



HAL
open science

Modélisation et simulation de l'hydroformage de liners métalliques pour le stockage d'hydrogène sous haute pression

Jean-Claude Gelin, Carl Labergere, Nathalie Boudeau, Sébastien Thibaud

► To cite this version:

Jean-Claude Gelin, Carl Labergere, Nathalie Boudeau, Sébastien Thibaud. Modélisation et simulation de l'hydroformage de liners métalliques pour le stockage d'hydrogène sous haute pression. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812949

HAL Id: hal-01812949

<https://hal.science/hal-01812949>

Submitted on 12 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

Modélisation et simulation de l'hydroformage de liners métalliques pour le stockage d'hydrogène sous haute pression

J.C. Gelin, C. Labergère, N. Boudeau, S. Thibaud

*Institut FEMTO-ST, Département Laboratoire de Mécanique Appliquée (LMARC)
ENSMM et CNRS
24 Rue de l'Épitaphe
25030 BESANCON France*

RÉSUMÉ: Dans le cadre d'un projet européen concernant le stockage d'hydrogène, le LMARC conduit une étude sur la réalisation de réservoirs haute pression (700bars) pour le stockage d'hydrogène, destinés à être embarqués à bord de véhicules automobiles. Ces réservoirs sont constitués d'un liner métallique, qui assure un rôle barrière par rapport aux atomes d'hydrogène ainsi qu'une partie de la résistance mécanique, et d'une enveloppe composite réalisée par enroulement filamentaire qui assure la partie complémentaire de la résistance mécanique.

Actuellement, les liners métalliques sont réalisés, soit à partir de tôles roulées et soudées, soit à partir de flans emboutis puis repoussés pour obtenir le fond de réservoir. Les soudures sont des lieux privilégiés de micro fuites, tandis que l'emboutissage (avec des rapports d'emboutissage importants) engendre des diminutions de section importantes. Il en résulte que la sécurité n'est pas assurée.

Une étude a donc été conduite pour la réalisation de liners par hydroformage avec comme objectif privilégié, un parfait contrôle des distributions d'épaisseurs, devant rester les plus constantes possible. La communication décrit donc les travaux réalisés dans ce cadre, partant de la simulation du procédé d'hydroformage grâce à une formulation en coques spatiales en non-linéaire matériel et géométrique, jusqu'au contrôle complet du procédé d'hydroformage, en volume ou en pression, pour obtenir des épaisseurs aussi constantes que possible.

MOTS-CLÉS : Liner, hydroformage, éléments finis, optimisation, contrôle de procédés.

KEYWORDS: Liner, hydroforming, finite elements, optimisation, processes control

1. Introduction

Actuellement utilisée dans l'industrie, l'hydrogène sous forme gazeuse utilisé comme combustible de substitution par rapport aux hydrocarbures, présente beaucoup d'avantages, en particulier associé au fait qu'il est moins polluant et se trouve en abondance. En particulier la combustion du mélange hydrogène – oxygène produit uniquement de l'eau, ce qui rend ce combustible propre. Cela implique par contre de stocker l'hydrogène sous forme gazeuse dans des réservoirs, destinés en particulier à être embarqués sur des véhicules, par exemple des véhicules automobiles. L'objectif associé au stockage d'hydrogène sous forme gazeuse est de satisfaire au mieux les contraintes associées et en particulier de réussir à fabriquer des réservoirs sûrs et fiables (CEA, 2001).

Dans cet objectif, et en considérant l'ensemble des contraintes associées, il apparaît nécessaire de réaliser des réservoirs résistants et sûrs pour des pressions pouvant atteindre 700 bars. Ces réservoirs consistent en un liner métallique, jouant le rôle de barrière vis-à-vis de la perméation de l'hydrogène et assurant une partie de la résistance mécanique, et une enveloppe composite réalisée par enroulement filamentaire, qui assure la partie complémentaire de la résistance. Une étude a donc été développée pour la réalisation de ce liner par hydroformage de tube (Manabe et al., 2002), avec l'objectif de réaliser un liner avec une épaisseur la plus constante qui soit. La communication décrit les modélisations, simulations, optimisations réalisées dans ce cadre, avec comme objectif celui indiqué. Le problème considéré est un problème de grandes déformations de coques spatiales, avec comportement élastoplastique non linéaire et contact avec frottement. Il est complété par la problématique associée au procédé de l'hydroformage, qui consiste à contrôler pression et effort axial, pour obtenir cette répartition d'épaisseur aussi constante que possible.

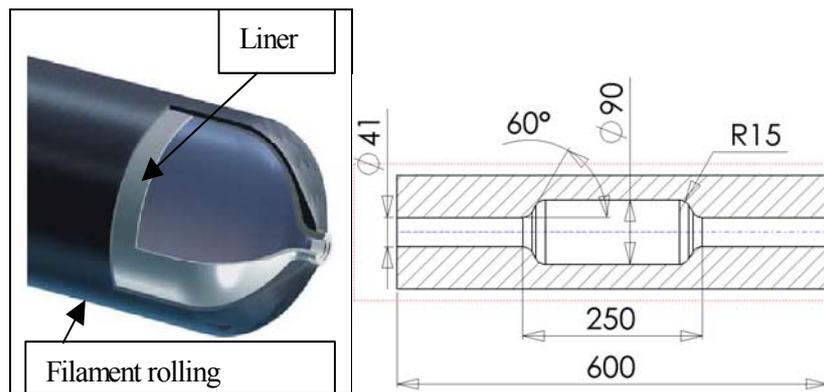


Fig. 1 Vue schématique d'un liner utilisé pour le stockage d'hydrogène et dimensions de la cavité utilisée pour l'hydroformage du liner

2. Modélisation et simulation numérique de l'hydroformage de liners

2.1 Optimisation du procédé d'hydroformage de liners

L'optimisation de l'hydroformage de tube nécessite l'utilisation d'une méthode d'optimisation couplée à un logiciel de simulation par éléments finis (Gelin et al, 2004). Le logiciel éléments finis utilisé est le logiciel Hydroform[®] développé au LMARC, spécialement adapté pour la simulation de l'hydroformage de flans et de tubes. Un modèle d'optimisation a été développé en parallèle, OptMEF[®], basé sur le logiciel de simulation Hydroform. Ce modèle d'optimisation inclut la librairie MPI afin de pouvoir lancer en parallèle plusieurs simulations sur un cluster LINUX. L'objectif de la procédure d'optimisation consiste à rechercher la courbe optimale de pression en fonction du paramètre de chargement, de façon à satisfaire un critère de qualité. Dans le cas présent, le critère de qualité développé est basé sur la variation d'épaisseur du tube, sous la forme :

$$F_{\text{obj}}(p) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i(p) - h_0}{h_0} \right)^2} \quad (1)$$

où h_i est l'épaisseur au nœud i , tandis que h_0 est l'épaisseur initiale. Plusieurs techniques d'optimisation peuvent être utilisées, mais on a choisi d'utiliser la méthode de programmation séquentielle quadratique (SQP), associée à une méthode de différences finies, pour évaluer le gradient de la fonction objectif. La stratégie adoptée dans le cas présent consiste à construire une approximation de la réponse du procédé, ainsi que de la variation de pression en fonction du paramètre de chargement. Pour cela, une approximation linéaire par morceaux a été choisie, sous la forme :

$$p(t) = \frac{p_{i+1} - p_i}{t_{i+1} - t_i} t + \frac{p_i t_{i+1} - p_{i+1} t_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (2)$$

Considérant la relation (2), on obtient le diagramme d'optimisation représenté sur la figure 2.

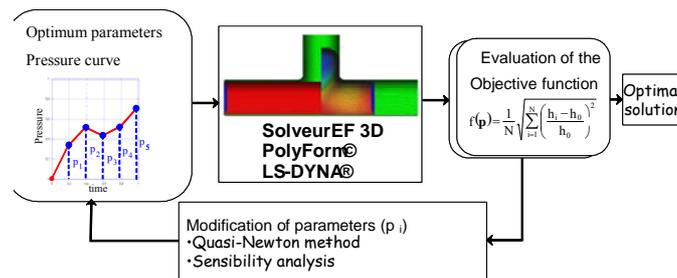


Fig. 2. Représentation linéaire par morceaux de la courbe de chargement en pression.

2.2 Contrôle paramétrique du procédé basé sur le volume du fluide injecté

En complément de la procédure d'optimisation considérée ci-dessous, on a étudié une méthode de contrôle de procédé basée sur le volume de fluide injecté dans le tube. Dans ce cas, on propose de relier la pression au volume de fluide injecté, en

utilisant une fonction de type fonction Airbag implémentée dans LS-DYNA[®], basée en particulier sur le module de compressibilité K du fluide, sous la forme :

$$P(t) = K \ln\left(\frac{V_0(t)}{V(t)}\right) + L(t) \quad (3)$$

où P(t) est la pression, V est le volume au fluide dans l'état comprimé, V₀ étant le volume dans l'état non comprimé, L(t) est une pression de compensation fonction du temps caractéristique du procédé t. Le volume du fluide est calculé à partir de la masse du fluide injectée sous la forme :

$$V(t) = \frac{M(t)}{\rho} \quad (4)$$

où M(t) est la masse du fluide, tandis que ρ est la densité

$$M(t) = M(0) + \int_0^t F(u) du \quad (5)$$

A partir de la relation (5), il est possible de déterminer la masse de fluide à injecter, associée à la variation de volume, en posant F(u)=p.a.u , il vient :

$$\Delta M = \rho \Delta V = \rho \int_0^t a u du \Rightarrow a = \frac{2\Delta V}{t_f^2} = \frac{2(V_f - V_i)}{t_f^2} \quad (6)$$

où t_f est le temps de cycle du procédé. Le volume est défini par le logiciel comme étant le volume intérieur du tube, dans lequel la pression est appliquée.

3. Résultats

Les liners que l'on cherche à réaliser sont de géométrie donnée en figure 1. Le tube initial a un diamètre externe de 40mm et une épaisseur de 5mm. Le matériau considéré est un acier inoxydable austénitique de type SS304, dont la loi d'écoulement est donnée sous la forme $\sigma_y = K \varepsilon^{-n}$

Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Coefficient de résistance K (MPa)	Exposant d'écoulement n
196000	0.3	1250	0.4

Tableau 1 : Coefficients matériels utilisés pour les simulations

La discrétisation du chargement, utilisée pour l'optimisation, consiste en 4 intervalles égaux, correspondant respectivement à des valeurs en paramètre de chargement normé de 0.25 ;0.50 ;0.75 ;1. Le problème d'optimisation consiste donc à déterminer les valeurs de pression telles que la fonction objectif (1) soit minimale. La méthode SQP est utilisée dans le cas présent, du fait de la facilité qu'elle offre pour prendre en compte les contraintes non linéaires. Le module d'optimisation développé au LMARC utilise les ressources de type processeurs PC en parallèle.

L'évolution du volume au fluide injecté dans le tube est représentée figure 3. La figure 4 relate une comparaison entre la courbe de pression obtenue par la méthode de contrôle en pression et par la méthode de contrôle du volume.

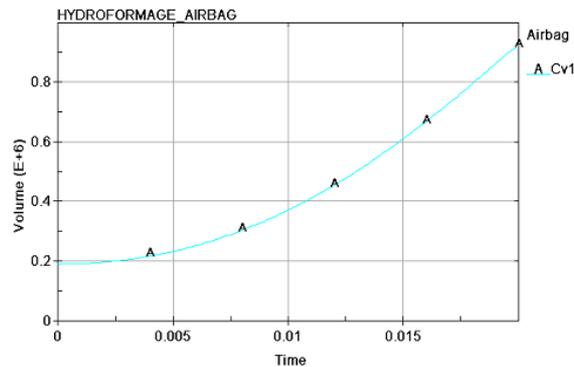


Fig. 3. Evolution du volume de fluide injecté dans la cavité

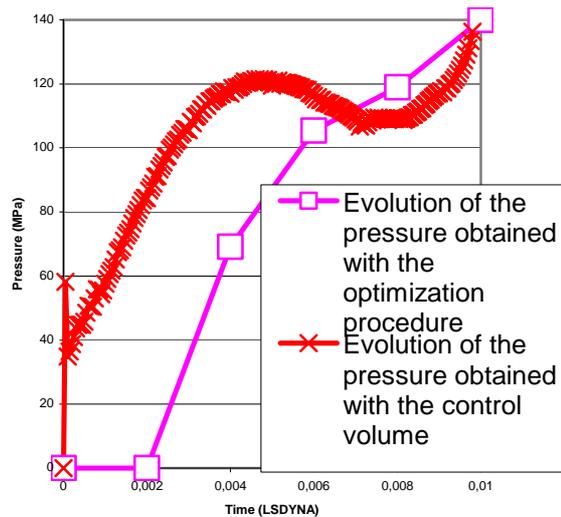


Fig.4. Comparaison entre procédure de contrôle en pression et de contrôle de volume du fluide.

Il est à noter que le volume du fluide injecté dans la cavité suit une courbe monotone croissante, conduisant à une pression également monotone croissante. Dans le cas de l'optimisation standard, sans référence au volume de fluide injecté, la courbe de pression est différente, cette différence est due au fait que la croissance de la pression cavité conduit à dépasser rapidement la limite d'élasticité au tube. Les distributions d'épaisseurs correspondant respectivement au contrôle en pression et au contrôle sont respectivement données sur les figures 5a et 5b. Il est intéressant de

constater que la stratégie de contrôle en volume conduit à des variations d'épaisseurs plus limitées que le contrôle en pression. La vérification de l'absence de plissement et éclatement a par ailleurs été réalisée à partir de développements de l'équipe (Lejeune et al, 2003).

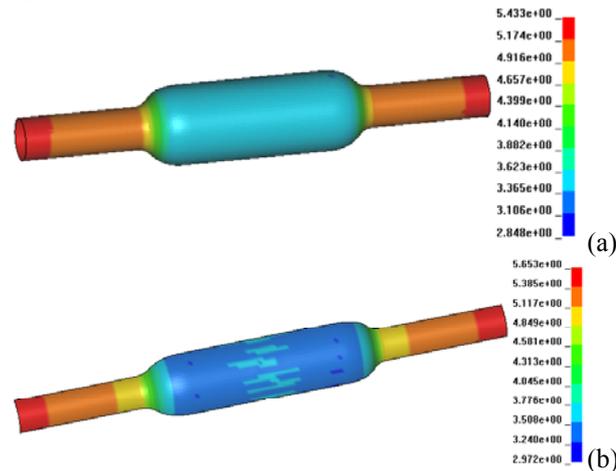


Fig. 1. Distribution d' épaisseurs obtenues respectivement par contrôle en pression (a) et contrôle en volume (b)

4. Conclusions

Les résultats obtenus par simulation, optimisation et contrôle du procédé d'hydroformage de liners, indiquent clairement qu'il est possible de tendre vers des liners d'épaisseur relativement constante après hydroformage. Il apparaît que la méthode d'optimisation et de contrôle, basée sur une discrétisation du chargement en pression, conduit à une croissance rapide de celle-ci, puis à une stabilisation avant contact avec les outillages. La méthode consistant à contrôler le volume de fluide injecté dans la cavité conduit à une croissance continue de la pression, pour au final donner une variation d'épaisseur plus contenue. Les deux stratégies sont en cours de validation sur l'installation expérimentale développée au laboratoire.

Références

- CEA, Nouvelles technologies pour l'énergie, CLEFS CEA n°44, (2001)
- K.I. Manabe, M. Amino, Effects of process parameters and material properties on deformation process in tube hydroforming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol 123, (2002), 285-291.
- J.C. Gelin, C. Labergere, Application of optimal design and control strategies to the forming of thin walled metallic tubes, *Int. J. Forming Processes*, Vol.7 n°1-2, (2004), 141-158.
- LS-DYNA, keyword user's manual, PDF file, version 970, (2003).
- A. Lejeune, N. Boudeau, J.C. Gelin, Influence of material and process parameters on bursting during hydroforming processes, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol 143-144, (2003), 11-17.