des maquettes.

Le matériau utilisé est un acier de type P264GH. Les caractéristiques mécaniques obtenues expérimentalement sont données dans le tableau suivant :

Module de Young (Mpa)	Coefficient de Poisson	Limite élastique à 0.2% (Mpa)	Charge à la rupture (Mpa)	Allongement A%
207000	0,3	340	440	35

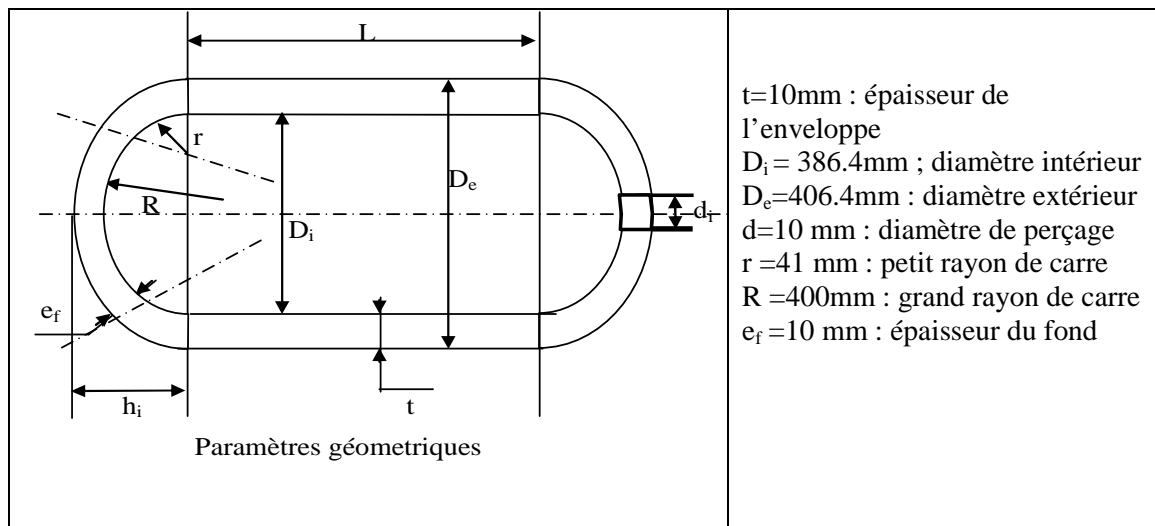


Figure 13. Géométrie des maquettes.



Figure 14. Dispositif expérimental.

Les maquettes, instrumentées de jauges extensométriques (chaînettes circumférentielles et longitudinales et rosettes), sont collées dans les zones proches des défauts. Ces régions de collage ont été choisies dans les zones d'influence des défauts.

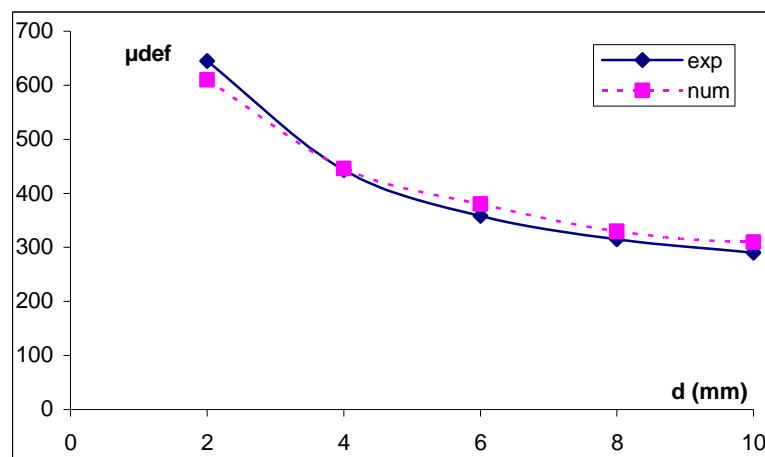


Figure 15. Déformations circumférentielles en fonction de la distance. (Défaut axial $a=8\text{mm}$ $c=32\text{mm}$ $t=10\text{mm}$, $P=25$ bars)

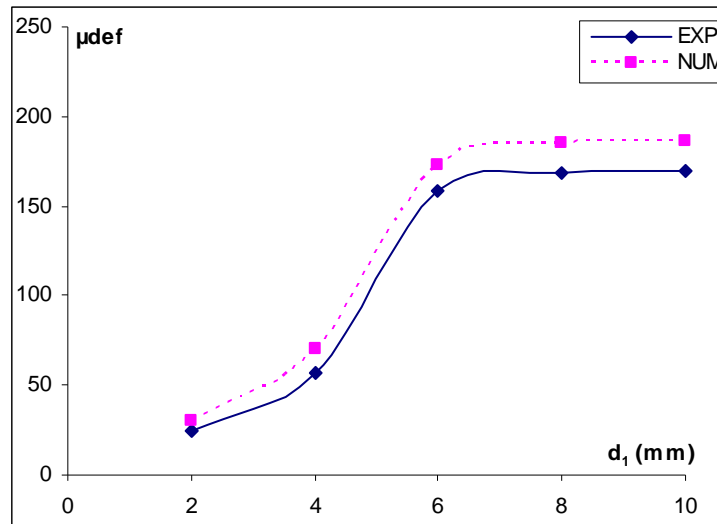


Figure 16. Déformations circonférentielles en fonction de la distance (Défaut Circonférentiel $a=2\text{mm}$, $c=8\text{mm}$, $t=10\text{mm}$; $P=25$ bars)

Ces résultats sont obtenus à partir d'essais sous pression, on constate une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux. De même, en complément à l'étude extensométrique, un suivi par émission acoustique est réalisé, il permet entre autre de déterminer la pression de début de plastification et la comparaison de cette dernière à celle donnée par le calcul.

6. FACTEURS D'INFLUENCE

Les courbes ci-dessous représentent les coefficients d'influence dans le cas de chargements constants, linéaires, paraboliques et cubiques, appliqués aux lèvres de la fissure. Nous avons étudié l'évolution de ces coefficients en fonction des paramètres géométriques de la fissure et de la structure.

6.1 Cas des coques cylindriques

Les calculs de Facteurs d'intensité de Contraintes sont menés dans plusieurs configurations géométriques des coques et des fissures. Les résultats en facteurs d'influence i_j sont donnés en fonction de l'angle φ caractérisant la position du point sur le front de la fissure.

Les paramètres géométriques sont choisis de sorte à couvrir un large domaine d'applications industrielles. Nos résultats pour les coques cylindriques sont comparés à ceux de la littérature.

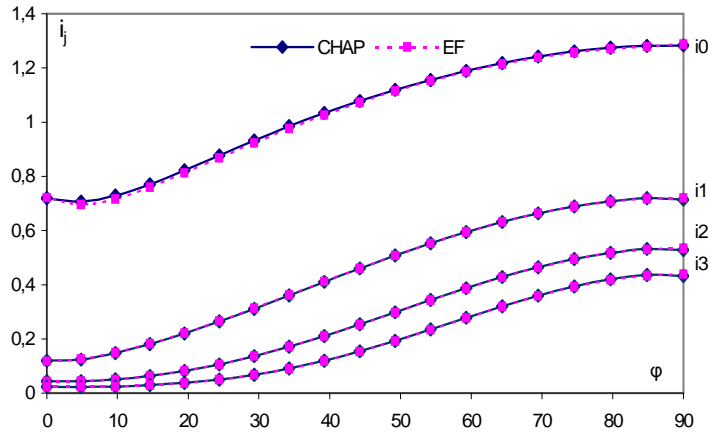


Figure 17. Variation de i_j en fonction de φ dans cylindre avec fissure semi-elliptique axiale externe ($a/t = 0,4$ $a/c = 1/4$ $t/R = 1/10$)

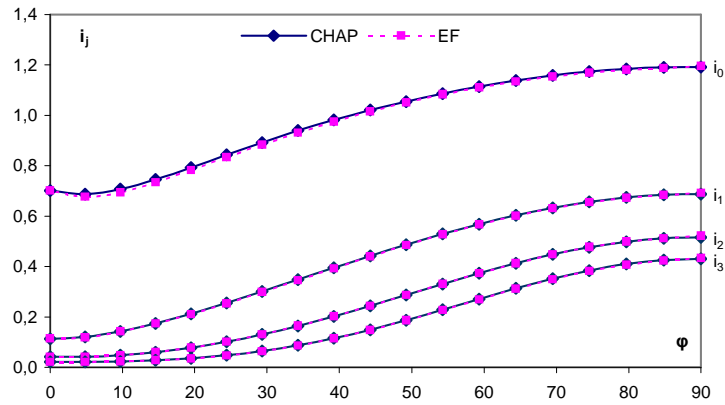


Figure 18. Variation de i_j en fonction de φ dans cylindre avec fissure semi-elliptique axiale interne ($a/t = 0,4$ $a/c = 1/4$ $t/R = 1/10$)

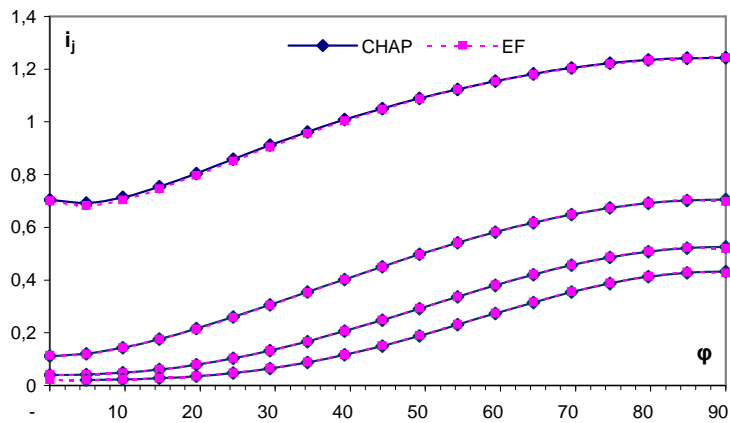


Figure 19. Variation de i_j en fonction de φ dans cylindre avec fissure semi-elliptique circonférentielle externe ($a/t = 0,4$ $a/c =$

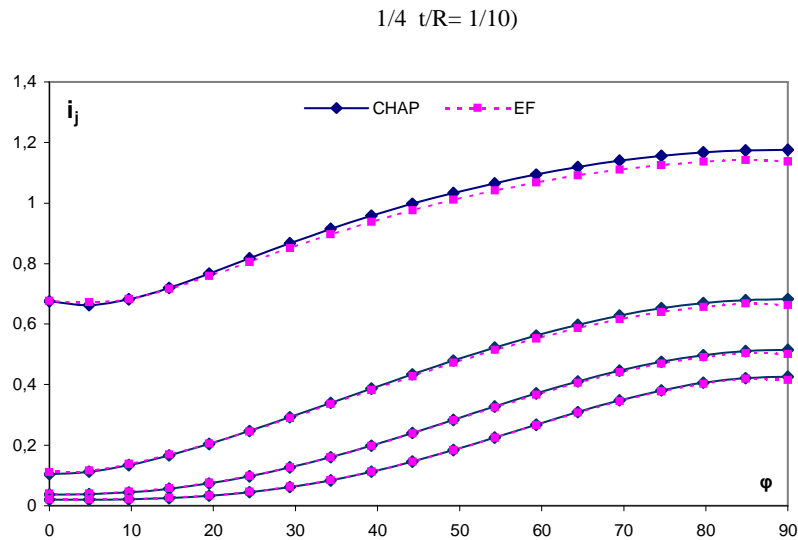


Figure 20. Variation de i_j en fonction de ϕ dans cylindre avec fissure semi-elliptique circonférentielle interne ($a/t = 0,4$ $a/c = 1/4$ $t/R = 1/10$).

6. 2 Cas des coques sphériques

La démarche précédente est appliquée aux coques sphériques, des exemples de résultats sont donnés par les figures suivantes. Pour les coques sphériques, nous ne disposons pas de résultats dans la littérature pour comparaisons.

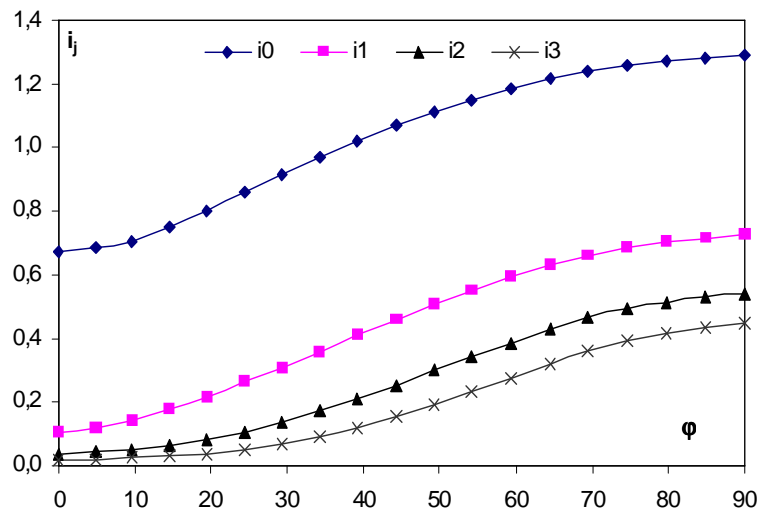


Figure 21. Evolution de i_j en fonction de ϕ dans une sphère avec fissure semi-elliptique externe ($a/t = 0,4$ $a/c = 1/4$ $t/R = 1/10$)

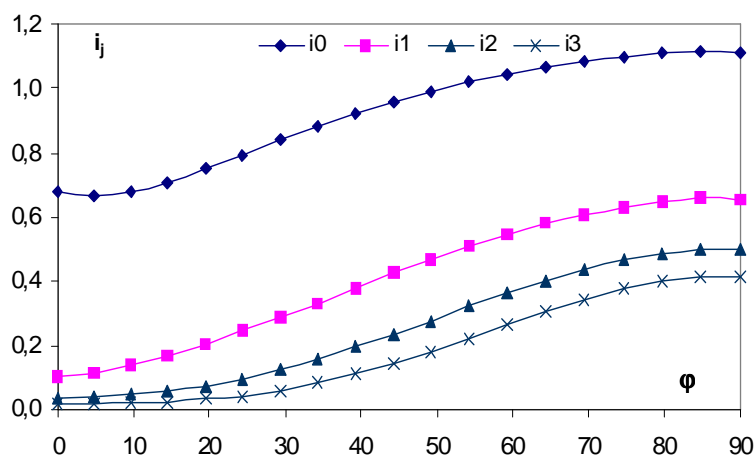


Figure 22. Evolution de i_j en fonction de ϕ dans une sphère avec fissure semi elliptique interne ($a/t = 0,4$ $a/c = 1/4$ $t/R = 1/10$)

7. CONCLUSION

Dans les coques sphériques, contenant une fissure semi-elliptiques ou axisymétriques, soumises à des chargements complexes, les Facteurs d'Intensité de Contraintes ont été calculé numériquement par éléments finis en utilisant le principe de superposition et une décomposition polynomiale des contraintes appliquées. Nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques de la fissure et de la coque sur les valeurs du Facteur d'Intensité de Contrainte et son évolution le long du front de fissure. Ces résultats associés à ceux obtenus par calcul de l'intégrale J, via l'utilisation des règles R6 et A16, permettent de déterminer les pressions ultimes et la nocivité des défauts dans les structures étudiées. Les résultats numériques ont été validés expérimentalement par extensométrie couplée à l'émission acoustique. Les résultats obtenus peuvent être facilement utilisables sur des structures réelles, sans refaire de calcul par éléments finis, ce qui constitue une aide appréciable dans le suivi en service des structures sous pression fissurées.

8. REFERENCES

- 1 A. EL HAKIMI, P. LE GROGNEC, S. HARIRI: Numerical and analytical study of severity of cracks in cylindrical and spherical shells. Engineering Fracture Mechanics, Volume 75, Issue 5, March, Pages 1027-1044, (2008)
- 2 A. EL HAKIMI, P. LE GROGNEC, S. HARIRI, Z. AZARI, A. LAKSIMI : Etude numérique par éléments finis de la nocivité de défauts dans les coques sphériques, Revue Européenne de Mécanique Numérique, Vol. 16, n°1, pp. 79-101, 2007, 15 septembre (2006).
3. W. Flügge, Stresses in shells, Springer, New York, (1960).
4. G.Z. Voyiadjis, P. Woelke, A refined theory for thick spherical shells, International Journal of Solids and Structures 41 pp. 3747-3769, (2004).
5. J.J. McGowan, M. Raymond, Stress intensity factor for internal longitudinal semi-elliptical surface flaws in a cylinder under arbitrary loadings, American Society for Testing and Materials pp. 365-380, (1979).

6. S. Chapuliot, Formulaire de K_I pour les tubes avec un défaut de surface semi-elliptique longitudinal ou circonférentiel interne ou externe, Rapport CEA-R-5900.
- 7 R. Brighenti, Surface cracks in shells under different hoop stress distributions, International Journal of Pressure and Piping 77 pp. 503-509, (2000).
8. R. Brighenti, Axially-cracked pipes under pulsating internal pressure, International Journal of Fatigue 22 pp. 559-567, (2000).
- 9 P.F. Joseph, F. Erdogan, A surface crack in shells under mixed-mode loading conditions, Journal of Applied Mechanics 55 pp. 795-804, (1988).
10. P.F. Joseph, F. Erdogan, Surface cracks in toroidal shells, Nuclear Engineering and Design 158 pp. 263-276, (1995).
11. J. Heliot, R.C. Labbens, A. Pelissier-Tanon, Semi-elliptical cracks in a cylinder subjected to stress gradient, American Society for Testing and Materials pp. 341-364, 1979.
- 12.A. SAFFIH, S. HARIRI Numerical study of elliptical cracks in cylinders with a thickness transition, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol 83, N°1, pp 35-41, 2006
13. A. SAFFIH, S. HARIRI Comparison of semi-elliptic cracks in cylinders with a thickness transition and in a straight cylinders elastic plastic behaviour, Engineering Fracture Mechanics, Vol 73, pp 2685-2697, 2006.