

# Caractérisation expérimentale de l'hydroformage

## Experimental characterization of hydroforming

Nassraoui Mohammed<sup>1</sup>, Elmaskaoui Zakaria<sup>2</sup>, Radi Bouchaib<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Mécanique, Productique et Génie Industriel, EST, Université Hassan II, Maroc, nassraoui@yahoo.fr

<sup>2</sup> Materials and Structural Mechanics Team, ENSEM, Université Hassan II, Maroc, elmaskaoui@gmail.com

<sup>3</sup> Ingénierie Mécanique, Management Industriel et Innovation, FST, Université Hassan I, Maroc, bouchaib.radi@yahoo.fr

**RÉSUMÉ.** La mise en forme par le processus d'hydroformage 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. Lors de l'essai de l'hydroformage de la tôle on est limité par la courbe de la déformée au centre de la pièce vu le montage de réalisation. Ce travail consiste à réaliser des essais expérimentaux d'hydroformage des tôles afin de déterminer la charge à appliquer avec l'épaisseur choisie.

**ABSTRACT.** The shaping by the hydroforming process involves several complex phenomena and presents several types of non-linearities (geometric, material, etc.). The development of a hydroforming operation requires a lot of tests to accurately determine the optimal production loads and to obtain a part without defects. When testing the hydroforming of the sheet is limited by the curve of the deformation in the center of the piece in view of the mounting of realization. This work consists in carrying out experimental hydroforming tests of the sheets in order to determine the load to be applied with the chosen thickness.

**MOTS-CLÉS.** Hydroformage, loi élastoplastique, anisotropie, mise en forme.

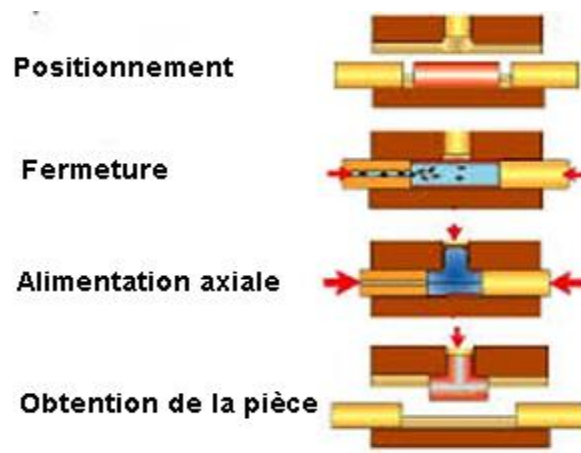
**KEYWORDS.** Hydroforming, elastoplastic, anisotropic, shaping process.

## 1. Introduction

Le procédé d'hydroformage qu'on trouve principalement dans les industries de pointe notamment en automobile et en aéronautique. Le recours à ce procédé est justifié par l'ensemble des avantages qu'il présente par rapport aux procédés classiques tels que l'emboutissage, le pliage ou le soudage. En effet, le procédé ouvre un domaine de formabilité plus large en comparaison avec les procédés conventionnels de mise en forme. Il présente un champ de contraintes résiduelles moins important et gère mieux les problèmes de contact et de frottement grâce à l'utilisation de la pression exercée par le fluide. Ce dernier, permet aussi d'assurer une meilleure précision dimensionnelle et par conséquent moins de retour élastique et moins de problème dans la phase d'assemblage. Plusieurs travaux se sont intéressés à la modélisation et l'optimisation du procédé dans ce secteur [Asn03, Lee06, OhI06, Yua06]. Ce travail a pour objectif d'étudier ce procédé expérimentalement en variant plusieurs épaisseurs de tôle avec différents diamètres de matrice.

## 2. Principe d'hydroformage

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. 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) [Hei99]. 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 (figure 1).



**Figure 1.** Cycle d'hydroformage

### 3. Matériaux utilisés

Les matériaux employés pour ce procédé sont très divers mais ont en commun une caractéristique essentielle : leur domaine élastique est le plus petit possible, évitant ainsi un trop grand retour élastique lorsque la pression est relâchée. Malgré tout, le retour élastique lorsque la pression est relâchée est inévitable. C'est pourquoi on procède généralement à une simulation numérique par éléments finis permettant de déterminer le surdimensionnement nécessaire de l'empreinte de la matrice pour obtenir les dimensions voulues sur la pièce finale. Les pièces hydroformées sont principalement en alliages d'aluminium et en alliages d'acier spécialement développés pour ce procédé. On peut aussi utiliser des alliages exotiques pour des pièces très particulières.

### 4. Influence de la structure des tôles

Les tôles minces sont des agrégats polycristallins. Leur mise en forme, de même que l'ensemble de leurs caractéristiques, dépend pour une grande part de ces agrégats [Kah10] :

- Influence de la taille des grains : la taille des grains est l'un des paramètres les plus importants. En effet elle agit sur la limite d'élasticité et la résistance à la traction qui sont des critères (conventionnels) de l'emboutissable. Il faut ajouter que, dans le cas d'acier extra doux, il est possible de relier le coefficient d'érouissage à la taille des grains comme suit et de rappeler que si  $d$  (taille moyenne des grains) augmente, un changement de structure se produit entraînant une augmentation de  $r$ .

- Influence de la structure cristallographique : comme il a été précisé précédemment, l'orientation cristallographique est un paramètre non négligeable. Il intervient non seulement au niveau du coefficient d'érouissage mais également sur les caractéristiques  $R_e$  et  $R_m$ . L'érouissage de la tôle survenant lors d'un recuit ou d'un laminage, est responsable de l'orientation cristallographique des grains et donc des directions préférentielles de traction ou autres essais similaires.

- Le retour élastique : lorsque le poinçon se retire après la phase de mise en forme, la pièce ainsi formée n'est plus soumise à la force de maintien. Il se produit alors un retrait de la matière dû à la déformation élastique du flan primitif et résultant de contraintes résiduelles après formage.

- Autres éléments influents : la présence d'éléments d'alliage en solution solide augmente la limite d'élasticité, la résistance à la traction et diminue l'allongement  $A$ . Ces éléments peuvent avoir une influence indirecte significative en modifiant les conditions de la recristallisation et de la croissance des grains, dans la texture, au cours du recuit. De même, les particules de seconde phase ont une grande importance dans l'aptitude d'une tôle à être emboutie [Aga08].

## 4.1. Loi de comportement

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 élastoplastique comporte elle-même deux approches différentes décrivant chacune d'elle une échelle physique du comportement [Ben11].

L'essai de traction suivant la direction de laminage est souvent choisi comme essai de référence pour établir la courbe d'érouissage reliant l'évolution de la limite élastique à la variable interne d'érouissage. On approche ces courbes par des fonctions analytiques qui peuvent prendre plusieurs formes. On considère la loi de Swift :

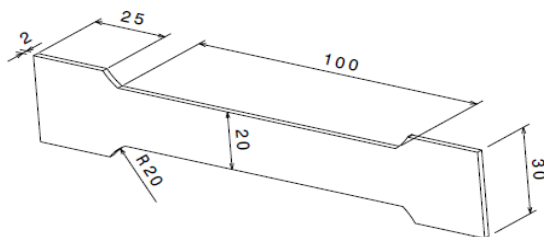
$$\sigma = k(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad [1]$$

## 5. Essais expérimentaux

### 5.1. Essai de traction

Pour une meilleure étude du procédé d'hydroformage ; nous avons commencé par un essai de traction sur le matériau étudié (acier doux E24 commercial) réalisé dans le laboratoire des essais de matériaux de la FST de Settat sur les nouvelles machines de traction. L'essai de traction est réalisé dans le but de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé; sachant que le même matériau va être hydroformé.

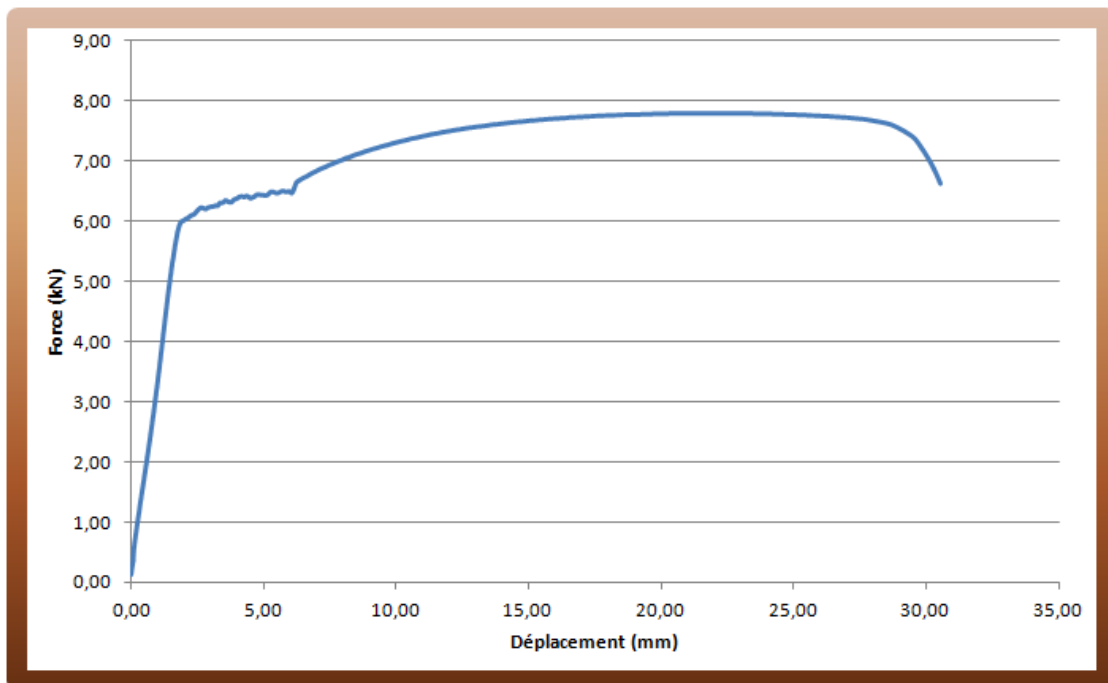
- L'éprouvette de traction est dimension suivante 160x20x2 représentée dans la figure 2.



Eprouvette de traction

**Figure 2.** Dimension de l'éprouvette.

- La figure 3 illustre la courbe de traction de l'essai.



**Figure 3.** Courbe de traction.

Le tableau 1 donne les caractéristiques mécaniques du matériau à partir de l'essai de traction.

F_rupture (kN)	Allongement A% (mm)	Rm (MPa)	E (MPa)	$\nu$	K (MPa)	n
7,79	21,93	399	20400	0,3	536	0,24

**Tableau 1.** Résultats de l'essai de l'éprouvette P3

## 5.2. Essai d'hydroformage des tôles

Les essais expérimentaux d'hydroformage ont été réalisés dans le laboratoire des sciences des matériaux (LSM) de l'ENSEM de Casablanca (Maroc).

### 5.2.1. Dispositif de l'essai

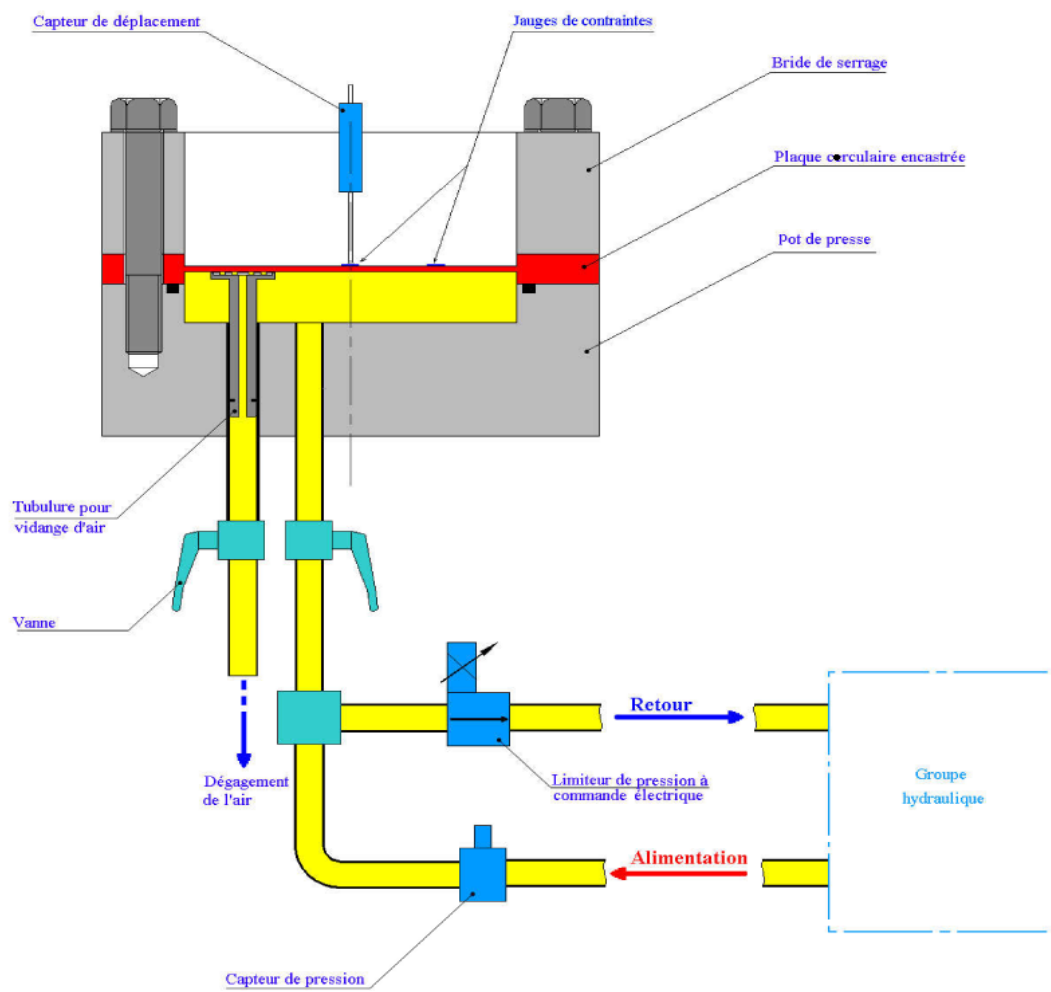
Le matériel de l'essai se constitue de :

- Compresseur d'huile avec commande à 150 bar ;
- Ensemble (matrice-flan-serre flan-système de serrage) avec un système d'évacuation d'huile ;
- Capteur de pression de 0 à 150 bars avec lecture de données ;
- Capteur de déplacement de 0 à 100 mm avec lecture de données ;
- Système d'acquisition de données ;
- Ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition et traitement des données ;
- Câbles ; accessoires et supports des capteurs.

La figure 4 montre le montage de l'essai d'hydroformage. Un schéma de principe de l'essai montre le circuit de l'huile (voir figure 5).



**Figure 4.** Montage de l'essai



**Figure 5.** Schéma de principe de l'essai

### 5.2.2. Description de l'essai

Après un étalonnage et un test à vide pour régler les différents paramètres (les capteurs de déplacement et de pression) et vérifier l'étanchéité, on a fait les essais. Le tableau 2 donne les caractéristiques géométriques des tôles hydroformées.

	Ø tôle(mm)	e tôle(mm)	Ø matrice(mm)	Rayon de courbure matrice(mm)
Tôle 1	204,3	3	198	5
Tôle 2	204,3	2	120	5
Tôle 2	204,3	1	198	5
Tôle 2	204,3	1	120	5

Tableau 2. Caractéristiques de la tôle

Diamètre (D)	Epaisseur (e)	Matière	Diamètre de la matrice (D2)
204,3 mm	3 mm	E24	198 mm

Tableau 3. Les paramètres de l'essai N°1



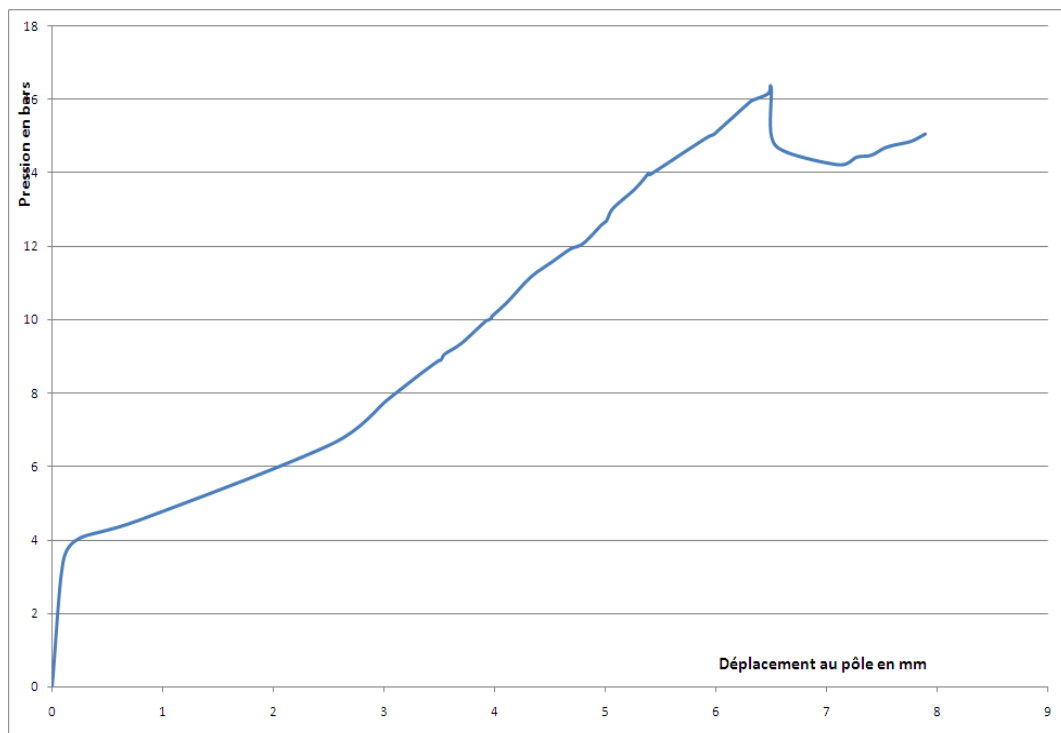
Figure 6. Pièce P2 avant déformation      Figure 7. Pièce P2 après déformation

### 5.2.3. Essai N°1

Le tableau 3 représente les caractéristiques et les dimensions de la pièce P2 (figure 6). Après montage de la pièce dans le système, on a vérifié le serrage ainsi que l'étanchéité d'huile puis on a placé le capteur de déplacement au centre de la pièce ; par la suite on a préparé l'acquisition de données au niveau logiciel ; finalement on a démarré le compresseur de l'huile avec une plage de pression variant de 2 bars à 16 bars. La courbe suivante (figure 8) présente la pression en fonction de déplacement de l'essai N°1 :

- Pression max = 16,39 bars ;
- Déplacement max = 7,89 mm ;
- Pièce après déformation (figure 7).





**Figure 8.** Courbe de variation de la pression en fonction de la hauteur au pôle

#### 5.2.4. Essai N° 2

Le tableau 4 représente les caractéristiques et les dimensions de la pièce P5 (figure 9) avec le serre flan.

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

**Tableau 4.** Tableau des paramètres de l'essai N°2

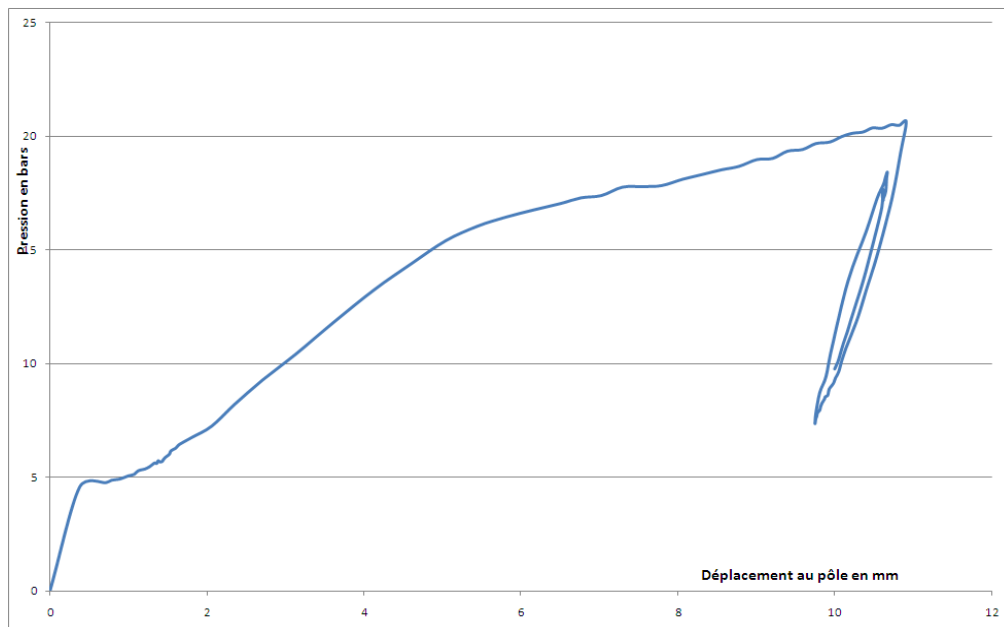
Dans cet essai, on a changé le diamètre de serre flan de la matrice en mettant un autre de diamètre  $d=120$  mm et on a procédé de la même façon en variant la pression de 4 bars à 20 bars :

- Pression maxi = 20,61 bars ;
- Déplacement maxi = 10,9 mm ;
- Pièce après déformation (figure 9).



**Figure 9.** Pièce P5 avant et après déformation

La figure 10 montre le résultat de l'essai N°2.



**Figure 10.** Courbe de l'essai N°2

### 5.2.5. Essai N° 3

Le tableau 5 représente les caractéristiques et les dimensions de la pièce P4 avec serre flan.

Diamètre (D)	Epaisseur (e)	Matière	Diamètre de la matrice (D2)
204,3 mm	1 mm	E24	120 mm

**Tableau 5.** Tableau des paramètres de l'essai N°3

Dans cet essai, on a changé l'épaisseur de la pièce et le serre flan de la matrice en mettant un autre de diamètre d=120 mm et on a procédé de la même façon en variant la pression de 2 bars à 12 bars :

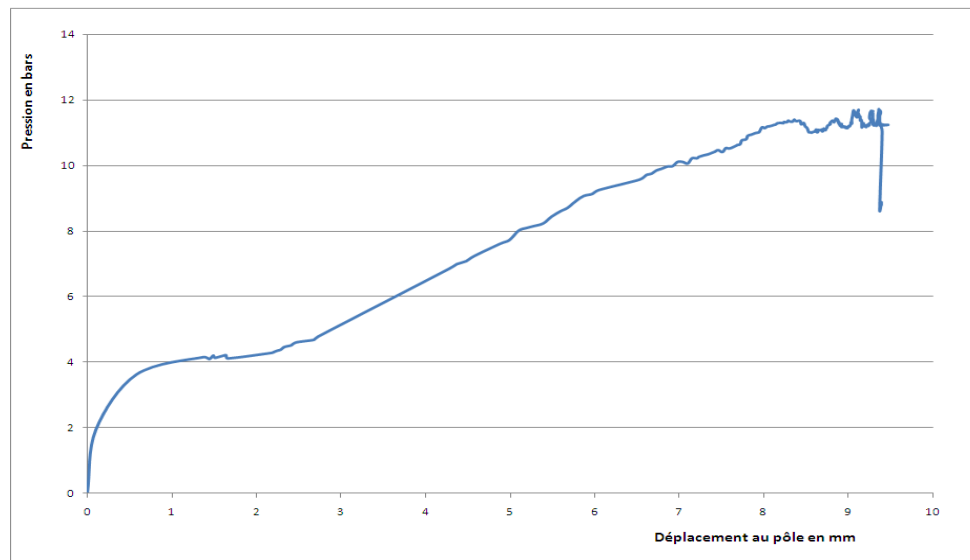
- Pression maxi =11,68 bars ;
- Déplacement maxi = 9,47 mm ;
- Pièce P4 après déformation (figure 11).



**Figure 11.** Pièce P4 après déformation



La figure 12 montre le résultat de l'essai.



**Figure 12.** Courbe de variation de la hauteur en fonction de pression de l'essai N°3

#### 5.2.6. Essai N° 4

Le tableau 6 représente les caractéristiques et les dimensions de la pièce P3

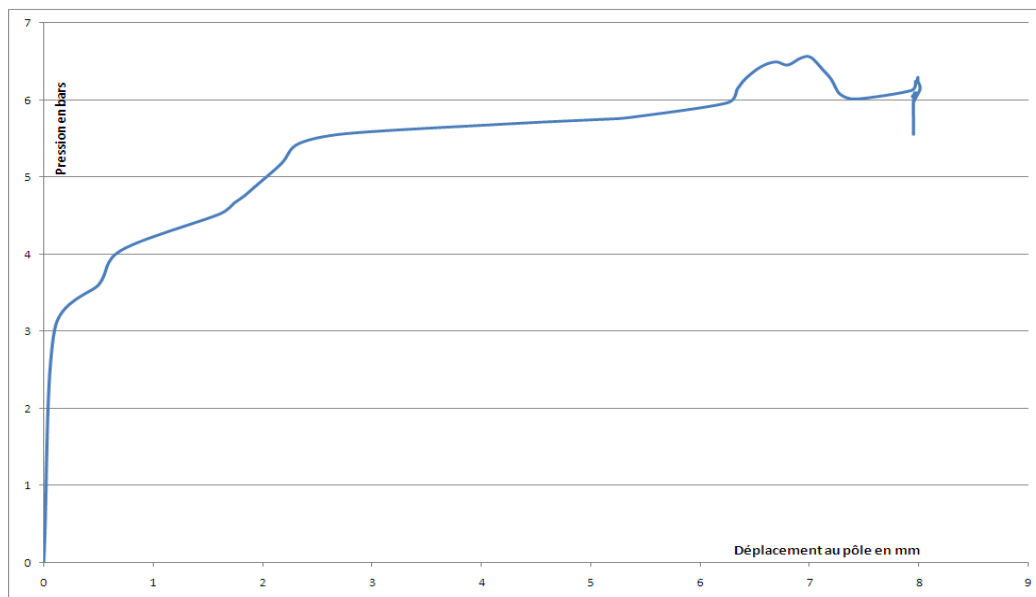
Diamètre (D)	Epaisseur (e)	Matière	Diamètre de la matrice (D2)
204 3 mm	1 mm	E24	198 mm

**Tableau 6.** Les paramètres de l'essai N°4

Dans cet essai on a changé le serre flan de la matrice en mettant un autre de diamètre  $d= 198$  mm et on a procédé de la même façon en variant la pression de 2 bars à 6 bars :

- Pression maxi =6,11 bars ;
- Déplacement maxi =8 01mm ;
- Pièce après de déformation.

La figure 13 montre le résultat de l'essai.



**Figure 13.** Courbe de variation de la hauteur en fonction de la pression de l'essai N°4

## 6. Résultats et discussion

Le tableau récapitulatif 7 suivant donne des résultats des différentes tôles :

	Ø tôle/flan(mm)	e tôle(mm)	Pression (MPa)	hauteur au pôle(mm)
<b>Tôle 1</b>	204,3/198	3	1,639	7,89
<b>Tôle 2</b>	204,3/120	2	2,061	10,9
<b>Tôle 2</b>	204,3/120	1	1,168	9,47
<b>Tôle 2</b>	204,3/198	1	0,611	8,01

**Tableau 7.** Les résultats des essais.

On peut constater que le déplacement au centre varie en fonction du diamètre de la matrice et l'épaisseur de la tôle ainsi que la pression appliquée. La déformation de la tôle continue malgré la pression est constante.

## 7. Conclusion

Les différents essais sur des tôles avec plusieurs épaisseurs ont montrés la sensibilité de ces dernières à la pression appliquée et que malgré l'arrêt de cette dernière, on observe un léger mouvement de la tôle ce qui montre qu'il y a quand même un certain retour élastique à quantifier. Le contrôle de gonflage au pôle peut s'élargir à un contrôle tridimensionnel pour voir la variation de déplacement et d'épaisseur au long de la surface.

## La bibliographie

[Aga08] P. Agati, F. Lerouge, and M. Rossetto, « *Résistance des matériaux. 2ème Edition* », 2008.

[Asn03] N. Asnafi, T. Nilsson, and G. Lassi, « *Tubular hydroforming of automotive side members with extruded aluminium profiles* », *Journal of materials processing technology*, 142 :93–101, 2003.

[Ben11] M.A. Ben Abdesslem, « *Optimisation avec prise en compte des incertitudes dans la mise en forme par hydroformage* », PhD thesis, INSA Rouen, Rouen - France, 2011.

- [Hei99] P. Hein and F. Vollertsen, « *Hydroforming of sheet metal pairs* », Journal of Materials Processing Technology, 87:154–164, 1999.
- [Kah10] H. Kahoul, « *Modélisation du comportement à la déformation élastique des tôles de construction automobile : influence des singularités* », Master's thesis, Université Mentouri, Constantine - Algérie, 2010.
- [Lee06] M.H. Lee, S.M. Sohn, C.Y. Kang, and S.Y. Lee, « *Study on the hydroforming process for automobile radiator support members* », Journal of Materials Processing Technology, 130-131 :115–120, 2002.
- [OhI06] S.I. Oh, B. H. Jeon, H. Y. Kim, and J. B. Yang, « *Applications of hydroforming processes to automobile parts* », Journal of Materials Processing Technology, 174 :42–55, 2006.
- [Yua06] S. J. Yuan, C. Han, and X. S. Wang, « *Hydroforming of automotive structural components with rectangular-sections* », International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46 :1201–1206, 2006.