

# Étude de la mise en forme par fluage de l'alliage AW551 avec une tôle martyre

## VI.1 Introduction

La mise en forme par fluage s'effectue, en général, par trois méthodes différentes (cf. Chapitre1). Ces trois techniques utilisent le principe de formage par une pression gazeuse. Elles exigent ainsi l'utilisation d'une membrane permettant de garantir l'étanchéité de la zone sous pression.

Dans le cas d'une mise en forme à chaud, la membrane en élastomère ne peut plus être utilisée. Sa température limite d'utilisation est de 250°C tandis que la température de mise en forme prescrite pour notre procédé est de 350°C. Une solution alternative qui consiste à remplacer la membrane par une tôle martyre a été mise en place. À cet effet, une tôle de 2mm en alliage A7475 a été choisie. Ce type d'alliage présente, en effet, des performances en formage superplastique permettant d'obtenir à chaud des taux de déformation à rupture importants. Le principe de la mise en forme avec une tôle martyre est présenté en Figure VI-1.

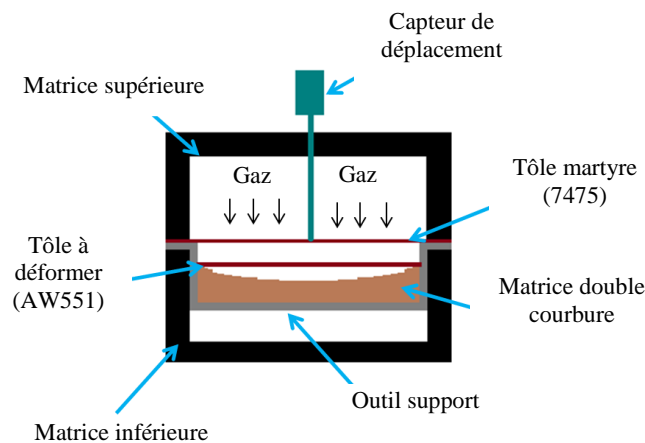


Figure VI-1 : Principe de la mise en forme avec une tôle martyre

La mise en forme par fluage avec tôle martyre du panneau double courbure en alliage AW551 a été réalisée à deux échelles : échelle réduite et échelle réelle. Le modèle de pièce à l'échelle réduite représente 10% de la pièce réelle.

Ce dernier chapitre présente l'étude de la mise en forme par fluage (Creep Forming) dans les deux cas cités précédemment afin de valider le modèle de simulation numérique développé. Il comprend deux paragraphes, consacrés respectivement à l'étude de la mise en forme à une échelle réduite et à l'échelle industrielle. L'étude réalisée à l'échelle réduite est conduite en trois étapes :

- La première partie s'intéresse à la mise en forme expérimentale réalisée à l'aide de la machine de gonflage du LAMPA ainsi qu'à l'analyse des résultats expérimentaux.
- La deuxième partie est consacrée à la simulation numérique du procédé considéré et à la présentation des résultats issus de cette simulation.
- Dans la troisième partie, une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques est effectuée, en termes de géométrie de pièce, d'évolution temporelle du déplacement du centre de la tôle et de retour élastique.

L'étude de la mise en forme à l'échelle réelle est limitée à la simulation numérique du procédé considéré et à la présentation des résultats issus de cette simulation.

## VI.2 La machine de gonflage de l'ENSAM

Ce démonstrateur instrumenté (Figure VI-2) développé par le LAMPA est utilisé pour le formage superplastique. Il permet :

- Le serrage de la zone périphérique de la tôle entre un serre-flan et une matrice.
- Le maintien de l'outillage et de la pièce à une température quasi-uniforme et stable.
- Le gonflage de la tôle par pression gazeuse, avec ou sans contre pression.



Figure VI-2 : Machine de gonflage de l'ENSAM (Boude, 1994)

La presse est instrumentée et asservie afin de contrôler le gonflage à l'aide d'un gaz inerte, l'argon. La pression est pilotée soit en fonction de la hauteur du pôle de la pièce soit en fonction de temps de mise en forme. La hauteur du pôle de pièce est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement situé à l'extérieur de la zone chaude. Un barreau de céramique fixé à l'extrémité du capteur permet de suivre par contact direct le déplacement du pôle (Figure VI-3).

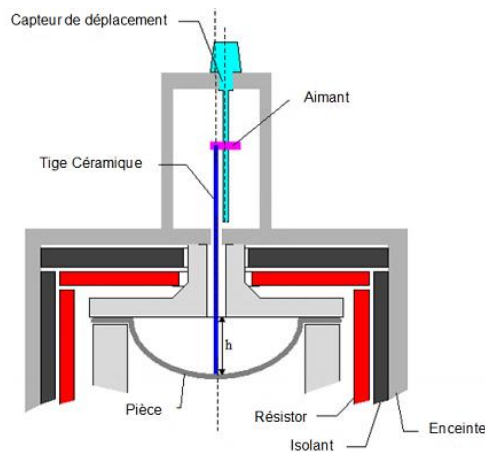


Figure VI-3 : Capteur de déplacement (Boude, 1994)

Les caractéristiques de la machine sont les suivantes : une température réglée entre 300°C et 1100°C, une pression maximale dans chaque chambre de 120 bars, le déplacement maximal du capteur est de 200mm. Les dimensions maximales des tôles sont les suivantes : diamètre de la zone déformée de 200mm ; hauteur de dôme maximale de 200mm ; diamètre initial du flan de 290mm.

## VI.3 Étude de la mise en forme par fluage de l'alliage AW551 avec une tôle martyre à échelle réduite

### VI.3.1 Simulation numérique de la mise en forme par fluage avec tôle martyre

#### VI.3.1.1 Modèle numérique

Le modèle numérique utilisé pour la simulation du procédé est donné par la Figure VI-4.a. La matrice est modélisée par une surface rigide. La tôle en alliage AW551 et la tôle martyre en alliage A7475 sont maillées en utilisant des éléments coques linéaire avec intégration réduite (élément S4R dans ABAQUS). La dimension moyenne des éléments est d'environ 8, 10 et 12 mm, respectivement, pour la tôle à déformer, la matrice et la tôle martyre. Des contacts de type « surface to surface » sont utilisés pour les interactions entre les différentes pièces du modèle.

Dans une première approche, un coefficient de frottement de 0.1 a été choisi pour tous les contacts. Les extrémités extérieures de la tôle martyre et le point de référence de la matrice sont fixés (Figure VI-4.b). La tôle à déformer (AW551) est stabilisée par la condition initiale de contact avec la matrice. La tôle martyre est placée à 2mm au-dessus de la tôle en AW551. Une pression est appliquée sur la face supérieure de la tôle martyre. L'amplitude de la pression est contrôlée par une subroutine Fortran pour assurer une vitesse de déformation de  $9.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Les comportements des matériaux sont modélisés par des lois de fluage (CREEP) implémentées dans des sous-routines utilisateur. Le modèle matériau de la tôle martyre est couplé à l'algorithme de contrôle de la pression. Le processus de résolution utilise le schéma d'intégration implicite d'ABAQUS avec une option d'analyse en viscosité (\*VISCO).

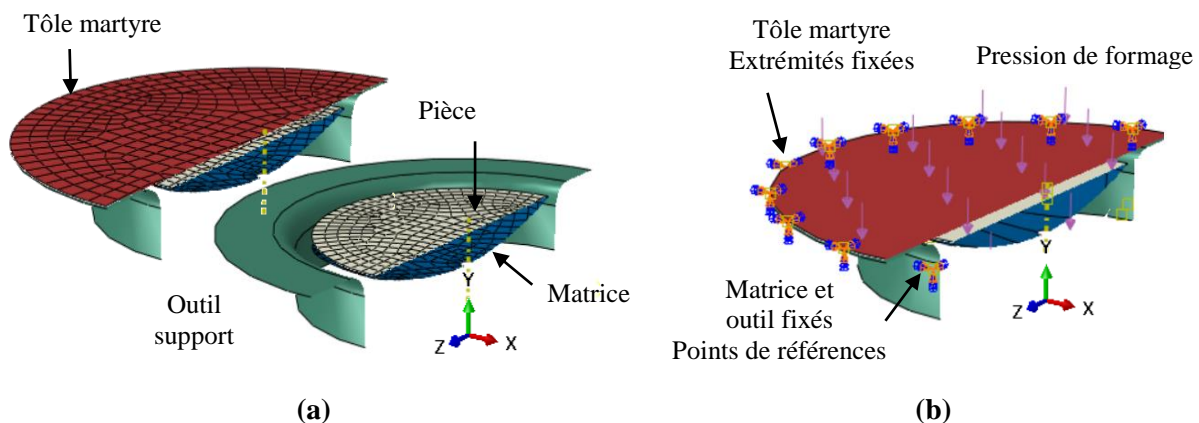


Figure VI-4 : Modèle numérique de fluage à l'échelle réduite

#### VI.3.1.2 Modèles matériau

Le modèle matériau de la tôle AW551 correspond à la loi en Sinus Hyperbolique détaillée dans le chapitre 4. Le modèle utilisé pour représenter le comportement de l'alliage A7475 correspond à la loi puissance de Norton-Hoff décrite par l'équation (VI.1).

$$\sigma = K \dot{\epsilon}_{\dot{\epsilon}q}^m \epsilon_{\dot{\epsilon}q}^n \quad (\text{VI.1})$$

À la température de mise en forme (soit 350°C), le phénomène d'érouissage n'est pas présent pour l'alliage A7475 ( $n=0$ ). Le modèle se réduit ainsi à l'équation (VI.2).

$$\sigma = K \dot{\epsilon}_{\dot{\epsilon}q}^m \quad (\text{VI.2})$$

Le coefficient K est la consistance, une constante spécifique au matériau et m représente la sensibilité du matériau à la vitesse de déformation. Les valeurs utilisées sont extraites de la littérature (Srivastava, et al., 2004).

### VI.3.1.3 Algorithme de contrôle de la pression de formage

Le contrôle de la pression est assuré par un algorithme proportionnel développé au LAMPA (Robert, 2009), (Aoura, 2004). Une correction continue de la loi de pression a été proposée (Figure VI-5) pour stabiliser le processus de formage en fonction d'une consigne en vitesse de déformation maximale. La loi de pression est lissée par un polynôme du troisième ordre donné par l'équation (VI.3).

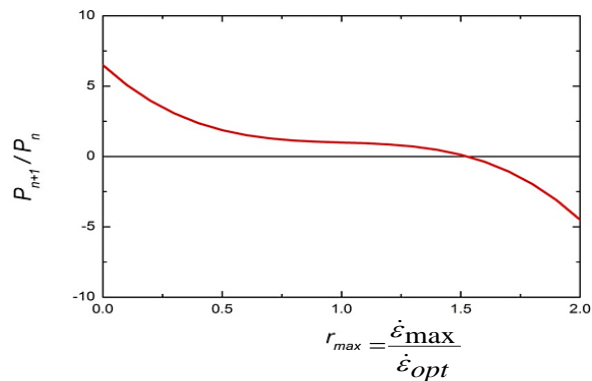


Figure VI-5 : Correction proportionnelle proposée (Robert, 2009)

$$P_{n+1} = [-5(r_{max} - 1)^3 - 0.5(r_{max} - 1) + 1]P_n \quad (VI.3)$$

L'algorithme est présenté sur la Figure VI-6.

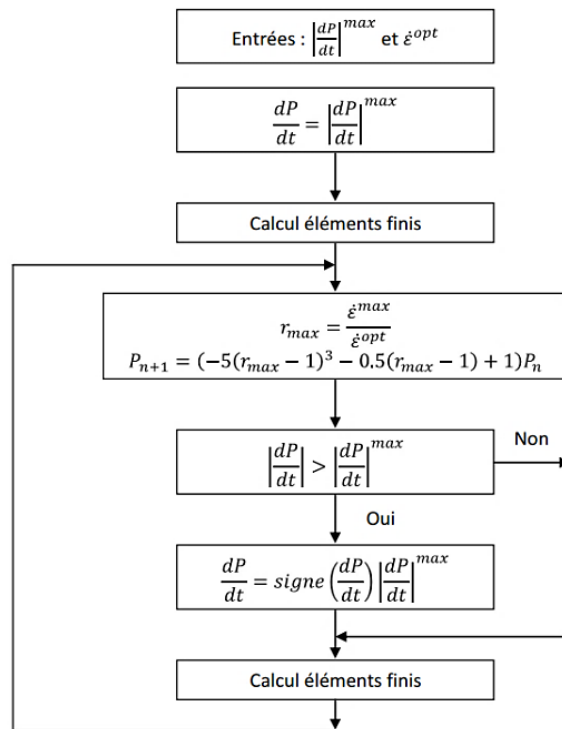


Figure VI-6 : Algorithme proportionnel (Robert, 2009)

La valeur de la pression de formage pour le premier incrément est fixée à la valeur donnée par l'équation (VI.4).

$$P_1 = dt \left| \frac{dp}{dt} \right|^{max} \quad (VI.4)$$

Avec  $dt$  le pas d'intégration numérique et  $\left| \frac{dp}{dt} \right|^{max}$  la variation de pression maximale admissible.

### VI.3.1.4 Résultats numériques de la simulation

La Figure VI-7 montre les principaux résultats numériques obtenus en utilisant le modèle décrit ci-dessus. La déformation maximale développée dans la tôle martyre (Figure VI-7.a) est d'environ 21%. Cette déformation semble être inférieure à la déformation à la rupture de l'alliage sous les conditions thermomécaniques considérées. Ce niveau de déformation doit ainsi nous permettre la mise en forme sans causer la rupture de la tôle martyre.

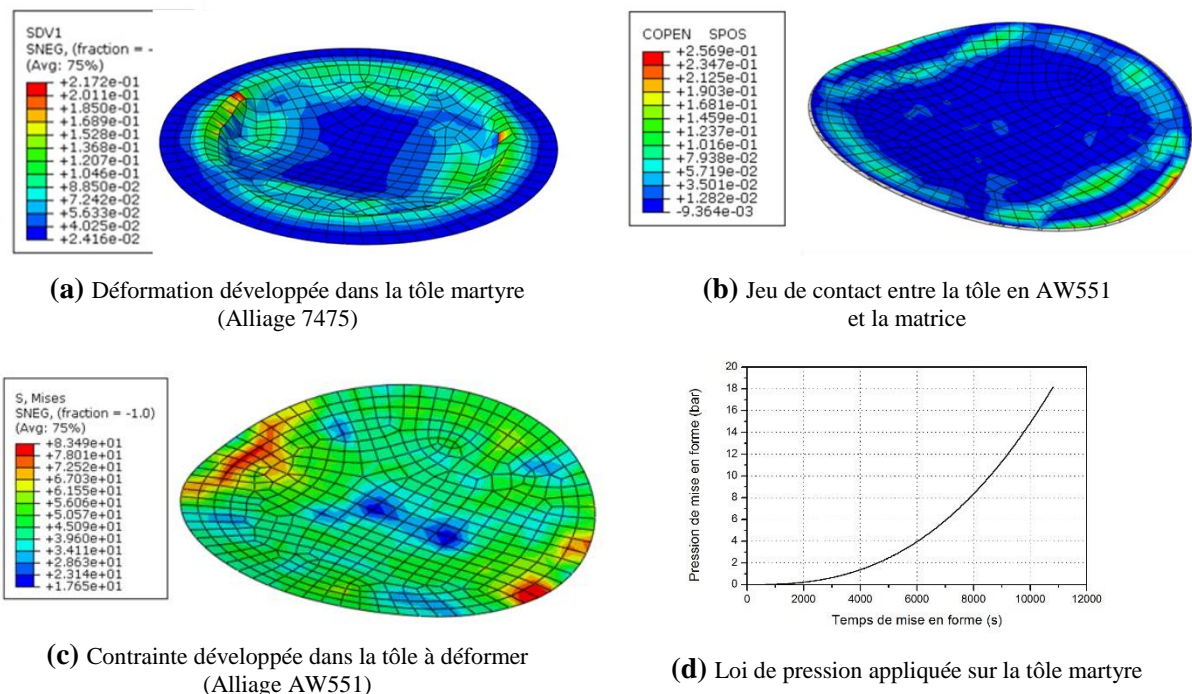


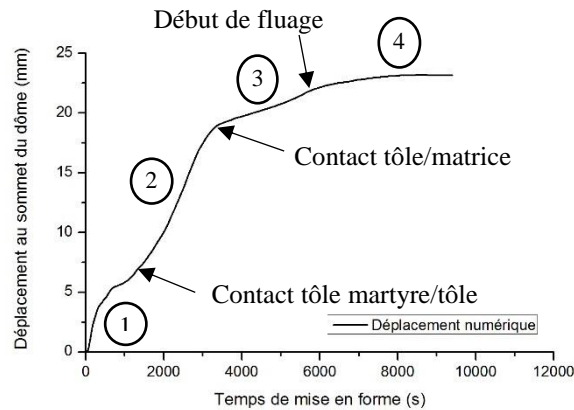
Figure VI-7 : Résultats numériques de la mise en forme par fluage de la tôle en AW551 à l'échelle réduite

Le niveau de la contrainte maximale dans la tôle en AW551 est inférieur à sa limite d'élasticité (Figure VI-7.c). Le contact entre la tôle à former et la matrice est relativement homogène (Figure VI-7.b) : le jeu entre ces deux éléments est inférieur à 0.3mm, ce qui montre une mise en forme régulière de la pièce.

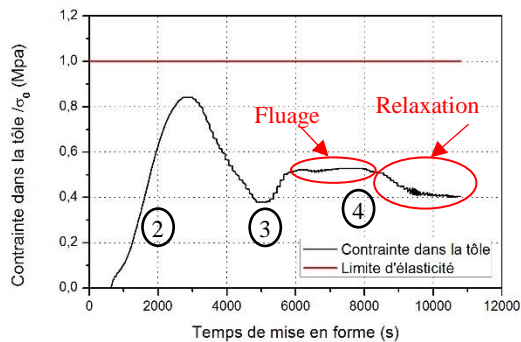
La loi de pression qui contrôle la déformation de la tôle martyre est illustrée par la Figure VI-7.d. La pression augmente d'une manière continue jusqu'à une valeur maximale de 18 bars. Le premier contact entre la tôle martyre et la tôle à déformer se produit après 650s. La tôle à déformer atteint la matrice après 3500s. La pression est maintenue jusqu'à un temps de formage de 10800s pour permettre la relaxation de la pièce à déformer : la relaxation de contrainte est ainsi d'environ 20%.

Afin de déterminer l'instant à laquelle le fluage (CREEP) apparaît, le déplacement du centre de la tôle martyre ainsi que l'évolution de la contrainte et de la déformation sur la tôle en AW551 ont été tracés et présentés en Figure VI-8. Les changements de pente constatés sur la courbe d'évolution du déplacement du centre de la tôle martyre en fonction du temps (Figure VI-8.a), sont induits par les accostages successifs entre les différentes pièces.

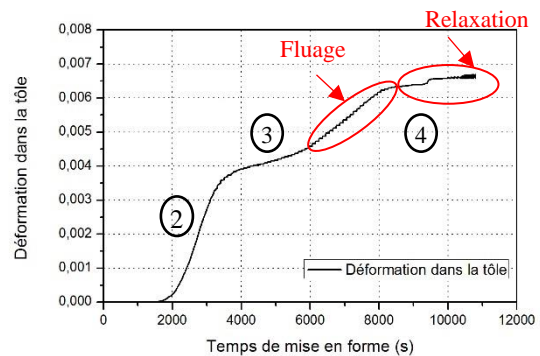
La Figure VI-8.b et la Figure VI-8.c présentent l'évolution temporelle de la déformation de la tôle en AW551. Nous pouvons constater que le processus de déformation évolue suivant deux modes. En premier lieu, la déformation est assurée par l'effort appliqué par la tôle martyre. Lorsque le contact entre la tôle et la matrice est initié, la tôle continue à se déformer sous l'action de la tôle martyre jusqu'au moment où cette dernière ne se déplace plus ( $\approx 6000s$ ). À cet instant, le phénomène de fluage est activé comme le montrent les deux figures (Figure VI-8.b et Figure VI-8.c). En effet, la contrainte a tendance à se stabiliser tandis que la déformation continue à augmenter en fonction du temps. Nous pouvons également remarquer qu'un phénomène de relaxation se produit directement après le fluage où, dans ce cas la déformation reste constante et la contrainte décroît en fonction du temps.



(a)



(b)



(c)

Figure VI-8 : Évolution en fonction du temps de mise en forme du : (a) déplacement du sommet du dôme, (b) contrainte et (c) déformation dans la tôle à déformer

### VI.3.2 Mise en forme expérimentale de la pièce prototype

#### VI.3.2.1 Configuration expérimentale de l'essai de mise en forme

La Figure VI-9 présente le montage utilisé pour la mise en forme à échelle réduite. Une matrice à double courbure est fixée sur l'outil support, placé à l'intérieur du four. La tôle à déformer est positionnée librement sur la matrice. La tôle martyre d'une épaisseur de 2mm est placée sur la surface supérieure de l'outil support, à 2 mm au-dessus de la tôle à déformer.

La tôle martyre a un diamètre de 290mm initiale tandis que la tôle déformée a un diamètre initial de 178mm.

Le système est serré par la fermeture du four. Durant le procédé de mise en forme, une pression de gaz (Argon) est appliquée sur la côté supérieure de la tôle martyre. En cours du cycle de formage, la



déformation de la tôle martyre induit le plaquage de la tôle en AW551 sur la forme de la matrice. L'ensemble est chauffé jusqu'à la température de mise en forme (soit 350°C). Cette température est maintenue pendant une heure afin de garantir l'homogénéité thermique de la pièce. La mesure de la température est assurée par des thermocouples placés au sein du four.

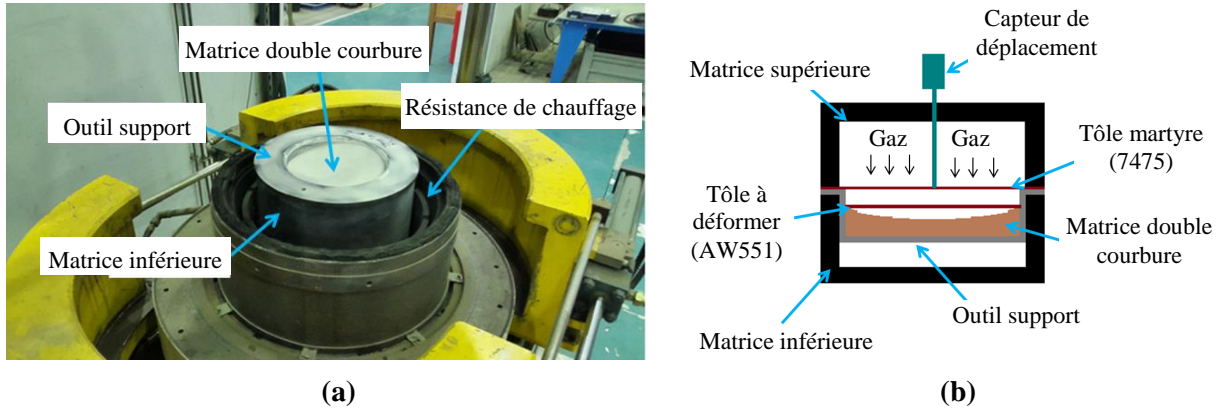


Figure VI-9 : (a) Partie inférieure du four et (b) Éléments présents dans la zone de formage

### VI.3.3 Comparaison résultats expérimentaux et numériques

La mise en forme expérimentale, à échelle réduite, de la pièce en double courbure en utilisant la machine de gonflage décrite par la Figure VI-2 et en contrôlant la mise en forme par la loi de pression donnée par la Figure VI-7.d a été réalisée dans des conditions conformes au modèle numérique. Les tôles déformées obtenues après la mise en forme sont représentées en Figure VI-10.a. La zone centrale de la tôle martyre a été déformée par la pression du gaz et la tôle en AW551 a été intégralement mise en forme et présente nettement une double courbure. Le retour élastique de la pièce semble peu important et comme montré dans la Figure VI-10.b, la forme de la pièce obtenue semble en bonne adéquation avec la forme de la matrice.

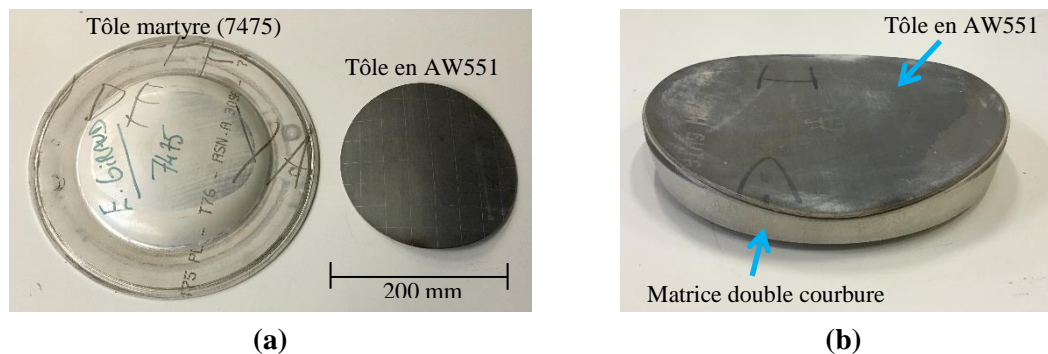


Figure VI-10 : Pièces obtenues après la mise en forme par fluage avec la machine de gonflage

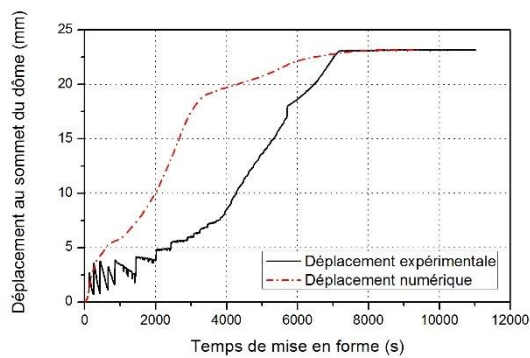
Un bon accord a été trouvé entre les résultats expérimentaux et numériques en termes de déplacement au sommet du dôme de la tôle martyre, d'évolution de l'épaisseur dans la tôle en AW551 et de formes finales des déformées.

La Figure VI-11.a montre que le déplacement mesuré au sommet du dôme de la tôle martyre augmente régulièrement et se stabilise lorsque les tôles entrent en contact avec la matrice. La comparaison de cette courbe avec celle obtenue par la simulation numérique fait cependant apparaître

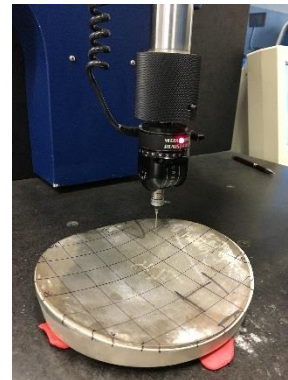
quelques différences. Ce décalage de la courbe peut être expliqué par les paramètres matériau utilisés pour la tôle martyre qui ont été extraits de la littérature. Il est prévu de mettre en place, dans la continuité de ces travaux, un protocole de caractérisation de la tôle martyre afin d'appréhender plus finement son comportement lors de la mise en forme.

La plage d'évolution de l'épaisseur de la pièce simulée ainsi que celle de la pièce expérimentale, est d'environ 0.01mm du centre à l'extrémité de la pièce. Le jeu de contact mesuré entre la tôle AW551 expérimentale et la matrice est du même ordre de grandeur que celui trouvé numériquement (0.15 mm).

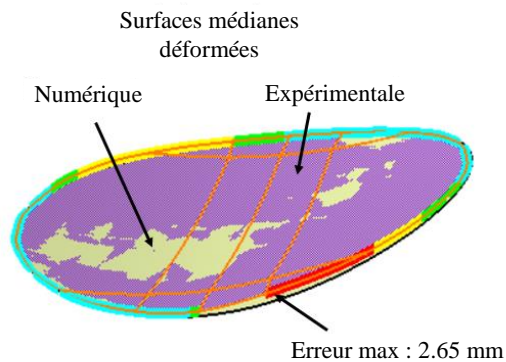
Une comparaison entre les formes déformées numérique et expérimentale est illustrée par la Figure VI-11.c. Le maillage déformé issu de la simulation dans ABAQUS a été exporté dans CATIA V5. La forme expérimentale a été reconstruite à partir des points mesurés avec une machine tridimensionnelle (Figure VI-11.b). Un bon accord entre les formes obtenues a été trouvé avec une erreur moyenne des rayons de courbure de 2% dans les zones centrales. Les erreurs maximales entre les surfaces médianes de la forme mesurée et le maillage coque déformée sont localisées sur les bords des géométries (erreur maximale d'environ 2.65mm).



(a)



(b)



(c)

Figure VI-11 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques



## VI.4 Étude de la mise en forme par fluage de l'alliage AW551 avec une tôle martyre à échelle réelle

### VI.4.1 Simulation numérique de la mise en forme par fluage avec tôle martyre

#### VI.4.1.1 Modèle numérique

Le modèle numérique utilisé pour la simulation du procédé de mise en forme de la pièce industrielle est illustré en Figure VI-12. La matrice est modélisée par une surface rigide. La tôle en alliage AW551 et la tôle martyre en alliage A7475 sont maillées en utilisant des éléments coques linéaire avec intégration réduite (élément S4R dans ABAQUS). La dimension moyenne des éléments est d'environ 25mm pour les deux tôles. Cette dimension a été fixée suite à une étude de sensibilité de maillage réalisée sur ce modèle (Annexe E). L'objectif était de déterminer la taille des éléments optimale assurant le meilleur rapport précision/temps de calcul. Des contacts de type « surface to surface » sont utilisés pour les interactions entre les différentes pièces du modèle. Un coefficient de frottement de 0.1 a été choisi pour tous les contacts. Les extrémités extérieures de la tôle martyre et le point de référence de la matrice sont fixés (Figure VI-12).

La tôle à déformer (AW551) est stabilisée par une condition initiale de contact avec la matrice. La tôle martyre est placée à 2mm au-dessus de la tôle en AW551. Une pression est appliquée sur la face supérieure de la tôle martyre. L'amplitude de cette pression est contrôlée par une sous-routine Fortran pour assurer une vitesse de déformation de  $9.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

Les comportements de matériaux sont modélisés par les mêmes lois de fluage (CREEP) que celles utilisées pour la simulation de la pièce à échelle réduite. Le modèle matériau de la tôle martyre est couplé à l'algorithme de contrôle de la pression présenté précédemment. Le processus de résolution utilise le schéma d'intégration implicite d'ABAQUS avec une option d'analyse en viscosité (\*VISCO).

Une étape préliminaire de simulation statique associée à un comportement élasto-plastique du matériau est mise en place avant l'étape de simulation dans le domaine visqueux. Elle permet ainsi de prendre en compte la déformation initiale de la pièce sous l'effet de son poids propre pendant la phase de chauffage.

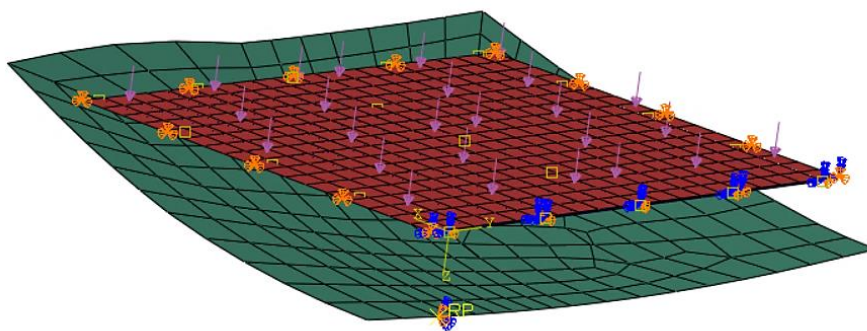


Figure VI-12 : Modèle numérique de fluage à l'échelle réelle

#### VI.4.1.2 Résultats numériques de la simulation

Les résultats de la simulation montrent que la tôle en AW551 flue sous l'effet de son propre poids avant d'atteindre sa déformation finale sous l'action de la tôle martyre (Figure VI-13.a). Le premier contact entre la tôle martyre et la tôle à déformer se produit après 81s (Figure VI-13.b) et celui entre le centre de la tôle à déformer et la matrice est atteint après 118s. Cependant le premier contact entre les

bords de la tôle et la matrice est atteint au bout de 50s. La pression est maintenue jusqu'à un temps de formage de 450s pour permettre la déformation complète de la pièce.

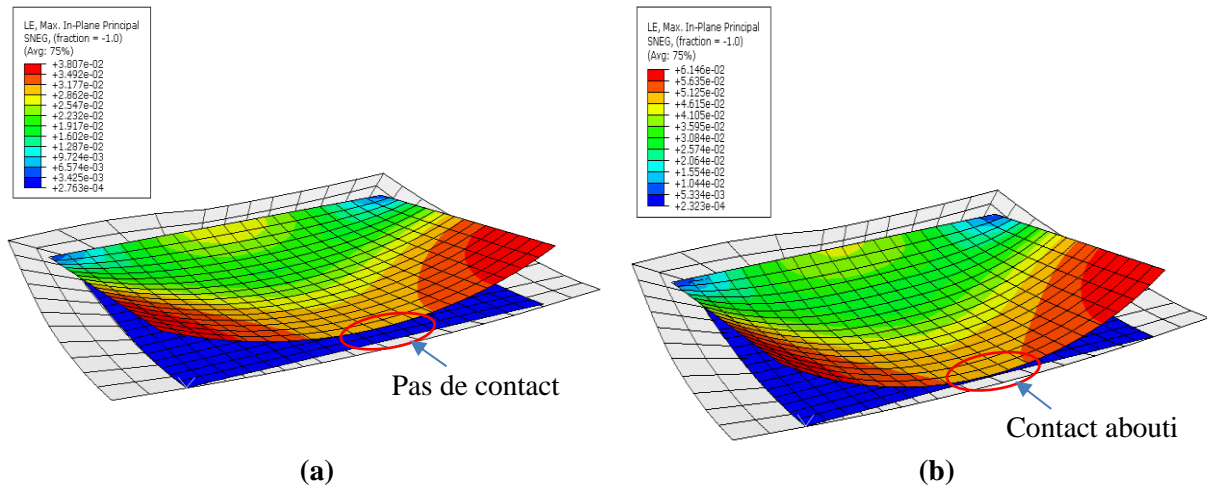


Figure VI-13 : (a) Déformation de la tôle sous l'effet de son propre poids et (b) premier contact tôle/tôle martyre

La Figure VI-14 montre les principaux résultats numériques obtenus en utilisant le modèle décrit dans le paragraphe précédent. La déformation maximale dans la tôle martyre est d'environ 30.2% (Figure VI-14.a). Elle reste inférieure à la déformation à la rupture de l'alliage sous les conditions thermomécaniques considérées. Ces prévisions devraient raisonnablement permettre la mise en forme de la pièce industrielle sans risque de rupture de la tôle martyre.

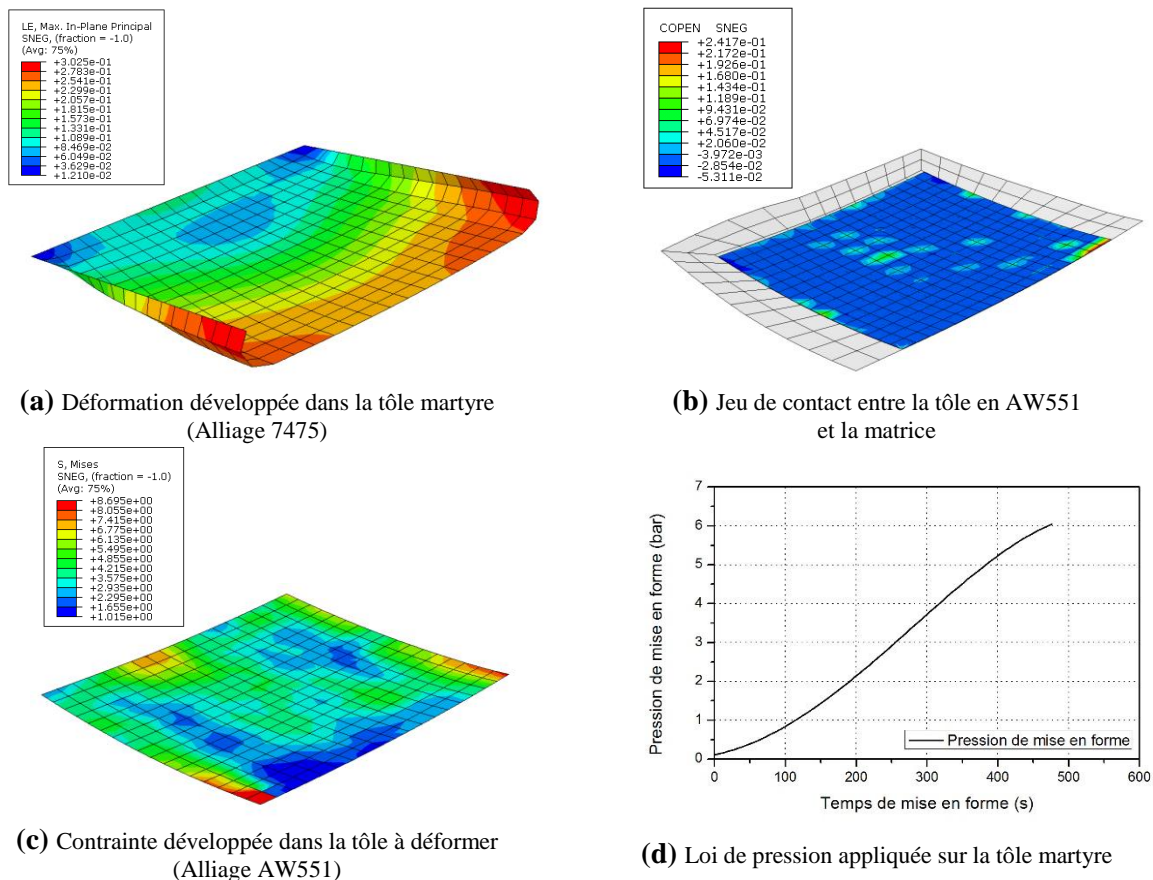


Figure VI-14 : Résultats numériques de la mise en forme par fluage de la tôle en AW551 de la pièce industrielle

Le niveau de la contrainte maximal, dans la tôle en AW551, reste toujours inférieur à sa limite d'élasticité (Figure VI-14.c). Un contact homogène entre la tôle à déformer et la matrice est également observé (Figure VI-14.b) : le jeu entre ces deux éléments est inférieur à 0.24mm, ce qui indique un remplissage homogène de la matrice. La loi de pression qui contrôle la déformation de la tôle martyre évolue avec stabilité et continuité jusqu'à une valeur de 6 bars, comme le montre la Figure VI-14.d.

Dans le but d'analyser les modes de comportement activés par la tôle lors de sa mise en forme le déplacement du centre de la tôle martyre ainsi que l'évolution de la contrainte et de la déformation dans la tôle en AW551 sont représentés en Figure VI-15.

La courbe d'évolution du déplacement du centre de la tôle martyre en fonction du temps (Figure VI-15.a) présente un changement de pente à chaque fois qu'un contact se produit entre les différents éléments du modèle. La Figure VI-15.b et la Figure VI-15.c montrent que la déformation de la tôle en AW551 s'effectue en quatre périodes.

La première correspond à la phase de chauffage durant laquelle la tôle se déforme sous l'effet de son propre poids. Lorsque les bords de la tôle touchent la matrice après 50s, une déformation constante est observée. Elle s'accompagne d'une chute du niveau de la contrainte induite par l'apparition de nouveaux points d'appuis sur la tôle lors de son accostage sur la matrice. Nous pouvons également remarquer dans cette étape l'apparition du phénomène de fluage avec une stabilisation de la contrainte et une augmentation de la déformation.

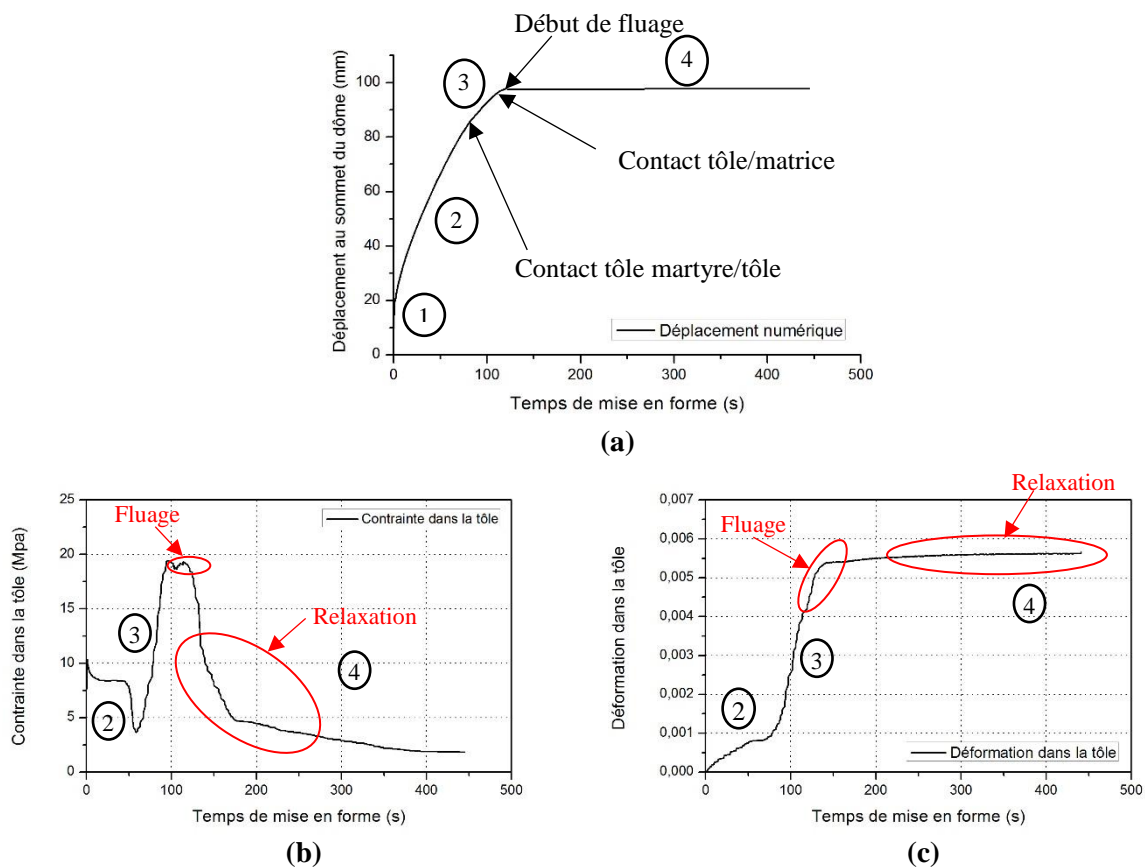


Figure VI-15 : Évolution en fonction du temps de mise en forme du : (a) déplacement du sommet du dôme, (b) contrainte et (c) déformation dans la tôle à déformer

Lors de la deuxième période, la déformation de la tôle en AW551 est assurée par l'effort appliqué par la tôle martyre. Lorsque le contact entre la tôle déformée et la matrice s'amplifie, la tôle continue à se déformer sous l'action de la tôle martyre jusqu'au remplissage de la matrice ( $\approx 120s$ ).

À cet instant, correspondant à la troisième période, le phénomène de fluage devient dominant comme le montre les deux figures (Figure VI-15.b et Figure VI-15.c). La contrainte reste quasiment constante tandis que la déformation continue à évoluer en fonction du temps.

La quatrième période correspond à un mode de relaxation qui est initié directement après le fluage, lorsque la matrice est totalement remplie. Dans ce cas, nous constatons que la déformation reste constante et la contrainte diminue en fonction du temps.

## **VI.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, la mise en forme, par fluage à l'aide d'une tôle martyre, d'un panneau double courbure en alliage AW551 a été étudiée à échelle réduite et à échelle industrielle.

Le modèle de simulation numérique développé, a été recalé et validé à partir de l'étude de la mise en forme par fluage à l'échelle réduite. La simulation de ce procédé a été réalisée dans le but de prédire la loi de pression à appliquer sur la tôle martyre afin de conduire la mise en forme jusqu'à remplissage total de la matrice. La mise en forme expérimentale à échelle réduite a été réalisée sur le démonstrateur instrumenté du LAMPA. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux permet de vérifier le modèle numérique et de disposer d'un outil de prédiction fiable des lois de pressions pour la réalisation de pièces industrielles.

Ce modèle numérique validé à échelle réduite a été ensuite utilisé pour la simulation numérique de la mise en forme par fluage du panneau double courbure à l'échelle réelle. Les résultats numériques de cette simulation montrent que : (i) la tôle martyre en alliage A7475 est sollicitée dans des limites raisonnables (en dessous de sa déformation à la rupture) et permet la mise en forme de la tôle en AW551 (ii) la tôle en AW551 se déforme sous son poids propre lors de la phase de chauffage et (iii) le rôle de la tôle martyre est d'assurer la déformation totale de la pièce étudiée.

La mise en forme expérimentale de la tôle à double courbure à l'échelle industrielle a été réalisée en tenant compte des spécifications de température et de la loi de pression prédite par la simulation numérique. Les formes obtenues semblent être en bonne adéquation avec les résultats obtenus à échelle réduite. L'analyse détaillée des résultats est en cours et s'inscrit dans les perspectives de ces travaux de thèse.