

# Application du modèle GTN à l'endommagement dynamique de la structure de générateurs de gaz pour airbag.

Harold Fresnel<sup>1,2</sup>, Vincent Grolleau<sup>1</sup>, Gerard Rio<sup>1</sup>, Patrice Longère<sup>1</sup> & Philip Hardy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux - Université de Bretagne Sud -Rue de Saint-Maudé, BP 92116, 56321 LORIENT Cedex, France.

<sup>2</sup>AUTOLIV / LIVBAG - Route du Beuzit, 29390 PONT-DE-BUIS.

[harold.fresnel@univ-ubs.fr](mailto:harold.fresnel@univ-ubs.fr)

## Résumé :

Les sacs gonflables de sécurité passive (airbags) sont soumis à des règles draconiennes de sécurité vis-à-vis des occupants du véhicule. Le gonflement du sac est assurée par un système pyrotechnique qui permet d'évacuer les gaz rapidement. Avant sa mise sur le marché, le générateur de gaz constitué d'un tube à paroi mince fermé à ses deux extrémités par des sertis et percé d'orifices pour l'évacuation des gaz de combustion, doit subir des essais de validation. Un de ces essais, appelés burst test, consiste à soumettre la chambre de combustion (orifices bouchés) à des rampes de pression dont l'amplitude doit mener à la rupture de la structure. L'objectif du travail présenté dans ce papier est de prédire par simulation numérique le comportement d'un générateur de gaz sous sollicitations dynamiques afin d'optimiser sa phase de développement et réduire les coûts induits par le nombre important d'essais de validation. Une campagne d'essais mécaniques à d'abord été menée mettant en évidence un écrouissage plastique et une viscosité marquée ainsi qu'un endommagement plastique ductile. Le modèle GTN (Gurson-Tveergard-Needleman) a été utilisé par la suite pour décrire les phénomènes combinés mentionnés précédemment. Les premières comparaisons simulations numériques-burst test sont encourageantes vis-à-vis de l'aspect prédictif de la modélisation.

## Abstract :

Airbag inflator functioning is submitted to draconian safety rules for vehicle occupants. The bag inflating process is ensured by a pyrotechnic system which delivers combustion gases very quickly. Prior manufacturing, the inflator consisted of a thin tube closed at both extremities, crimped and perforated with exit ports for combustion gas release, undergoes validation tests. Ones called burst tests, consist in putting inflator combustion chamber (without exit ports) under various dynamic pressure ramps until structure failure. The work presented in this paper aims at predicting by numerical simulation the inflator response during dynamic loading in order to optimize its development and decrease the costs induced by validation tests. Many mechanical tests have been carried out showing significant plastic hardening and viscosity with plastic ductile damage. The GTN (Gurson-Tvergaard-Needleman) model has been used to describe the combined aforementioned effects. The first numerical simulations-burst test comparison is encouraging regarding prediction ability of the model.

## Mots-clefs :

dynamique ; endommagement ; simulation numérique

## 1 Introduction

Les générateurs de gaz pour airbag (GG) ont pour but de gonfler un sac en un temps très court (de l'ordre de quelques dizaines de ms). La structure étudiée ici est un tube à paroi mince en acier doux à l'intérieur duquel se trouvent différents composants, dont un support allumeur et des blocs de propergol. Il est fermé à ses extrémités par des bouchons. L'assemblage de ces derniers s'effectue par sertissage (voir aussi Shigoakar *et al.* (2004a)). La combustion des blocs de propergol génère les gaz qui s'évacuent par l'intermédiaire d'une zone de diffusion.

Les GG sont ainsi sollicités en service par une montée en pression dynamique atteignant rapidement une valeur maximale de fonctionnement pour ensuite diminuer lentement de manière à maintenir le sac gonflé le temps nécessaire. Cette pression maximale de fonctionnement est prise en référence pour le dimensionnement des générateurs dont une des étapes finales est un essai destructif : le burst test. Cet essai s'effectue sur un tube assemblé avec un support allumeur et un bouchon sertis aux extrémités, sans zone de diffusion de manière à s'approcher d'un des deux modes de défaillance observés du générateur, à savoir l'éjection du support allumeur ou du bouchon, ou la rupture du tube. A partir de cet essai une pression d'éclatement est déterminée et le rapport de celle-ci avec la pression de fonctionnement fournit un coefficient de sécurité. L'objectif industriel est de diminuer le nombre d'essais physiques en mettant en place une méthodologie numérique basée sur la simulation prédictive de la réponse de la structure depuis la phase d'assemblage par sertissage jusqu'à l'essai destructif de validation (burst test) au moyen du code de calcul industriel par éléments finis ABAQUS. Cet article présente l'étude expérimentale et numérique de l'endommagement dynamique d'un GG tubulaire.

Le chapitre 2 présente une partie des résultats expérimentaux de caractérisation. La difficulté majeure consiste à extraire des éprouvettes dans des tubes de faible diamètre et de faible épaisseur (voir Sun et Li (2002), Zhao (2000) et Jiao et Zhao (2001) pour différentes solutions en traction). Un prédimensionnement par éléments finis s'est avéré indispensable pour obtenir des géométries adaptées. Les essais ont alors permis de mettre en évidence l'écrouissage, la viscosité, mais également l'adoucissement du matériau par endommagement plastique ductile. Le chapitre 3 définit la première approche adoptée pour modéliser le comportement du matériau du GG en présence d'endommagement plastique ductile. Dans une première approximation, cette modélisation est réalisée dans le cadre de la plasticité indépendante du temps, la prise en compte de l'endommagement étant basée sur le modèle de milieux poreux proposé par Gurson (1977), Tvergaard et Needleman (1984) et Tvergaard (1990) (GTN). Ce modèle a été appliqué avec succès dans plusieurs cas d'endommagement de structure (Xia *et al.* (1995)), Tvergaard et Needleman (1984), Becker *et al.* (1988), Becker et Needleman (1986), Leblond *et al.* (1994)). Enfin, le chapitre 4 concerne l'essai de burst test avec la présentation des premiers essais expérimentaux et des premières simulations numériques par éléments finis. Pour des raisons de confidentialité, aucune valeur ne sera reportée sur les courbes de même que sur les légendes des différentes simulations numériques.

## 2 Caractérisation du tube constituant les GG

Les tubes calibrés constituant les GG sont étirés à froid. Le matériau est un acier doux de construction faiblement allié du type E355. La difficulté majeure pour réaliser les essais de caractérisation est d'obtenir une géométrie d'éprouvette permettant d'exploiter les résultats expérimentaux. En effet, les tubes sont de faible diamètre et possèdent de ce fait une courbure prononcée. Il est donc nécessaire d'effectuer un prédimensionnement par éléments finis avant d'envisager les essais physiques.

La solution retenue pour l'extraction des éprouvettes de traction est un usinage du tube de manière à obtenir deux éprouvettes lamellaires en gardant des extrémités tubulaires percées pour l'amarrage (voir Fig. 1(b)). L'essai de cisaillement a été adapté de celui de Manach et Couty (2001) pour des éprouvettes courbées, l'idée étant de concevoir des mors capables de serrer l'éprouvette sans la déformer et donc de garder l'intégrité de la courbure pendant l'essai (voir Fig. 1(d)).

Les figures 1(a) et 1(c) montrent une bonne homogénéité du champ de déformation numérique dans la zone utile en traction et dans la bande utile de cisaillement. Ce prédimension-

nement permet donc d'envisager des essais mécaniques avec instrumentation locale pour la mesure de déformation.

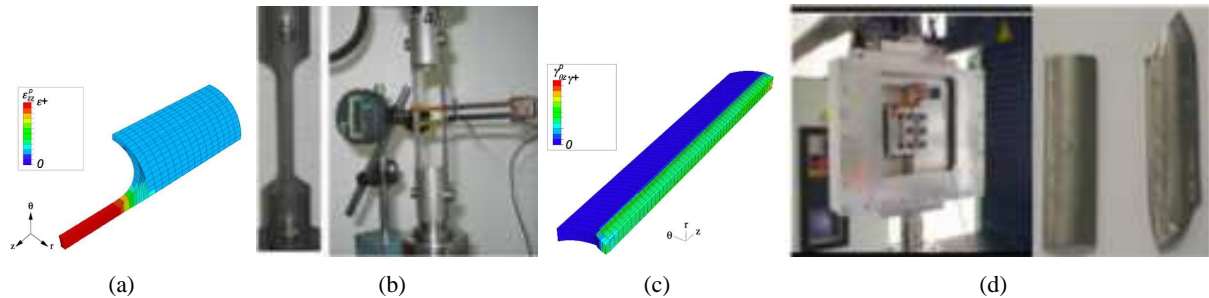


FIG. 1 – Traction et cisaillement sur éprouvettes à forte courbure : (a) Isovaleurs de déformation plastique en traction, (b) Dispositif de traction, (c) Isovaleurs de déformation plastique en cisaillement, (d) Dispositif de cisaillement.

Une campagne d'essais de traction (voir Fig. 2(a)) et de cisaillement (voir Fig. 2(b)) est réalisée en statique. Des essais de traction rapide sur machine hydraulique et de compression rapide par barres d'hopkinson sont également effectués (voir Fig. 2(d)). Les essais de traction monotone ont été menés jusqu'à rupture. Les courbes de traction et de cisaillement des Figures 2(a) et 2(b) mettent en évidence un écrouissage et une viscosité plastiques marqués (voir aussi Fig. 2(d) pour la viscosité). Les essais de cisaillement n'ont pas été menés jusqu'à rupture. Parallèlement les essais de cisaillement avec inversions de charge, représentés figure Fig. 2(c) mettent en évidence un écrouissage cinématique qui semble saturer aux grandes déformations.

### 3 Modèle GTN

Les essais expérimentaux ont montré que le comportement du matériau des tubes se caractérise par un écrouissage plastique isotrope et cinématique et une viscosité significative. Des essais complémentaires pour quantifier plus finement l'écrouissage cinématique sont en cours de réalisation. Dans l'attente des résultats, en première approximation, le comportement plastique du matériau est supposé isotrope. L'effet de l'endommagement plastique ductile sur le comportement du matériau des tubes est pris en compte via le modèle de milieux poreux proposé par Gurson et modifié par Tvergaard et Needleman (GTN). Ce modèle modifie le potentiel de von Mises en introduisant la porosité  $f$  du matériau associée ici à l'endommagement par germination et croissance de cavités.

La fonction seuil du modèle GTN s'écrit :

$$\phi(\underline{\sigma}, R^*, f) = \left( \frac{\sigma_{eq}}{R^*} \right)^2 + 2q_1 f \cosh \left( \frac{q_2 \sigma_{kk}}{2R^*} \right) - 1 - q_1^2 f^2 = 0 ; R^*(p) = R_0 + K p^n \quad (1)$$

Où  $\sigma_{eq}$  représente le second invariant du tenseur des contraintes de Cauchy au sens de von Mises,  $\sigma_{kk}$  la trace du tenseur des contraintes,  $R_0$  la limite élastique,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $K$  et  $n$  sont des coefficients matériau constants. L'écoulement est supposé normal ; le taux de déformation plastique  $\dot{p}$  est obtenu en considérant l'égalité entre la dissipation microscopique de la matrice et la dissipation macroscopique du VER ; l'évolution de la porosité rend compte de la création de nouvelles cavités (Chu et Needleman (1980)) et de la croissance des cavités existantes.

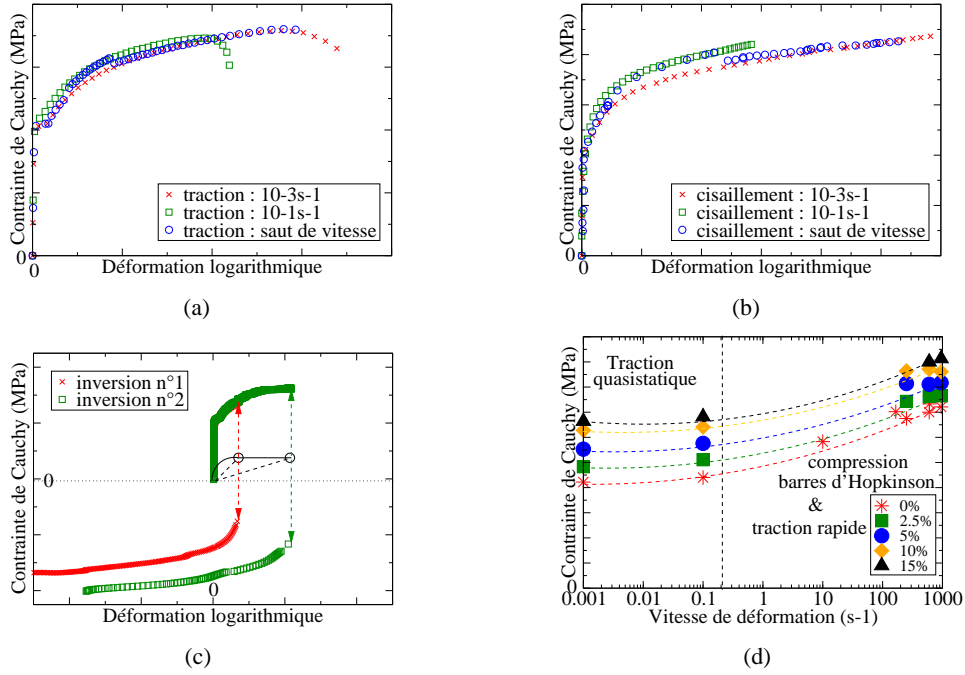


FIG. 2 – Résultats expérimentaux : (a) Traction axiale à  $10^{-3} s^{-1}$  et  $10^{-1} s^{-1}$  et saut de vitesse, (b) Cisaillement à  $10^{-3} s^{-1}$  et  $10^{-1} s^{-1}$  et saut de vitesse, (c) Cisaillement simple avec inversions de charge, (d) Traction axiale statique et dynamique et compression aux barres d'Hopkinson pour différentes valeurs de déformation plastique.

$$\underline{\underline{\mathbf{d}}}^p = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial \underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}}} ; \dot{p} = \frac{\underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}} : \underline{\underline{\mathbf{d}}}^p}{(1-f)R^*} ; \dot{f} = \dot{f}_{croi} + \dot{f}_{ger} \quad (2)$$

$$\dot{f}_{croi} = (1-f)tr \underline{\underline{\mathbf{d}}}^p ; \dot{f}_{ger} = \frac{f_n}{s_n \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{p - \varepsilon_n}{s_n} \right)^2 \right] \cdot \underline{\underline{\mathbf{d}}}^p \quad (3)$$

où  $\varepsilon_n$  représente la valeur moyenne de la distribution,  $s_n$  l'écart type et  $f_n$  la fraction volumique de cavités créés par germination.

#### 4 Application à la simulation numérique de l'essai d'éclatement

Le but du burst test est de déterminer les conditions de rupture des générateurs de gaz pour airbag. Dans le cas présent, seule la chambre de combustion est étudiée de manière à diminuer le nombre de composants et simplifier par la suite la simulation numérique. L'assemblage de la chambre se réalise par sertissage du support allumeur et du bouchon. La figure 3(a) présente le détail du montage de la chambre de combustion. Les informations disponibles concernent la pression de rupture et le temps de rupture. Le travail actuel porte également sur l'instrumentation de l'essai en mesures locales (résultats non présentés ici). La figure 3(b) montre des résultats expérimentaux dans le plan pression-temps. On constate une bonne reproductibilité des essais en terme de pression d'éclatement ( $P_{burst}$ ). Il est à noter également que le mode de rupture des générateurs est identique sur les 5 essais, c'est-à-dire une déchirure ventrale du tube associée à une propagation en Mode I sous l'effet des contraintes tangentielles.

L'objectif de la simulation numérique du burst test est de prédire les zones endommagées sur le tube et la tenue mécanique du sertissage comme mentionné précédemment dans l'introduction. Cette simulation 3D se décompose en deux parties : l'assemblage du support allumeur

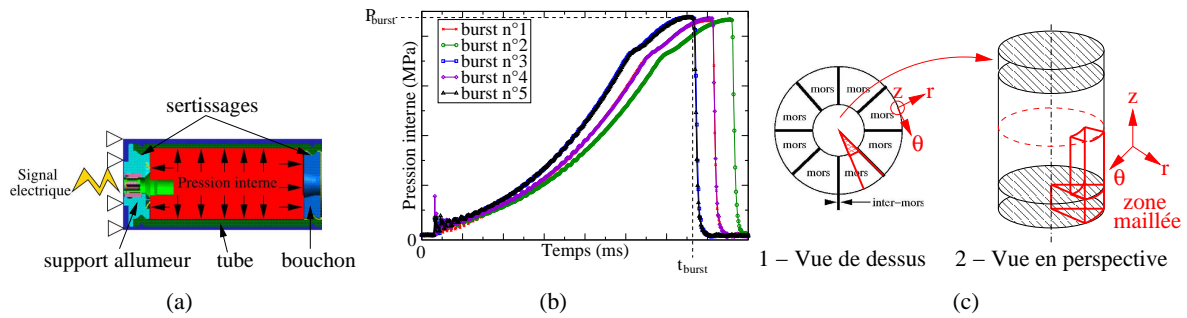


FIG. 3 – Essais d'éclatement : (a) Représentation de la chambre de combustion, (b) Résultats des premiers essais burst, (c) Géométrie du GG : 1- Vue de dessus avec représentation des mors de sertissage, 2- Vue en perspective du GG (mors enlevés).

par sertissage et la mise sous pression dynamique de la chambre assemblée (tube avec support allumeur serti). Le sertissage est simulé avec un schéma d'intégration temporelle implicite et la mise sous pression dynamique avec un schéma explicite. La discrétisation spatiale exploite les symétries de révolution et axiale du GG par le biais des conditions limites adéquates (voir figure 3(c)). Pour les deux simulations, les éléments utilisés sont des hexaèdres à 8 noeuds avec intégration réduite (C3D8R) nécessaire pour effectuer la transition entre les schémas implicite et explicite dans le code industriel ABAQUS.

La figure 4(a) montre la fraction volumique de vides  $f$  générée dans le tube à la fin de la simulation du burst test. On remarque que le tube est fortement endommagé. On remarque également que le sertissage se détériore au niveau des surfaces de contact du tube et du support allumeur, néanmoins il n'y a pas d'éjection du support allumeur. La figure 4(b) montre l'évolution de la valeur du 2<sup>nd</sup> invariant du tenseur des contraintes au sens de von Mises en fonction de la pression interne sur 4 éléments du tube. La contrainte passe par un maximum qui correspond à une pression critique à partir de laquelle on s'attend à une macro rupture. La figure 4(c) confirme l'endommagement prononcé sur les éléments 1 et 2 avec un emballement de la déformation plastique cumulée. On peut donc en déduire une pression critique :  $P_c$  légèrement inférieure à la pression burst :  $P_{burst}$ . Lorsque l'on compare cette pression critique à la valeur moyenne de la pression burst mesurée expérimentalement sur les 5 premiers essais, l'écart obtenu est de 3%.

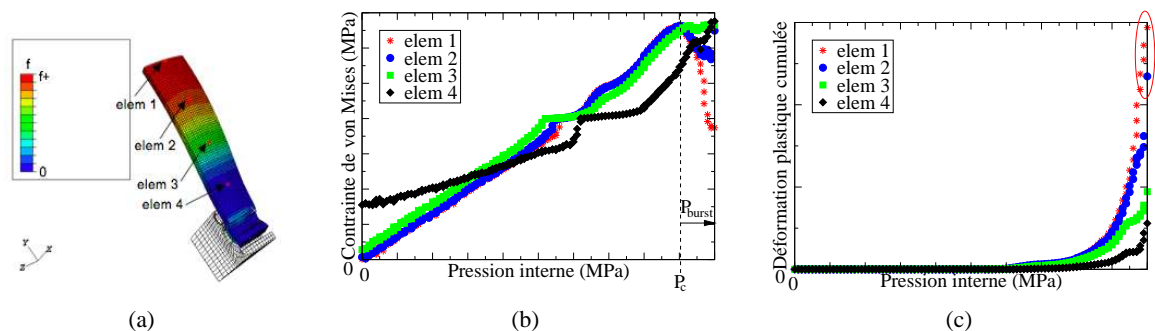


FIG. 4 – Simulation numérique de l'essai d'éclatement : (a) Isovaleurs de fraction volumique de vides dans le tube, (a) Contrainte équivalente de von Mises sur 4 éléments, (c) Déformation plastique cumulée sur 4 éléments

## 5 Conclusion

Cette étude concerne la compréhension et la prédiction numérique du comportement d'un générateur de gaz pour airbag en intégrant la phase de mise en forme. Le travail présenté constitue une première approche. La caractérisation du matériau constituant le tube est rendue difficile par sa géométrie, néanmoins certaines difficultés ont été résolues de manière à obtenir des résultats expérimentaux exploitables en traction monotone et en cisaillement simple. Ces essais ont montré la présence d'un écrouissage plastique ainsi qu'une viscosité marquée et un écrouissage cinématique saturant aux grandes déformations. Une première modélisation du comportement est adoptée avec comme caractéristique un écrouissage plastique isotrope non visqueux. La prise en compte de l'endommagement plastique ductile s'effectue avec le modèle des milieux poreux GTN. Cette modélisation a été appliquée à la simulation numérique du burst. La simulation du burst montre une zone fortement endommagée qui tend à évoluer dans le sens de l'étirement du tube ce qui confirme le mode de rupture observé expérimentalement par déchirure du tube dans le sens longitudinal (Mode I). Ces premiers résultats sont encourageants en ce qui concerne la localisation des zones endommagées. Il reste maintenant à compléter la modélisation du comportement par la prise en compte de la viscosité pour les aspects dynamiques et de l'écrouissage cinématique. L'étape finale est de décrire la rupture du générateur de gaz lors du burst test.

## Références

- Becker, R., Needleman, A. 1986 Effect of yield surface curvature on necking and failure in porous plastic solids. *J. Appl. Mech.* **53** 491-499
- Becker, R., Needleman, A., Richmond, A., Tvergaard, V. 1988 Void growth and failure in notched bars. *J. Mech. Phys. Solids* **36** 317-351
- Chu, C., Needleman, A. 1980 Void nucleation effects in biaxially stretched sheets. *J. Engng. Mater. Technol.* **102** 249-256
- Gurson, A. 1977 Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Part I - Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *J. Engng. Mater. Technol.*, **99** 2-15
- Jiao, H., Zhao, X.L. 2001 Material ductility of very high strength (VHS) circular steel tubes in tension. *Thin walled structures.* **39** 887-906
- Leblond, J., Perrin, G., Devaux, J., Bifurcation effects in ductile metals with nonlocal damage. *J. Appl. Mech.* **61** 236-242
- Manach, P.Y., Couty N. 2001 Elastoviscohysteresis constitutive law in convected coordinate frames : application to finite deformation shear tests. *Comp. Mech.* **38** 17-25
- Shirgoakar, M., Cho, H., Ngaile, G., Altan, T., Yu, J.H., Balconi, J., Rentfrow, R., Worrel, W.J. 2004 Optimization of mechanical crimping to assemble tubular components. *Journal of Materials Processing Technology.* **146** 35-43
- Sun, Q., Li, Z. 2002 Phase transformation in superelastic NiTi polycrystalline micro-tubes under tension and torsion from localization to homogeneous deformation. *International Journal of Solids and Structures.* **39** 3797-380
- Tvergaard, V., Needleman, A. 1984 Analysis of cup-cone fracture in round tensile bar. *Acta. Metall.* **32** 157-169
- Tvergaard, V. 1990 Material failure by void growth to coalescence. *Adv. Appl. Mech.* **27** 83-151
- Xia, L., Shih, C., Hutchinson, J. 1995 A computational approach to ductile crack growth under large scale yielding conditions. *J. Mech. Phys. Solids* **43** 389-413
- Zhao, X.L. 2000 Section capacity of very high strength (VHS) circular tubes under compression. *Thin-Walled Structures.* **37** 223-240