V.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, différents modèles de comportement ont été étudiés et validés pour chaque alliage d'aluminium (2050 et AW551) selon les conditions thermomécaniques des procédés de mise en forme concernés. Ce chapitre est consacré à l'étude de la mise en forme par emboutissage de l'alliage 2050 à sa température de revenu (soit 150°C) et de l'alliage AW551 à sa température de mise en solution (soit 350°C). La pièce étudiée est un panneau double courbure de 40mm d'épaisseur (cf. Chapitre1). Ce chapitre se divise en trois parties. La première s'intéresse à la présentation de la presse de l'IRT qui est utilisée pour la mise en forme des pièces. Les parties suivantes sont consacrées respectivement à l'étude de l'emboutissage des deux alliages. Pour chaque matériau, les aspects suivants sont abordés :

- La description de la mise en forme expérimentale réalisée avec la presse IRT et la présentation des résultats expérimentaux.
- La simulation numérique de la mise en forme et la présentation des résultats numériques.
- L'étude comparative entre les résultats expérimentaux et numériques.

La comparaison est effectuée sur trois critères : la géométrie finale de la pièce, l'évolution de l'effort appliqué et le retour élastique.

V.2 La presse de l'IRT Jules Verne

Cette presse hydraulique (Figure V-1) a été développée dans le cadre du projet « cellule HF » de l'Institut de Recherche Technologique (IRT) Jules Verne de Nantes. Elle peut être utilisée pour des procédés de type « Hot Forming », mais également pour du formage superplastique. L'effort maximal fourni par la presse en mise en forme à chaud ou à froid (Emboutissage) est de 5000KN \approx 500Tonnes. La vitesse du coulisseau varie entre 0.2 et 4 mm/s. La pression de gaz maximale applicable en formage superplastique (SPF) ou en mise en forme par fluage (Creep Forming) est de l'ordre de 40 bar.





Figure V-1 : Presse IRT

Pour tout type de procédé de mise en forme à chaud, le chauffage est réalisé par un système de résistances chauffantes entourant l'outillage et assurant ainsi une température relativement homogène dans la pièce jusqu'à une valeur maximale de 1000°C.

V.3 Étude de la mise en forme par emboutissage de l'alliage 2050

V.3.1 Mise en forme expérimentale de la pièce prototype

V.3.1.1 Préparation et mise en place de la tôle

Afin d'assurer un coefficient de frottement inférieur à 0.2, un lubrifiant poudreux à base de nitrure bore est déposé sur la tôle, la matrice et le poinçon. La mise en place de la tôle (Figure V-2) est réalisée à l'aide d'un manipulateur d'une charge utile de 200 Kg. La dimension de la tôle est de 1000x550x40 mm.



Figure V-2 : (a) Matrice, (b) Poinçon et (c) Mise en place de la tôle dans l'outil

V.3.1.2 Configuration expérimentale de l'essai de mise en forme

La tôle, placée dans l'outil, subit une étape de préchauffage de 1h30 à la température de revenu de l'alliage 2050 (soit 150°). La mesure de la température est assurée par des thermocouples placés sur les faces supérieure et inférieure de l'outil comme illustré dans la Figure V-3. La température de contrôle correspond à la valeur moyenne mesurée sur chaque face, soit environ 150 ± 8 °C.



Figure V-3 : Position de thermocouples sur l'outil : (a) partie inférieure (Matrice) et (b) partie supérieure (Poinçon)

La mise en forme de la pièce s'effectue en trois séquences composées chacune d'une étape de formage suivie d'une phase de relaxation (Figure V-4). La vitesse du coulisseau lors de la mise en forme est de 2mm/s. Un temps de relaxation de 17 min a été appliqué pour toutes les séquences. Durant les deux premières séquences, le déplacement du poinçon a été contrôlé sans aucune limitation sur l'effort. Durant l'étape finale, un effort de 500Tonnes est appliqué (ce qui correspond à la performance maximale de la presse hydraulique de l'IRT.



Figure V-4 : Cycle de mise en forme par emboutissage de l'alliage 2050

V.3.1.3 Résultats expérimentaux de la mise en forme sur la presse IRT

L'évolution de l'effort du poinçon mesuré durant le procédé de mise en forme est présentée en Figure V-5 et elle est en bonne cohérence avec les trois séquences décrites précédemment dans la Figure V-4. Le système de contrôle de la presse ne permettant pas d'assurer la consigne de 500T initialement prévue, la force maximale, atteinte durant la dernière séquence, est de 480Tonnes. Nous pouvons également noter que la contrainte de seuil associée aux phases de relaxation est généralement atteinte après 200s.



Figure V-5 : Évolution de l'effort expérimental du poinçon en fonction du temps

La Figure V-6 montre l'évolution de la température en fonction du temps sur la partie inférieure et supérieure de l'outil. La température sur les deux faces de l'outil au cours de la mise en forme est relativement stable (variation maximale : 6° C).



Figure V-6 : Évolution de la température sur la partie supérieure (Poinçon) et inférieure de l'outil (Matrice)

Une photo de la pièce déformée est représentée sur la Figure V-7. Nous constatons que le cycle de mise en forme appliqué sur la tôle ne permet pas de remplir complètement la matrice (au vue des traces d'outil présentes sur la tôle). Nous remarquons également que, du fait de l'influence du retour élastique, la double courbure n'apparaît pas clairement.



Figure V-7 : Pièce déformée expérimentalement

Cette pièce déformée a été reconstruite en CAO sur CATIA V5 (Figure V-8a) à partir de données obtenues à l'aide d'une machine de mesure tridimensionnelle (MMT). Afin de comparer la forme obtenue avec celle de la matrice, qui correspond à la géométrie de référence, des courbes médianes ont été tracées, sur la face extérieure de la tôle, selon ses deux plans principaux de courbure (Figure V-8.b).



Figure V-8 : (a) Pièce obtenue avec la machine de mesure tridimensionnelle et (b) Comparaison entre les courbures de la pièce déformé et la matrice

Une différence maximale de 19.674 mm a été mesurée au centre de la tôle. Cet écart est vraisemblablement dû au phénomène de retour élastique, mais également au remplissage de la matrice qui n'est pas réalisé à 100%.

V.3.2 Simulation numérique de la mise en forme de la pièce prototype

V.3.2.1 Modèle numérique

Un modèle 3D de simulation du procédé de mise en forme (Figure V-9) du panneau double courbure a été mis en place sur ABAQUS (B). Le modèle s'applique sur une moitié de la pièce, et comporte une condition de symétrie selon l'axe Y. Le poinçon et la matrice sont définis comme des surfaces rigides discrétisées. Un déplacement selon l'axe Z, imposé sur le point de référence du poinçon contrôle l'opération d'emboutissage. Cette condition limite est pilotée par une courbe d'amplitude qui reproduit exactement les différentes étapes de mise en forme programmées sur la machine durant l'essai expérimental. La vitesse de déplacement est de 2 mm/s. La matrice est fixée en son point de référence dans sa position sur la machine. La tôle est positionnée librement au-dessus de la matrice. Elle est stabilisée par les conditions initiales de contact.

Le type d'élément C3D8 avec une intégration totale est utilisé pour le maillage de la pièce. La taille de chaque élément est d'environ 13x13x7 mm³. Les phénomènes de contact entre la pièce et les outils sont gérés par l'algorithme « General contact » proposé par ABAQUS. Le modèle de frottement de coulomb est utilisé et un coefficient de frottement moyen de 0.2 est choisi pour les différentes interfaces.



Figure V-9 : Modèle numérique développé pour la simulation de la mise en forme par emboutissage

Les simulations de la mise en forme ont été conduites en utilisant les deux approches présentées dans le deuxième chapitre.

La première approche a été mise en œuvre en décrivant chaque séquence de formage par deux étapes (STEP) de simulation : une simulation statique pour la phase de mise en forme suivie par une simulation d'écoulement visqueux pour la phase de relaxation. À chaque étape est associé un modèle de comportement matériau spécifique. Un modèle élasto-plastique avec un critère de plasticité anisotrope est adopté pour la phase de formage. Le comportement plastique est décrit par une loi tabulée obtenue à partir des essais de traction. L'anisotropie plastique est décrite par le critère de Hill48 dont les paramètres ont été identifiés au Chapitre 4. Pour la phase de relaxation, la loi sinus hyperbolique, présentée au Chapitre 4, a été implémentée dans ABAQUS par l'intermédiaire d'une subroutine utilisateur (CREEP).

La deuxième approche utilise un formalisme unifié du comportement matériau et chaque séquence est décrite par une seule étape statique. La loi de comportement, décrite au chapitre 4, a été implémentée dans ABAQUS par la programmation d'une subroutine utilisateur (UMAT). Elle permet de gérer, en une seule étape, les différents phénomènes associés à l'emboutissage et à la relaxation (viscoplasticité, viscoélastiques, retour élastique...).

V.3.2.2 Résultats numériques de la simulation

L'évolution simulée, en utilisant les deux approches, de l'effort appliqué par le poinçon en fonction du temps est illustrée par la Figure V-10. Un taux de remplissage de 99.62% a été obtenu en respectant les prescriptions de la stratégie expérimentale d'emboutissage. Le taux de remplissage est défini par le rapport entre le déplacement permettant un remplissage de 100% et le déplacement obtenu. La déformation maximale atteinte est de l'ordre de 8%.

Les différences, en termes d'effort de poinçon, entre les deux approches sont relativement faibles. Les écarts les plus sensibles sont constatés lors de la dernière séquence de mise en forme pour laquelle la force obtenue après relaxation avec le modèle élasto-viscoplastique modifié est supérieure de 3.5% à celle obtenue avec le modèle élasto-plastique. Pour chaque séquence, la prédiction de la force correspondant à la contrainte seuil est identique pour les deux approches.





V.3.3 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques

V.3.3.1 Retour élastique

Une évaluation du retour élastique, au centre de la tôle, de 23.69mm et de 22.03 mm a été réalisée en mesurant la distance entre la surface inférieure de la tôle déformée avant et après retour élastique (Figure V-11), respectivement, avec le modèle élasto-plastique et le modèle élasto-viscoplastique modifié.



Figure V-11 : Retour élastique après mise en forme et relaxation avec les deux approches : (a) Modèle élasto-viscoplastique modifié et (b) Modèle élasto-plastique

La mesure des formes expérimentales fournit une valeur du retour élastique de 20mm. Le modèle basé sur l'approche unifiée donne une meilleure prédiction du retour élastique avec une erreur de 9.2%. Ce niveau d'erreur est à relativiser car il ne prend pas en compte les imprécisions du protocole de mesure expérimental.

V.3.3.2 Évolution de l'effort du poinçon en fonction du temps

Une comparaison entre l'évolution expérimentale et numérique de l'effort de poinçon est présentée sur la Figure V-12. L'effort expérimental a été compensé afin de tenir compte d'un artefact machine lors de l'arrêt du poinçon pour le passage à la phase de relaxation.

En tenant compte de cette correction, la meilleure prédiction de la force du poinçon est obtenue avec l'approche unifiée (élasto-viscoplastique), avec une erreur maximale de 8%. Cette erreur apparaît dans la première étape où le taux de déformation est faible. Ceci peut être expliqué par le point faible du modèle de relaxation qui est, pour rappel, une erreur de prédiction dans le niveau de contraintes pour les faibles taux de déformation.

L'approche séquentielle (modèle élasto-plastique) comporte une analyse statique avec le modèle élasto-plastique, suivie d'une analyse d'écoulement visqueux avec une loi en sinus hyperbolique. Avec cette option une sous-estimation de l'effort est observée pour toutes les phases de la mise en forme.



Figure V-12 : Comparaison entre l'évolution expérimentale et numérique (avec les deux approches) de l'effort appliqué par le poinçon

V.3.3.3	Zones de	contact	sur la	i surface	supérieure
v.J.J.J	Lones ue	connuci	Sui ii	<i>i</i> surjuce	superieure

	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	Zone5
Séquence 1	Pas de contact	Pas de contact	Pas de contact	Contact	Pas de contact
Séquence 2	Contact	Contact	Contact	Pas de contact	Pas de contact
Séquence 3	Pas de contact	Contact	Contact	Pas de contact	Pas de contact
Séquence 4	Pas de contact	Pas de contact	Pas de contact	Pas de contact	Contact

Tableau V-1 : Evolution du jeu de cont
--

La Figure V-13 montre le jeu de contact numérique entre le poinçon et la tôle pour chaque séquence du procédé. Ce jeu de contact reste toujours le même quelle que soit l'approche utilisée (Modèle élasto-plastique ou bien loi unifiée). Comme indiqué dans le Tableau V-1, le jeu de contact évolue d'une façon continue durant la mise en forme dans les différentes zones de la tôle (définies Figure V-14). Durant la séquence 1, le contact apparaît uniquement dans la zone centrale. Pour la

séquence 2, le contact apparaît dans la majorité de la tôle à l'exception de la zone centrale et des parties externes. La séquence 3 fait apparaître des ruptures de contact dans les zones internes. Enfin, la séquence 4 est associée à un renforcement du contact dans zones externes.



Figure V-13 : (a) Séquence 1, (b) Séquence 2, (c) Séquence 3 et (d) Séquence 4

Ces résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux. Il est possible d'observer sur la Figure V-14, que le revêtement de nitrure de bore a été modifié sur certaines zones de la tôle, sous l'effet du contact avec le poinçon. La confrontation entre les résultats numériques et expérimentaux, en termes de zones de contact, montre une bonne prédiction de ces zones par la simulation.



Figure V-14 : Zones de contact expérimentales sur la surface supérieure de la tôle

V.3.3.4 Zones de contact sur la surface inférieure

L'observation de la surface inférieure de la tôle (la zone théoriquement en contact avec la matrice) ne fait apparaître des modifications du revêtement de nitrure de bore que dans les zones externes de la tôle (Figure V-15.a). Ces zones de contact sont en accord avec les résultats numériques obtenus (Figure V-15.b). Ces résultats sont les mêmes quelle que soit l'approche utilisée (Unifiée ou non). Cette observation confirme que le remplissage n'est pas complet.



Figure V-15 : Zones de contact sur la surface inférieure de la tôle, (a) résultat expérimental, (b) résultat numérique

V.3.4 Proposition d'un cycle de mise en forme amélioré

Suite à ces analyses comparatives, deux constatations peuvent être émises :

- (i) Le cycle de mise en forme appliqué sur la tôle épaisse ne permet pas une mise en forme complète du panneau double courbure. Ainsi, une modification du cycle de formage est nécessaire.
- L'outil numérique développé ci-dessus est en bonne accord avec les résultats expérimentaux. Le modèle unifié peut être utilisé pour prédire le cycle de mise en forme le plus approprié.

Une nouvelle stratégie de mise en forme est proposée. Elle consiste à relaxer la tôle durant 1000s à chaque fois que l'effort maximal de la presse est atteint (500T) et à répéter l'opération jusqu'à remplissage complet de la matrice.

Une subroutine utilisateur (UAMP) a été développée afin de contrôler l'amplitude de l'effort sur le poinçon. La subroutine utilise un capteur d'effort numérique qui a été placé au point de référence du poinçon. Lorsque la force atteint la valeur de consigne maximale, la vitesse du poinçon est mise à zéro permettant ainsi la relaxation du matériau.



Figure V-16 : Évolution numérique de l'effort avec la nouvelle stratégie

L'évolution de l'effort du poinçon en fonction du temps est présentée en Figure V-16. Le niveau d'effort dépassant 500T dans les premiers pas de temps est strictement dû à la gestion de l'incrémentation numérique par ABAQUS au démarrage de la simulation. Nous pouvons également noter que 12 séquences de formage/relaxation sont nécessaires pour obtenir la forme la plus appropriée.

V.4 Étude de la mise en forme par emboutissage de l'alliage AW551

V.4.1 Mise en forme expérimentale de la pièce prototype

V.4.1.1 Configuration expérimentale

Les étapes de préparation et de mise en place de la pièce dans l'outillage respectent le même protocole que celui adopté lors de la mise en forme de l'alliage 2050. Les dimensions de la tôle sont identiques à celles de l'alliage 2050 (soit 1000x550x40mm). Elle a subit une étape de préchauffage d'une heure à la température de formage (soit 350°C). Un maintien en température d'une heure permet ensuite de réaliser la mise en solution.

La mise en forme de la pièce s'effectue en une seule étape d'emboutissage. À la suite des deux heures de la phase de chauffage (préchauffe et maintien), le déplacement du poinçon est contrôlé à la vitesse de 2mm/s jusqu'à déformation complète de la pièce. Cette stratégie permet de reproduire sur la tôle la double courbure des deux faces de l'outil (poinçon et matrice). Une limite de 450T sur l'effort du poinçon est également prescrite afin de ne pas dépasser les capacités de la presse.

V.4.1.2 Résultats expérimentaux de la mise en forme

La Figure V-17 montre l'évolution de la température en fonction du temps sur les parties inférieure et supérieure de l'outil. Nous pouvons constater que la température reste relativement stable sur les deux surfaces de l'outil, avec une diminution maximale de 2°C.



Figure V-17 : Évolution de la température sur la partie supérieure (Poinçon) et inférieure de l'outil (Matrice)

L'évolution de l'effort en fonction du temps est illustrée par la Figure V-18. La force du poinçon augmente progressivement à partir de l'instant du contact poinçon-face supérieure de la tôle (soit après 107s) afin de former la première courbure. Après 150s, un accroissement rapide de l'effort est observé durant 3s pour atteindre une valeur maximale de 430Tonnes. Cette croissance est due à la formation de la deuxième courbure.



Figure V-18 : Évolution de l'effort poinçon au cours de la mise en forme de l'alliage AW551

La forme de la pièce obtenue après mise en forme de l'alliage AW551 est présentée en Figure V-19. La première image (Figure V-19.a), met en évidence l'existence de la double courbure. En se référant aux traces de contact sur les deux surfaces de la tôle (supérieure et inférieure), il est possible de constater l'absence du contact au centre de la tôle sur sa face inférieure (Figure V-19.b). Cette observation semble indiquer que le taux de remplissage de la matrice est inférieur à 100%.



Figure V-19 : Forme de la pièce obtenue et traces de contact sur la surface (a) supérieure et (b) inférieure de la tôle

La pièce déformée a été reconstruite sur CATIA (Figure V-20.a) à partir des données obtenues à l'aide d'une machine de mesure tridimensionnelle (MMT). La méthode de comparaison (Figure V-20.b et Figure V-20.c) adoptée pour l'alliage 2050 a également été utilisée pour cet alliage.



Figure V-20 : (a) Pièce obtenue avec la machine de mesure tridimensionnelle et Comparaison entre les courbures de la pièce déformé et la matrice : (b) Courbure N°2 et (c) Courbure N°1

Une différence maximale de 1.051 mm a été calculée au centre de la tôle. Cette différence peut également être expliquée par le phénomène de retour élastique ainsi que par le remplissage partiel de la matrice. Contrairement au cas de l'alliage 2050, la double courbure est nettement plus marquée, du fait d'un retour élastique nettement moins influent.

V.4.2 Simulation numérique de la mise en forme de la pièce prototype

V.4.2.1 Modèle numérique

Un modèle 3D identique à celui utilisé pour la simulation de la mise en forme de l'alliage 2050 a été mis en place. Le modèle matériau a été adapté à l'alliage étudié et le cycle de charge a été modifié de manière à prendre en compte la stratégie de mise en forme. La simulation s'effectue en une seule étape en contrôlant le déplacement du poinçon en vitesse selon l'axe Z. Les deux approches du modèle de comportement du matériau présentées au Chapitre 2 ont été utilisées (le modèle élasto-plastique et le modèle élasto-viscoplastique).

L'étude de sensibilité de l'influence de la taille du maillage sur la précision des résultats a été conduite uniquement avec le modèle élasto-plastique, du fait des temps de calculs prohibitifs imposés par le modèle élasto-viscoplastique. En tenant compte du fait que la variation de contrainte induite par la viscoplasticité est relativement faible (15%), il a été convenu que la règle de recalage obtenue avec le modèle élasto-plastique pouvait raisonnablement être appliquée au modèle élasto-viscoplastique.

En conséquence, les études ont pu être conduites pour les deux modèles avec un maillage relativement grossier comportant trois éléments selon l'épaisseur et avec une taille d'élément de 40mm² dans le plan de coque.

V.4.3 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques

V.4.3.1 Évolution de l'effort du poinçon en fonction du temps

La Figure V-21 montre la comparaison entre l'évolution expérimentale et numérique de l'effort appliqué sur le poinçon au cours de la mise en forme de la tôle en alliage AW551 à sa température de mise en solution (soit 350°C). Les résultats numériques présentés correspondent au modèle matériau élasto-plastique avec un maillage grossier et un maillage raffiné ainsi qu'au modèle élasto-viscoplastique utilisant la loi unifiée avec un maillage grossier.



Figure V-21 : Comparaison entre l'évolution expérimentale et numérique (avec les deux approches) de l'effort appliqué par le poinçon

Quel que soit le modèle utilisé pour la simulation de la mise en forme, les courbes comportent deux zones bien distinctes. Dans la première zone, l'évolution de la force est très faible et son niveau est légèrement supérieur (3%) au résultat expérimental. Cette différence semble être due à la précision de la presse IRT pour de faibles niveaux d'efforts et peut être également aux modèles d'initialisation du contact utilisés pour la simulation numérique. Dans la seconde zone la prédiction de l'effort maximal sur le poinçon, est améliorée avec le modèle élasto-viscoplastique. Une sous-estimation de cet effort est en effet observée avec le modèle élasto-plastique qui ne prend pas en compte l'effet de la vitesse de déformation.

Nous pouvons également remarquer que la force prédite en utilisant un maillage raffiné est inférieure à celle obtenue avec un maillage grossier. L'erreur constatée est d'environ 5.5% et nous pouvons raisonnablement considérer que cette marge peut également s'appliquer au modèle élasto-viscoplastique.

V.4.3.2 Retour élastique

La Figure V-22 représente les différentes formes de pièce obtenues avec les modèles de simulation étudiés. Nous pouvons constater une influence significative de la taille des éléments sur le retour élastique. Une différence de 1.74 mm est observée en comparant les résultats obtenus avec le modèle élasto-plastique comportant un maillage grossier et ce même modèle utilisant un maillage raffiné.

Nous pouvons également constater que le retour élastique avec le modèle élasto-plastique, ayant un maillage grossier, est plus important que celui obtenu avec le modèle élasto-viscoplastique avec la même taille d'élément. En effet, avec le modèle élasto-viscoplastique, le retour élastique ne dépasse pas 0.031 mm. Par contre, avec le modèle élasto-plastique il est de l'ordre de 2.54mm.



Figure V-22 : Comparaison entre les différentes formes de la pièce obtenues expérimentalement et numériquement avec les différents modèles étudiés

Une comparaison entre les courbures expérimentales et numériques obtenues avec le modèle élasto-viscoplastique est donnée par la Figure V-23. Cette comparaison confirme que le retour élastique est quasiment nul. En supposant que l'erreur due à la précision du maillage, établie avec le modèle élasto-plastique, est reproductible sur le modèle élasto-viscoplastique, le retour élastique simulé peut être évalué à une valeur proche de 1.74mm. Le résultat obtenu expérimentalement est de 1.051mm. Ce résultat est encourageant, mais il mérite confirmation par des simulations du modèle

élasto-viscoplastique avec un maillage raffiné. Une étude de sensibilité au maillage a été réalisée avec le modèle élasto-viscoplastique sur un essai de flexion. Les résultats de cette étude (Annexe E) ont montré que le modèle élasto-viscoplastique présente la même sensibilité au maillage que le modèle élasto-plastique.



Figure V-23 : Comparaison entre les courbures expérimentales et numériques obtenues avec le modèle élasto-viscoplastique

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la mise en forme par emboutissage de deux alliages d'aluminium (2050 et AW551) sur une tôle de 40mm a été étudiée à l'échelle réelle du panneau double courbure. Pour l'alliage 2050, la mise en forme a été réalisée en trois séquences composées pour chacune d'une phase de mise en forme et une phase de relaxation. Pour l'alliage AW551, la mise en forme a été effectuée en une seule étape.

Les modèles numériques de simulation de ces procédés ont été mis en place afin de prédire les conditions de mise en forme les plus appropriées. Une étude comparative avec les résultats expérimentaux a été conduite afin de s'assurer de la pertinence des modèles.

Une bonne prédiction a été obtenue, pour la mise en forme de l'alliage 2050, avec le modèle élastoviscoplastique en termes d'effort appliqué par le poinçon, de retour élastique et de forme finale de la pièce industrielle. Ce modèle a permis le chainage entre l'emboutissage et la relaxation tout en utilisant une loi unifiée permettant de prendre en compte l'anisotropie du matériau, l'écrouissage mixte, l'effet de la vitesse de déformation et également le phénomène de relaxation.

Afin d'améliorer le cycle de mise en forme étudié en visant un taux de remplissage de 100% de la matrice, un autre cycle a été proposé. Par contre, 12 séquences de formage/relaxation sont nécessaires pour obtenir la forme la plus appropriée, ce qui est particulièrement pénalisant pour le temps de cycle. Cette solution garantit cependant l'intégrité géométrique de la pièce et peut constituer une bonne alternative aux cycles actuellement utilisés.

Concernant la mise en forme de l'alliage AW551, le modèle élasto-viscoplastique développé a été validé avec un modèle numérique ayant un maillage grossier. La validation a été réalisée en comparant

l'effort du poinçon, le retour élastique et la forme finale de la pièce. Ces résultats doivent être confirmés par un modèle numérique ayant un maillage raffiné comme dans le cas de l'alliage 2050.