

ETUDE D'HYDROFORMAGE DES TÔLES

M. Nassraoui¹, B. Radi², Z. Elmaskaoui³

1. LIMII FST Settât, nassraoui@yahoo.fr

2. LIMII FST Settât, bouchaib.radi@yahoo.fr

3. ENSEM Casablanca, elmaskaoui@gmail.com

Résumé :

L'hydroformage est un procédé récent qui présente plusieurs avantages innovateurs par rapport aux méthodes de formage conventionnelles. Cette technique est très efficace pour réaliser des pièces de forme complexe en une seule opération. Il est largement utilisé dans les industries automobile et aéronautique. La mise en forme par ce processus implique plusieurs phénomènes complexes et présente plusieurs types de non-linéarités (géométrique, matériel, etc.). Le développement d'une opération d'hydroformage nécessite beaucoup de tests pour déterminer avec précision les charges optimales de réalisation et d'obtenir une pièce sans défauts. L'objectif de ce travail est d'étudier ce procédé analytiquement et pratiquement et comparer les résultats.

Mots clés : *Hydroformage ; charge optimale*

1 Introduction

L'hydroformage est un procédé de fabrication par déformation. Il consiste à déformer plastiquement des tôles ou des tubes dans une matrice en utilisant une pression hydraulique contrôlée afin de fabriquer des pièces métalliques de forme complexe. La principale caractéristique de ce procédé est que le poinçon est remplacé par l'action directe de la pression du liquide (eau, huile hydraulique, émulsion). Le cycle typique comprend l'insertion de la pièce métallique à l'intérieur d'une estampe ou d'un moule, la fermeture du moule et l'application de la pression du liquide à l'intérieur du tube ou d'un seul côté de la tôle. En raison de sa forte pression, le liquide pousse la pièce contre la paroi du moule, la forçant ainsi à prendre la forme désirée. Des trous peuvent aussi être percés dans la pièce hydroformée à la fin du cycle pendant qu'elle est encore sous pression. La principale caractéristique de ce procédé est que le poinçon est remplacé par l'action directe de la pression du fluide (eau, huile hydraulique, émulsion)(voir figure 1).

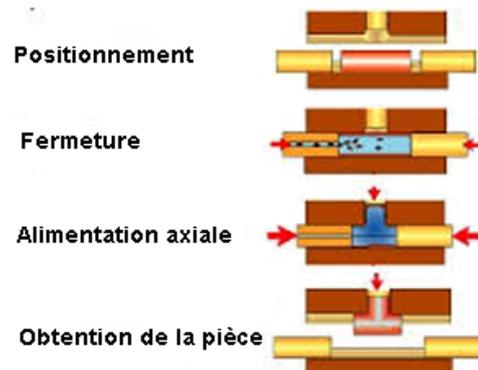


Figure 1 : Cycle de formage

2 Modélisation d'hydroformage des tôles

L'étude du comportement des tôles est le plus souvent abordée dans le cadre d'une approche élastoplastique pour la plupart des procédés de mise en forme de tôles. La théorie élasto-plastique comporte elle-même deux approches différentes décrivant chacune d'elle une échelle physique du comportement : la première est appelée approche phénoménologique et la deuxième est appelée approche microscopique. Les deux approches visent à décrire l'évolution de l'état de contrainte et de déformation lors d'une succession de déformations. Jusqu'ici on s'est intéressé uniquement à la forme des surfaces de charge au travers des critères de plasticité. Toutefois, tout au long du chargement, ces surfaces changent de taille : c'est l'écrouissage plastique. Lorsque la forme de la surface est gardée inchangée et que seule sa taille évolue, l'écrouissage est dit isotrope et est décrit par une courbe d'écrouissage. L'essai de traction suivant la direction de laminage est souvent choisi comme essai de référence pour établir la courbe d'écrouissage reliant l'évolution de la limite élastique à la variable interne d'écrouissage la déformation équivalente plastique. On approche ces courbes par des fonctions analytiques qui peuvent prendre plusieurs formes. On considère la loi de Swift :

$$\sigma = k(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (1)$$

2.1 Solution analytique

L'essai de gonflage hydraulique circulaire est un essai de caractérisation dont l'exploitation peut être double :

d'une part il offre la possibilité d'identifier une courbe d'érouissage qui couvre une grande plage de déformations, et d'autre part, il peut servir à déterminer le point limite en déformation équi-biaxiale. Il est bien établi que l'essai de traction, classiquement utilisé dans la caractérisation des tôles, est limité par l'apparition de la striction diffuse qui se manifeste pour une déformation effective de l'ordre du coefficient d'érouissage. Cependant, en gonflage, la striction apparaît plus « tardivement » et la phase de déformation homogène est alors prolongée. C'est au vu de ces propriétés que notre intérêt s'est porté sur l'utilisation de l'essai de gonflage pour l'identification des courbes d'érouissage en grandes déformations. L'étude de cet essai a fait l'objet de plusieurs travaux dans la littérature [1, 2], et son domaine d'exploitation n'est pas restreint à l'unique usage en mise en forme des tôles mais il est étendu à d'autres applications telles que la caractérisation de films minces en polymères [3], ou de films minces métalliques [4, 5]. Ces dernières années, l'essai de gonflage a connu un important regain d'intérêt [6, 7], qui peut être attribué à l'élargissement et à l'industrialisation du procédé d'hydroformage, procédé qui s'apparente beaucoup aux essais de gonflage hydraulique (figures 2 et 3).

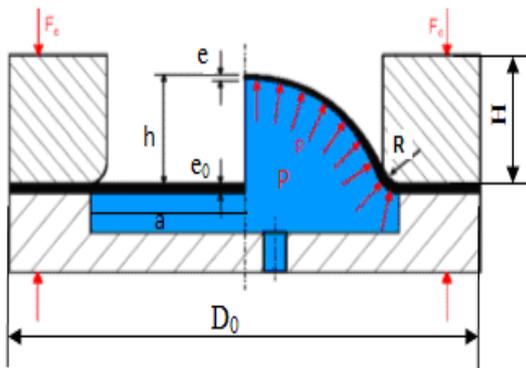


Figure 2 : Essai de gonflage circulaire

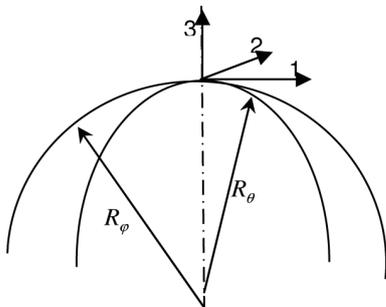


Figure 3 : Géométrie de la déformée [8].

On se propose dans ce qui suit d'analyser l'essai de gonflage circulaire tout en adoptant le critère de plasticité anisotrope de Hill48 pour la description du comportement

des tôles. Pour une loi d'écoulement associée, la déformation équivalente s'écrit : Critère de Hill48 en contraintes planes : avant d'aborder le dépouillement de l'essai, on explicite d'abord une expression du critère de Hill (1948) sous l'hypothèse des contraintes planes et en supposant le repère principal des contraintes coïncidant avec le repère d'orthotropie [8].

L'équation d'équilibre, ou équation de Pascal, est définie par :

$$\frac{\sigma_1}{R_\theta} + \frac{\sigma_2}{R_\phi} = \frac{P}{e} \quad (2)$$

où σ_1, σ_2 sont les contraintes principales (confondues avec les axes du matériau), R_θ et R_ϕ sont les rayons de courbure respectivement suivant les deux directions principales, P la pression de gonflage et e l'épaisseur courante au pôle de la tôle. En introduisant le rapport des contraintes Ω et en supposant que $R_\theta = R_\phi = \rho$, l'équation d'équilibre se réduit à :

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot \rho}{((1 + \Omega) \cdot e)} \quad (3)$$

L'équation finale reliant la pression de gonflage à la hauteur du dôme est déduite à partir des équations et tenant compte de l'expression de la contrainte équivalente :

$$P = 2\sqrt{2(1 + \bar{r})} K \frac{e_0 h}{a^2} \frac{1}{((1 + \frac{h^2}{a^2}))^3} \left(\sqrt{2(1 + \bar{r})} \ln(1 + \frac{h^2}{a^2}) \right)^n \quad (4)$$

2.2 Solution expérimentale

La photo suivante (figure 4) montre le montage de l'essai d'hydroformage :



Figure 4 : Montage de l'essai

Le tableau (1) représente les caractéristiques et les dimensions de la pièce P5 (figure 5).



Figure 5 : pièce P5

Φ (D)	Epaisseur (e)	Matière	Φ de la matrice (D2)
204,3 mm	2 mm	E24	120 mm

Tableau 1 : Caractéristiques de la pièce

Après réalisation de l'essai nous avons obtenu les résultats suivants :

- Pression maxi = 20,61 bars ;
- Déplacement maxi = 10,9 mm ;

La courbe suivante montre la variation de la hauteur du pôle en fonction de la pression (figure 6).

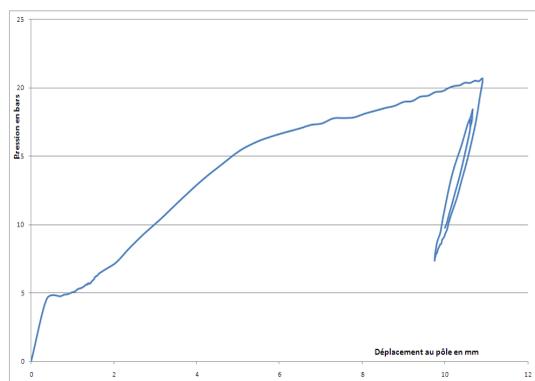


Figure 6 : Courbe de l'essai

3 Résultats et discussions

Le tableau 2 nous donne les résultats des essais.

Pression (MPa)	Dép.théorique (mm)	Dép.expérimental (mm)
2,061	10.8	10.9

Tableau 2 : Résultats du déplacement au pôle.

On observe que le déplacement analytique est plus proche au déplacement expérimental sans tenant compte du frottement dû au contact entre la matrice et la tôle. Une simulation numérique est nécessaire pour voir l'influence de ce critère.

Références

- [1] R. Hill, *A theory of the plastic bulging of a metal diaphragm by lateral pressure*, Phil. Mag 7 (1950) 1133-1142.
- [2] R. Hill, *Plasticity and creep of pressurized membranes : a new look at the small-deflection theory*, J. Mech. Phys. Solids 28 (1980) 27-48.
- [3] T. Zheng-Xue, and Y. Lin, *Characterization of mechanical properties of thin polymer films using a biaxial tension based on blow-up test*, Plastics, Rubber and composites 32 (2003) 459.
- [4] Y. Li, and M.J. Cima, , *Bulge test on free standing gold thin films*, MRS Fall Meeting Dec (2003) 437-442.
- [5] V. Paviot, and J. MandVlassak, and W.D. JandNix, *Measuring the mechanical properties of thin metal films by means of bulge testing of micromachined windows*, Stresses and Mechanical Properties V (1994) 579-584.
- [6] D.W.A. Rees, *Instability theory for ellipsoidal bulging of rolled sheet*, Journal of Materials Processing Technology 40 (1994) 173-194.
- [7] D. Banabic, and D. Balan, and S. Comsa, *Closed-form solution for bulging through elliptical dies*, Mat.Proc.Tech 115 (2001) 83-86 .
- [8] M. Ben tahar, *Contribution à l'étude et la simulation du procédé d'hydroformage*, Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Paris, 2005.