

# Modélisation numérique de la rupture de structures métalliques sous sollicitation dynamique

Benjamin Daudonnet, Krzysztof Woznica, Frédéric Mercier

► **To cite this version:**

Benjamin Daudonnet, Krzysztof Woznica, Frédéric Mercier. Modélisation numérique de la rupture de structures métalliques sous sollicitation dynamique. 17. Congrès Français de Mécanique (CFM'05), Aug 2005, Troyes, France. pp.NC, 2005. <ineris-00972496>

**HAL Id: ineris-00972496**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972496>**

Submitted on 3 Apr 2014

**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.

# Modélisation numérique de la rupture de structures métalliques sous sollicitation dynamique

Benjamin Daudonnet<sup>1</sup>, Krzysztof Woznica<sup>1</sup>, Frédéric Mercier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur de Bourges (ENSIB)

Laboratoire Energétique Explosion Structures

L.E.E.S., EA 1205, Université d'Orléans

<sup>2</sup>Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Unité Résistance des Structures,

10 boulevard Labitolle

18020 BOURGES CEDEX

**Résumé :** *L'éclatement de capacités métalliques sous pression peut se présenter sous forme de fuite, ou bien d'explosion avec la projection de fragments. Ce phénomène fait non seulement intervenir le domaine de la mécanique des solides mais aussi d'autres domaines tels que la mécanique des fluides et la thermodynamique. Cet article présente différentes approches et méthodes convenant pour chaque étape de la rupture de capacités métalliques sous pression. La modélisation est réalisée à l'aide du logiciel MARC : celle-ci repose sur des éléments coques, une loi élasto-viscoplastique incluant de l'endommagement, et un écoulement dépendant de l'ouverture de la brèche.*

**Abstract :** *Few studies focus on the whole process of pressurised metallic containers as it involves several different fields (mechanics but also thermodynamics or fluid mechanics). Consequently, this paper aims at providing appropriate approaches for the modelling of a metallic plate submitted to dynamic solicitation. The modelling is developed with MSC MARC software: it is based on shell elements, elasto-viscoplastic and damage laws, and a depressurisation depending on breach opening.*

**Mots clefs :** Dynamique; Elasto-viscoplasticité; Endommagement; Rupture

## 1 Présentation générale

### 1.1 La rupture de réservoirs sous pression

De nombreuses études font référence au domaine de la rupture : certains, comme Qiu et al. [1], Su et al. [2], insistent uniquement sur l'aspect mécanique (tel que la propagation de fissure), alors que d'autres portent leurs efforts sur la mécanique des fluides, comme Haque et al. [3], Woodward & Mudan [4], Fthenakis et al. [5]. Peu de modèles incluent ces deux aspects à la fois, et la plupart des études reposant sur de telles considérations sont menées pour les pipelines, comme les travaux réalisés par Jung [6] et Rivalin [7]. L'objectif de ce travail est d'apporter une meilleure compréhension de la rupture de capacités métalliques sous pression, systèmes n'ayant pas autant fait l'objet d'études que les pipelines. L'étude expérimentale est réalisée à l'aide d'une plaque circulaire soumise à un chargement dynamique. Pour la modélisation, différentes méthodes peuvent être employées afin de décrire le comportement du système, l'endommagement et la rupture.

### 1.2 Description des lois de comportement

Dans cette étude, les déformations sont considérées suffisamment petites pour permettre la décomposition additive de la vitesse de déformation en une partie élastique et une partie inélastique. Le matériau est soumis à de grandes vitesses de déformation ainsi que de grands déplacements. La loi élasto-viscoplastique de Chaboche a été choisie pour décrire le comportement du matériau. Woznica et al. [8] ont montré que l'utilisation d'une telle loi permettait d'obtenir des résultats très satisfaisants par rapport à ceux expérimentaux dans le cas dynamique de plaque. Cette loi introduit les relations suivantes :

- le taux de déformation inélastique  $\dot{\mathbf{E}}^i$  ( $s^{-1}$ ) :  $\dot{\mathbf{E}}^i = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\mathbf{s}' - \mathbf{X}'}{J(\mathbf{s}' - \mathbf{X}')}$

où  $\dot{p}$  est le taux de déformation plastique cumulée ( $s^{-1}$ ),  $\mathbf{s}'$  le déviateur du tenseur des contraintes  $\mathbf{s}$  (Pa),  $\mathbf{X}'$  le déviateur des contraintes associé à l'écoulement cinématique  $\mathbf{X}$  (Pa),  $J$  le second invariant d'un tenseur de contrainte (Pa).

- Le taux de déformation plastique cumulée  $\dot{p}$  ( $s^{-1}$ ) :  $\dot{p} = \gamma \left\langle \frac{J(\mathbf{s}' - \mathbf{X}') - R - k}{K} \right\rangle^n$

où  $R$  est la contrainte associée à l'écoulement isotrope (Pa),  $K$  (Pa) et  $n$  (-) sont des paramètres liés à la viscosité, et  $\gamma = 1s^{-1}$

Cette loi fait également intervenir deux types d'écoulement :

- un écoulement isotrope :  $\dot{\mathbf{R}} = b \times (\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}) \dot{p}$

où  $R_1$  (Pa) et  $b$  (-) sont des paramètres.

- un écoulement cinématique :  $\dot{\mathbf{X}} = \frac{2}{3} a \dot{\mathbf{E}}^i - c \mathbf{X} \dot{p}$

où  $a$  (Pa) et  $c$  (-) sont des paramètres.

Une méthode pour déterminer ces différents paramètres est présentée par Woznica et Klosowski [9].

### 1.3 Initiation de la rupture : l'endommagement

Il existe plusieurs méthodes afin d'étudier la rupture. Parmi celles-ci, on peut distinguer celles établies selon une approche locale et globale : l'approche locale repose sur des considérations microscopiques contrairement à celle globale basée sur des paramètres macroscopiques. Par conséquent la première approche est plus précise pour décrire l'initiation de fissure grâce aux considérations cristallographiques de la structure. Ainsi, une bonne description de la rupture ductile peut être faite grâce à une approche locale basée sur la croissance et la coalescence de cavités. La qualité de cette approche explique le choix de celle-ci dans le cas de la rupture ductile. Pour cela un couplage total a été envisagé.

#### 1.3.1 Le modèle de Gurson

Un modèle d'endommagement très largement répandu est celui de Gurson [10], modifié par Needleman et Tvergaard [11]. Il est formulé à partir des équations suivantes :

$$\frac{\sigma_e^2}{\sigma_0^2} + 2 \times q_1 f^* \times \cosh\left(\frac{q_2 \sigma_k}{2 \times \sigma_0}\right) - \left[1 + (q_1 f^*)^2\right] = 0 \quad \text{où : } f^*(f) = \begin{cases} f, & \text{if } f \leq f_c \\ f_c - \frac{f_u - f_c}{f_F - f_c}, & \text{if } f > f_c \end{cases}$$

$f_u = 1/q_1$ , généralement  $f_c = 0.15$ ,  $q_1 = 1.5$  et  $q_2 = 1.0$ ,  $\sigma_0$  (Pa) est la contrainte équivalente d'écoulement plastique;  $\sigma_e$  (Pa) la contrainte équivalente macroscopique de von Mises,  $\sigma_k$  (Pa) la trace du tenseur des contraintes.

L'endommagement est représenté par la fraction volumique de vide qui affecte directement la limite plastique. L'application d'un tel modèle pour des problèmes dynamiques est confirmée dans l'étude faite par Rivalin [7] sur la mécanique de la rupture ductile à grande vitesse. Cette loi étant bien adaptée pour l'initiation de la fissure, une étude particulière visant son couplage avec une loi élastoviscoplastique est menée, de façon similaire au travail réalisé par Rivalin et al. [12].

### 1.3.2 L'approche de Chaboche & Lemaitre

Un autre modèle d'endommagement couplé est celui proposé par Chaboche et Lemaitre [13], reposant sur le paramètre d'endommagement suivant :

$$D = \frac{S_D}{S} = \frac{S - \bar{S}}{S}$$

où  $S$  ( $m^2$ ) est la surface d'un élément représentatif du matériau,  $\bar{S}$  ( $m^2$ ) sa surface réelle (tenant compte des cavités). Pour  $D=0$ , le matériau est non endommagé, alors que lorsqu'il atteint la valeur  $D=1$ , il correspond à un état totalement endommagé, ce qui traduit la ruine de l'élément du matériau considéré. Les paramètres associés à cette loi peuvent être déterminés par des essais de traction en chargement et déchargement. En effet, une formulation possible reliant les paramètres d'endommagement est :

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

où  $E$  (Pa) est le module de Young,  $\alpha$  et  $\beta$  des paramètres à déterminer expérimentalement. Après intégration de cette relation, nous obtenons l'expression de l'endommagement (défini à partir d'un seuil de déformation plastique cumulée  $p_0$ ) :

$$D(p) = 1 - \left[ 1 - (p - p_0) \times (2\beta + 1) \times \left( \frac{2E\alpha}{Cte} \right)^{-\beta} \right]^{\frac{1}{2\beta+1}}$$

Etant donné que  $D=1-\bar{E}/E$  (où  $\bar{E}$  représente le module de Young altéré par l'endommagement), les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  peuvent être facilement déterminés en utilisant la relation ci-dessus.

### 1.4 Fragmentation

Si la plupart des ruptures se produisent avec la formation d'une brèche, un autre processus de ruine peut survenir ; la fragmentation. Ce phénomène, associé au caractère fragile du matériau mais également pour des systèmes de géométries particulières, est complexe. Une raison expliquant la fragmentation est l'existence d'hétérogénéités. Pour résoudre ce problème, Mott [14] adopte une approche probabiliste définissant aléatoirement la contrainte ou la déformation à la rupture. Ainsi, la distribution de probabilité s'écrit (pour un critère de rupture en déformation) :

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{C}{\gamma} e^{\gamma \varepsilon}\right)$$

où  $P$  désigne la probabilité de rupture,  $\varepsilon$  (-) est la déformation,  $C$  et  $\gamma$  étant des constantes.

Une telle loi est appropriée pour les matériaux très fragiles, mais des recherches doivent être menées pour étudier sa validité dans le cas de géométries particulières (tel un cylindre dont l'intérieur de la parois est soumise à une pression interne uniforme).

## 2 Présentation de l'étude expérimentale

La plupart des modèles concernent des analyses planes (2D) et se basent sur des essais de traction avec des éprouvettes entaillées. Les travaux menés au sein du L.E.E.S. proposent une approche différente : elle 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 ont été utilisées. Pour initier et faciliter la localisation de la

fissure, une entaille a été faite, dont la profondeur varie de 0.3 à 1.6 mm. Le signal de pression s'exerçant sur la plaque est représenté sur la Figure 2.

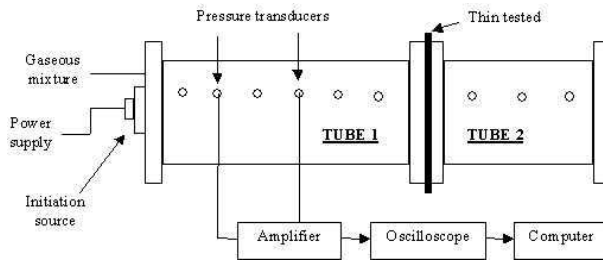


FIG. 1 - Dispositif expérimental

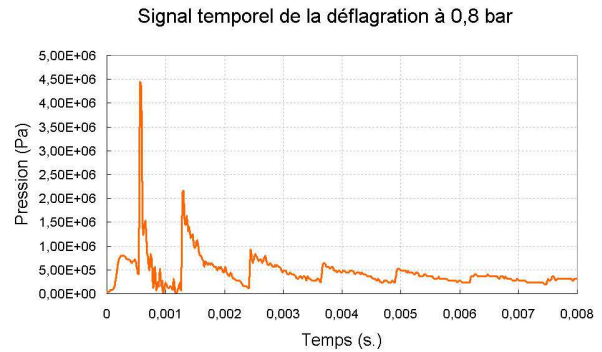


FIG. 2 - Pression appliquée sur la plaque dans le cas d'une déflagration à 0,8 bar

Pour les plaques utilisées, différents matériaux ont été retenus : Al 5754, Al 2027, et l'acier DC01. Ils ont été choisis pour disposer d'un panel représentatif des comportements de matériaux fragiles et ductiles. Les caractéristiques de ces matériaux ont été déterminées au cours d'essais de traction : les valeurs moyennes sont présentées dans le Tableau 1.

Matériaux	Module d'Young (GPa)	Contrainte maximale à la traction (MPa)	Limite d'élasticité à $\epsilon_{0,2\%}$ (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Al 2017	75	390,8	265	18,77
Acier DC01	226	318,3	249	27,75
Al 5754	70	201,4	110	20,44

TAB. 1 - Caractéristiques des matériaux

### 3 Simulation numérique

#### 3.1 La modélisation

L'expérience décrite précédemment a été modélisée à l'aide du logiciel de mécanique MSC. MARC. Le signal de pression recueilli grâce aux capteurs de pression a été transféré dans le modèle numérique. Afin de réduire le temps de calcul et grâce aux plans de symétrie, seul un quart de la plaque a été maillée : les déplacements perpendiculaires aux plans de symétrie ainsi que les axes de rotations contenus dans ceux-ci sont bloqués. L'épaisseur de la plaque étant très petite par rapport aux autres dimensions des éléments du maillage, des éléments coques ont été retenus.

#### 3.2 Résultats

Les résultats ont été obtenus pour la modélisation d'une plaque circulaire géométriquement non-linéaire en considérant le modèle de Chaboche avec écrouissage cinématique et isotrope. Afin de vérifier la validité du modèle sous MSC MARC, celui-ci a tout d'abord été confronté à un autre modèle développé par Woznica et al. [9] décrivant une plaque d'aluminium 5754 (133 mm de rayon, 1 mm d'épaisseur) soumise à une explosion en milieu ouvert. Les résultats de leur simulation sont en bon accord avec l'expérience. Leur

modèle a les caractéristiques suivantes : 31 éléments coques à 6 couches et 9 nœuds, un schéma d'intégration des différences centrées pour intégrer l'équation de mouvement, une pression de 10 bars s'annulant après 133  $\mu$ s. La modélisation réalisée sous MSC. MARC possède les propriétés suivantes : maillages avec 31 ou 61 éléments coque à 5 couches et 4 nœuds, algorithme de Newton-Raphson pour intégrer l'équation de mouvement. Les résultats obtenus avec MSC MARC sont concluant : les valeurs de déplacement du centre de la plaque sont très proches de celles obtenues par Woznica (cf. fig. 3).

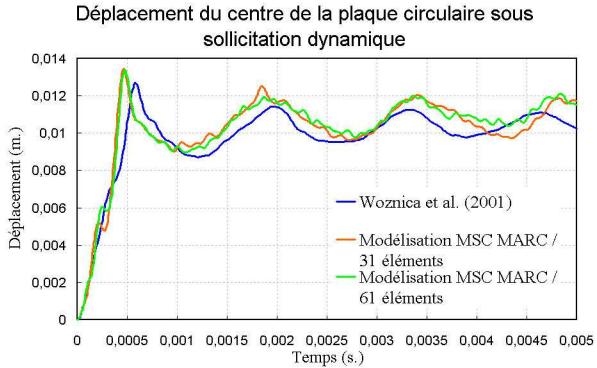


FIG. 3 - Déplacement du centre de la plaque : comparaison Woznica et al. / MSC MARC

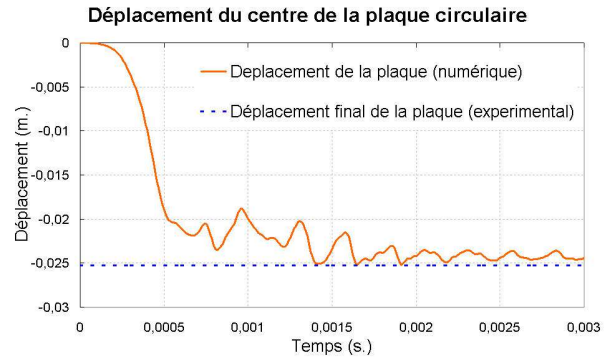


FIG. 4 – Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

De tels résultats confirment donc la validité de la modélisations sous MARC. Ainsi, la simulation de l'expérience décrite précédemment (partie 2) a été réalisée sous MARC. La plaque, de 1 mm d'épaisseur et de 97 mm de rayon, est soumise à la déflagration d'un mélange explosif gazeux à 0.8 bar. Le seul résultat expérimental dont nous disposons est la déformée finale. La comparaison entre la flèche finale mesurée et celle calculée numériquement est tracée sur la figure 4 : l'écart entre la valeur numérique moyenne finale et le déplacement final est seulement de 5%. Les conditions limites le long de la circonférence de la plaque (liaisons encastées) pourrait expliquer cet écart, mais une nouvelle définition de celles-ci (déplacements bloqués mais rotations libres) n'apporte pas de changement significatifs.

### 3.3 Perspectives

Une approche simple, reposant sur des critères de contraintes et de déformations a été réalisée. Cette observation permet d'avoir une idée sur les valeurs maximales théoriques pouvant être atteintes dans le cas d'une plaque entaillée. Un haut niveau de contrainte est observé le long de l'entaille : la valeur maximale est de  $3,7 \cdot 10^8$  Pa alors que les essais de traction montrent une contrainte à la rupture de  $2 \cdot 10^8$ . La zone dépassant cette contrainte maximale est très étendue autour de l'entaille. En revanche, une étude de la déformation reflète une zone plus restreinte (Figure 5), la déformation maximale étant de 0,15.

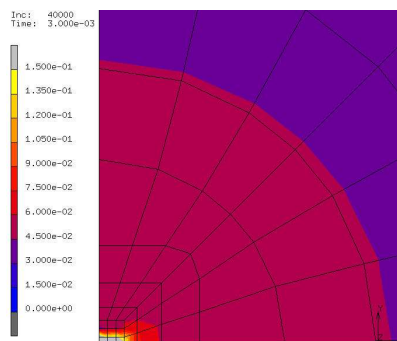


FIG. 5 - Déformations de la plaque entaillée (l'entaille est représentée par les 3 éléments en bas à gauche)

Une méthode choisie pour représenter la rupture, et actuellement en cours d'étude, est de modifier les caractéristiques des éléments ayant atteint une certaine limite de rupture. Pour cela, leur raideur, leur masse, les forces internes ainsi que les chargements appliqués ne sont plus pris en compte.

## 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. L'étude a mis en évidence la variation des caractéristiques mécaniques des plaques pour des épaisseurs différentes, ce qui se traduit par une modification des paramètres de la loi de comportement. Cette différence résulte du processus de fabrication, et implique la nécessité de déterminer ces paramètres pour chaque épaisseur de plaque. Actuellement l'étude du couplage fluide/structure est réalisée : le fluide considéré peut soit être présent sous une seule phase ou bien sous deux phases (gaz et liquide). Si la dépressurisation d'un gaz peut être déterminée analytiquement, cela devient plus délicat pour un fluide présentant une phase liquide, car celui-ci peut brutalement se vaporiser (B.L.E.V.E.).

## Remerciements

Un remerciement tout particulier au Pr. Klosowski pour la mise à disposition des moyens de calcul du Technical University of Gdansk, Department of Civil and Environmental Engineering, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdansk, Pologne

## Références

- [1] H. Qiu, M. Enoki, Y. Kawaguchi, and T. Kishi. A model for the dynamic fracture toughness of ductile structural steel. *Eng. Frac. Mech.*, 70 (5) : 589-598, 2003.
- [2] B. Su and G.S. Bhuyan. Elastic fracture properties of all-steel gas cylinders with different axial crack types. *Int. J. of Press. Vessels and Piping*, 76 (1) : 23-33, 1999.
- [3] A. Haque, S. Richardson, G. Saville, and G. Chamberlain. Rapid depressurization of pressure vessels. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 3 (1) : 4-7, 1990.
- [4] J.L. Woodward and K.S. Mudan. Liquid and gas discharge rates through holes in process vessels. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 4 (3) : 161-165, 1991.
- [5] V.M. Fthenakis, U.S. Rohatgi, and B.D. Chung. 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.*, 16 (1) : 61-72, 2003.
- [6] T. Jung. *Propagation rapide et arrêt des fissures dans les aciers pour gazoducs. Rupture par clivage et rupture ductile*, PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris en Sciences et Génie des Matériaux, 1994.
- [7] F. Rivalin. *Développement d'aciers pour gazoducs à haute limite d'élasticité et ténacité élevée : mécanique et mécanismes de la rupture ductile à grande vitesse*, PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris en Sciences et Génie des Matériaux, 1998.
- [8] K. Woznica, O. Penner, and J. Renard. Experiments and numerical simulation on thin metallic plates subjected to an explosion. *J. Eng. Mat. Technol.*, 123 (2) : 203-209, 2001.
- [9] K. Woznica and P. Klosowski. Evaluation of viscoplastic parameters and its application for dynamic behaviour of plates. *Archive of Applied Mechanics*, 70 (8-9) : 561-570, 2000
- [10] 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. Mater. Technol.*, 99 : 2-15, 1977.
- [11] V. Tvergaard and A. Needleman. Analysis of cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metall.*, 32 (1) : 157-169, 1984.
- [12] F. Rivalin, J. Besson, A. Pineau, and M. Di Fant. Ductile tearing of pipeline-steel wide plates II. Modeling of in-plane crack propagation. *Eng. Fract. Mech.*, 68 (3) : 347-364, 2001.
- [13] J. Lemaitre and J. L. Chaboche. *Mécanique des matériaux solides*, Dunod, 1988.
- [14] N.F. Mott. Fragmentation of H.E. shells: a theoretical formula for the distribution of weight of fragments, A.O.R.G. Memorandum 24, 1943