HAL
open science

Etude numérique de la rupture dynamique de structures métalliques

Benjamin Daudonnet, Martial Mosnier, Krzysztof Woznica, Frédéric Mercier

To cite this version:

Benjamin Daudonnet, Martial Mosnier, Krzysztof Woznica, Frédéric Mercier. Etude numérique de la rupture dynamique de structures métalliques. 7. Colloque national en calcul des structures, May 2005, Giens, France. pp.451-456. ineris-00969975

HAL Id: ineris-00969975

https://ineris.hal.science/ineris-00969975v1

Submitted on 18 Sep 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.

HAL
archives-ouvertes.fr

Étude numérique de la rupture dynamique de structures métalliques

Benjamin Daudonnet, Martial Mosnier, Krzysztof Woznica, Frédéric Mercier

To cite this version:

Benjamin Daudonnet, Martial Mosnier, Krzysztof Woznica, Frédéric Mercier. Étude numérique de la rupture dynamique de structures métalliques. 7e colloque national en calcul des structures, May 2005, Giens, France. 7e colloque national en calcul des structures, 2005. <hal-01814810>

HAL Id: hal-01814810

https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01814810

Submitted on 13 Jun 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

Etude numérique de la rupture dynamique de structures métalliques

Daudonnet B.[a], Mosnier M.[a], Woznica K.[a], Mercier F.[b]

[a]*Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur de Bourges (ENSIB), Laboratoire Energétique Explosion Structures, L.E.E.S., EA 1205, Université d'Orléans, 10 boulevard Lahitolle, 18020 Bourges cedex, France*
benjamin.daudonnet@ensi-bourges.fr, martial.mosnier@ensi-bourges.fr, Krzysztof.woznica@ensi-bourges.fr
[b]*Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Unité Résistance des Structures, 10 boulevard Lahitolle, 18020 Bourges cedex, France*
frédéric.mercier@ensi-bourges.fr

RÉSUMÉ. *La rupture de capacités métalliques sous pression peut se traduire par des fuites, des projectiles avec effet fusée, ou encore un éclatement avec projection de missiles. Ce phénomène implique plusieurs disciplines : mécanique des solides, mais aussi mécanique des fluides, et thermodynamique. Cet article présente différentes approches et méthodes concernant la rupture de structures métalliques. L'étude numérique, réalisée à l'aide du logiciel MSC MARC, porte sur la modélisation d'une plaque métallique sous sollicitation dynamique. La modélisation est basée sur des éléments coques, une loi élasto-viscoplastique permettant d'inclure de l'endommagement, et un écoulement dépendant de l'ouverture de la brèche.*

ABSTRACT. *Several different fields are involved in rupture of pressurized metallic vessels (mechanics but also thermodynamics as well as fluid mechanics) but few studies take into account all of them. Consequently a numerical study of a metallic plate submitted to dynamic solicitation is presented in this paper, as well as approaches related to rupture. The modeling is developed with MSC MARC software: it is based on shell elements, elasto-viscoplastic and damage laws, and a depressurization depending on breach opening.*

MOTS CLEFS : *dynamique, élastoviscoplastique, endommagement, rupture.* KEY WORDS : *dynamic, elastoviscoplastic, damage, rupture.*

1. Introduction

De nombreuses études ont porté sur la rupture de structures métalliques. Certaines (Qiu *et al.*, 2003 ; Su *et al.*, 1999) se sont focalisées sur son aspect mécanique, tel que la propagation de fissures, alors que d'autres insistent sur le lien du phénomène avec la mécanique des fluides (Woodward & Mudan, 1991; Fthenakis *et al.*, 2003). Peu de modèles combinent les deux approches, et la plupart des études qui les mettent en jeu sont adaptées aux conduites, en particulier les gazoducs, (Iung, 1994 ; Rivalin, 1998). L'objectif de ce travail est d'apporter une meilleure compréhension de la rupture de capacités métalliques sous pression. A cette fin, une plaque circulaire soumise à un chargement dynamique est modélisée. Les différentes méthodes qui décrivent le comportement du système, l'endommagement et la rupture sont alors évaluées.

2. Présentation générale

2.1 Loi de comportement

Le système étant soumis à de fortes vitesses de déformation ainsi qu'à de grands déplacements, la loi élasto-viscoplastique de Chaboche, introduisant un écrouissage isotrope et cinématique, a été choisie pour décrire le comportement du matériau. L'utilisation d'une telle loi a déjà permis d'obtenir un comportement proche de celui observé expérimentalement, comme le montre la littérature (Woznica *et al.*, 2001). Par ailleurs, les différents paramètres de la loi peuvent être déterminés au moyen du protocole présenté par Woznica et Klosowski (Woznica *et al.*, 2000).

2.2. Initiation de la rupture : l'endommagement

Plusieurs méthodes permettent d'étudier la rupture. Parmi celles-ci figure l'approche locale qui repose sur des considérations microscopiques. Pour cette raison, cette approche semble la mieux adaptée pour décrire l'initiation de fissures. En particulier, une bonne description de la rupture ductile peut être faite grâce à une approche locale basée sur la croissance et la coalescence de cavités.

2.2.1. Le modèle de Gurson

La formulation du modèle de Gurson (Gurson, 1977), très utilisée, décrit l'évolution du comportement plastique en fonction de la fraction volumique de vide :

$$\frac{\sigma_e^2}{\sigma_0^2} + 2 \times f \times \cosh\left(\frac{\sigma_k^k}{2 \times \sigma_0}\right) - \left[1 + f^2\right] = 0 \qquad [1]$$

f étant la fraction volumique de vide, σ_0 (Pa) est la contrainte équivalente d'écoulement plastique, σ_e (Pa) la contrainte équivalente macroscopique de Von Mises, σ_k^k (Pa) la trace du tenseur des contraintes.

L'endommagement est représenté par la fraction volumique de vide qui affecte directement la limite plastique. La littérature montre que ce modèle peut être intéressant pour la modélisation de la rupture ductile à grande vitesse, couplée avec une loi de comportement élastoviscoplastique (Rivalin *et al.*, 2001).

2.2.2. Approche de l'endommagement de Chaboche & Lemaitre

Un autre modèle d'endommagement couplé (Chaboche & Lemaitre, 1988) introduit le paramètre D, rapport entre la surface d'un élément représentatif du matériau et celle réelle, tenant compte des cavités. Pour D=0, le matériau est non endommagé, alors que pour D=1, il correspond à un état totalement endommagé. Ce paramètre peut être défini à partir de la relation suivante :

$$\dot{D} \times (1 - D)^{2\beta} \times \left(\frac{2E\alpha}{C} \right)^{\beta} = \dot{p} \qquad [2]$$

où $\dot{p}$ (s^{-1}) est le taux de déformation plastique cumulée, E (Pa) le module de Young, α et β des paramètres à déterminer expérimentalement à partir d'essais de traction en chargement et déchargement, D=1-E'/E, C étant fonction du coefficient de Poisson et des contraintes.

2.3. Fragmentation

Si la plupart des ruptures se déroulent selon une ouverture (brèche), un autre processus de ruine peut survenir ; la fragmentation, associée au caractère fragile du matériau ou bien à une géométrie et à un chargement particulier. Une raison pouvant expliquer ce phénomène est l'existence d'hétérogénéités. Pour résoudre ce problème, Mott (Mott, 1943) adopte une approche probabiliste définissant aléatoirement la contrainte ou la déformation à la rupture. Cette loi est appropriée pour les matériaux très fragiles, mais des recherches doivent être menées pour étudier sa validité dans le cas de géométries particulières (par exemple un cylindre dont l'intérieur de la parois est soumise à une pression uniforme).

3. Présentation de l'étude expérimentale

L'expérience réalisée au sein du L.E.E.S. consiste à solliciter dynamiquement une plaque circulaire de 194 mm. de diamètre grâce à une onde de pression. La plaque est fixée à l'extrémité d'un tube rempli d'un mélange gazeux explosif (Figure 1). Ce mélange est enflammé et produit une détonation ou une déflagration.

Des plaques de 2 mm, 1 mm et 0.5 mm (0.8 mm dans le cas de l'acier) d'épaisseur sont utilisées. Pour initier et faciliter la localisation de la fissure, la plaque est entaillée, sur une profondeur variant de 0.3 à 1.6 mm. Le chargement exercé sur la plaque est représenté en Figure 2.

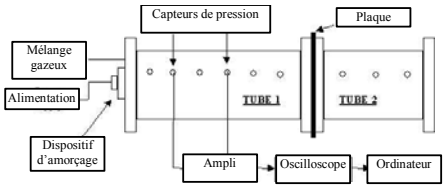

Figure 1. *Dispositif expérimental*

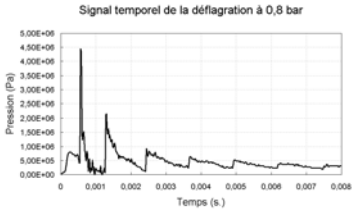

Figure 2. *Pression appliquée sur la plaque (déflagration à 0,8 bar))*

Pour les plaques utilisées, différents matériaux ont été retenus : Al 5754 (E=78 GPa / σ_m = 201,4 MPa / $\varepsilon_{rupture}$ = 0,15), Al 2017 (E=90 GPa / σ_m = 390,8 MPa / $\varepsilon_{rupture}$ = 0,19), et l'acier DC01 (E=293 GPa / σ_m = 318,3 MPa / $\varepsilon_{rupture}$ = 0,27). Ils constituent un panel représentatif des comportements de matériaux fragiles et ductiles.

4. Résultats de la simulation numérique

Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel de mécanique non linéaire MSC. MARC. Le signal de pression recueilli par les capteurs de pression est directement intégré au modèle numérique. Le système étudié étant une plaque circulaire, seul un quart est maillée. L'épaisseur étant très petite au regard des autres dimensions des éléments du maillage, des éléments coques ont été implémentés.

Afin de vérifier la cohérence du modèle sous MSC MARC, une comparaison est réalisée avec les résultats de la simulation d'une plaque d'aluminium 5754 (133 mm de rayon, 1 mm d'épaisseur) soumise à une explosion, rapportés par Woznica *et al.*(2000). Le modèle de Woznica *et al*, constitué de 31 éléments coques à 6 couches et 9 nœuds, repose sur un schéma d'intégration aux différences centrées pour l'équation de mouvement. L'explosion représente une surpression de 10 bars. La modélisation réalisée sous MSC. MARC emploie deux maillages à 31 ou 61 éléments coque à 5 couches et 4 nœuds, ainsi que l'algorithme de Houbolt pour intégrer l'équation du mouvement. Les déplacements obtenus avec MSC MARC sont très proches de ceux publiés par Woznica *et al.*(2000) (Figure 3) et permettent de valider le modèle employé.

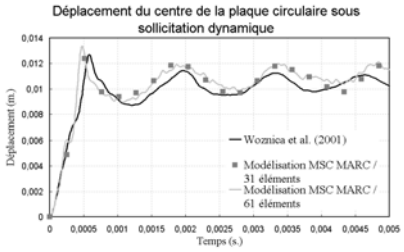

Figure 3. *Déplacement au centre de la plaque (Woznica et al.,2000 / MSC MARC)*

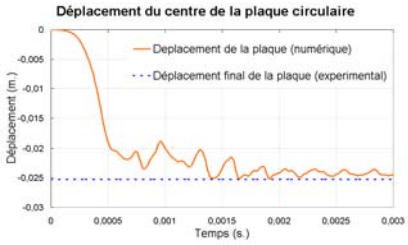

Figure 4. *Comparaison des résultats numériques et expérimentaux*

La simulation de l'expérience décrite dans la partie 3 a été réalisée pour une plaque de 1 mm d'épaisseur et de 97 mm de rayon, soumise à la déflagration d'un mélange explosif gazeux à 0.8 bar. La comparaison entre la flèche finale mesurée et celle calculée numériquement (Figure 4) révèle un faible écart (5%).

Une étude de l'état de contraintes et de déformations permet de connaître les valeurs maximales théoriques atteintes dans le cas d'une plaque entaillée au cours du phénomène. Ainsi, la valeur maximale de la contrainte équivalente (Von Mises) observée le long de l'entaille est de $3{,}2 \cdot 10^8$ Pa, alors que la contrainte à la rupture mesurée lors d'essais de traction est de $2 \cdot 10^8$ Pa. La zone dépassant ce niveau est très étendue autour de l'entaille, contrairement à celle en déformation qui est plus restreinte (Figure 5), pour $\varepsilon_{rupture}$ fixé à 0,15.

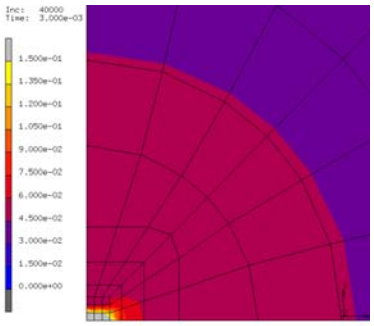

Figure 5. *Déformations d'une plaque entaillée (l'entaille étant représentée par les 3 éléments en bas à gauche)*

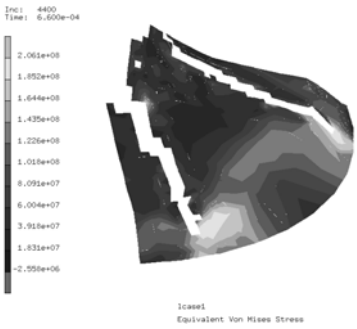

Figure 6. *Exemple de la désactivation d'éléments*

La méthode choisie pour représenter la rupture qui est actuellement en cours d'étude consiste à modifier les caractéristiques des éléments ayant atteint une certaine limite de rupture. Leur raideur, leur masse, les forces internes ainsi que les

chargements qui leur sont appliqués sont négligés. Ils sont alors désactivés au cours de la simulation (Figure 6).

4. Conclusion

La modélisation spatiale d'une plaque métallique sous sollicitation dynamique a montré la bonne adéquation de celle-ci avec l'expérience et souligné le bon choix de l'approche retenue. Cependant, la modélisation d'essais pour des plaques dont l'épaisseur n'est pas égale à 1mm révèle des écarts plus importants, suggérant la nécessité de déterminer les paramètres pour chaque épaisseur de plaque. Le couplage fluide/structure reste encore à mettre en œuvre, ce qui peut être délicat. En effet, une soudaine dépressurisation peut provoquer un phénomène de BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), qui est un changement de phase explosif.

Bibliographie

Fthenakis V.M., Rohatgi U.S., Chung B.D., « A simple model for predicting the release of a liquid-vapor mixture from a large break in a pressurized container », *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 16, n° 1, 2003, p. 61-72

Gurson A.L., « 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.*, vol. 99, 1977, p. 2-15

Iung T., Propagation rapide et arrêt des fissures dans les aciers pour gazoducs. Rupture par clivage et rupture ductile, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1994

Lemaitre J., Chaboche J.-L., *Mécanique des matériaux solides*, Dunod, 1988

Mott N.F., Fragmentation of H.E. shells: a theoretical formula for the distribution of weight of fragments, A.O.R.G. Memorandum 24, 1943

Qiu H., Enoki M., Kawaguchi Y., Kishi T., « A model for the dynamic fracture toughness of ductile structural steel », *Eng. Frac. Mech.*, vol. 70, n° 5, 2003, p. 589-598

Rivalin, F., Développement d'aciers pour gazoducs à haute limite d'élasticité et ténacité élevée : mécanique et mécanismes de la rupture ductile a grande vitesse, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1998

Rivalin F., Besson J., Pineau A., Di Fant M., « Ductile tearing of pipeline-steel wide plates II. Modeling of in-plane crack propagation », *Eng. Frac. Mec.*, vol. 68, n°3, 2001, p. 347-364

Su B., Bhuyan G.S., « Elastic fracture properties of all-steel gas cylinders with different axial crack types », *Int. J. of Press. Vessels and Piping*, vol. 76, n°1, 1999, p. 23-33

Woodward J.L., Mudan K.S., « Liquid and gas discharge rates through holes in process vessels », *J. Loss Prev. Proc. Ind.*, vol. 4, n° 3, 1991, p. 161-165

Woznica K., Kłosowski P, « Evaluation of viscoplastic parameters and its application for dynamic behaviour of plates », *Arch. of Appl. Mec.,* vol. 70, n°8-9, 2000, p. 561-570

Woznica K., Pennetier O., Renard J., « Experiments and numerical simulation on thin metallic plates subjected to an explosion », *J. Eng. Mat. Tech*, 123, n°2, 2001, p. 203-209